



Carolina Ferreira Szczerbacki

**Formação de Preços de Energia
Elétrica para o Mercado Brasileiro**

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. Jacques Szczupak

Rio de Janeiro

Março de 2007



Carolina Ferreira Szczerbacki

**Formação de Preços de Energia
Elétrica para o Mercado Brasileiro**

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. Jacques Szczupak
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dra. Leontina Maria Viana Graziadio Pinto
Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda.

Dr. Glauco Nery Taranto
COPPE/UFRJ

Dr. Djalma Mosqueira Falcão
COPPE/UFRJ

Dr. Luiz Henrique Guimarães de Macêdo
Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 22 de março de 2007

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

Carolina Ferreira Szczerbacki

A engenheira Carolina Ferreira Szczerbacki atua em projetos relacionados com o setor elétrico, tais como simulações de mercado, comercialização de energia e regulação econômica. Formada em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2004), atuou em projetos de pesquisa e desenvolvimento para o setor. Entre 2005 e 2006 foi comercializadora de energia da Light S.E.S.A. Atualmente, é consultora em energia pela Siglasul Consultoria em Energia.

Ficha Catalográfica

Szczerbacki, Carolina Ferreira

Formação de preços de energia elétrica para o mercado brasileiro / Carolina Ferreira Szczerbacki ; orientador: Jacques Szczupak. – 2007.

191 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Preços de energia. 3. Mercados de energia. 4. Tarifação. 5. Custos marginais. I. Szczupak, Jacques. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Aos meus pais, que me deram não só todo o apoio, mas a oportunidade de desenvolver este trabalho. Agradeço a eles pela confiança que sempre depositaram em mim.

Ao meu marido e à minha irmã pelo companheirismo, incentivo e paciência.

Aos meus orientadores e amigos Profs. Dr. Jacques Szczupak e Dra. Leontina Pinto, que se mostraram grandes mestres, sempre incentivadores, com orientações valiosas e sinceras.

Aos amigos engenheiros Dr. Luiz Henrique Macedo, Dr. Marcelo Luna de Oliveira e Marcio Henrique Lima Nascimento pelas conversas e orientações ao longo deste trabalho, fornecendo material bibliográfico importante e transmitindo parte de suas experiências profissionais.

À Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda que cedeu os programas de previsão de demanda e os dados utilizados no modelo de expansão.

À minha avó e aos amigos, tios e primos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste documento, pelo seu carinho e pelo seu amor.

À PUC-RJ e à CNPq, pela bolsas concedidas durante a realização deste mestrado.

Resumo

Szczerbacki, Carolina Ferreira; Szczupak, Jacques (Orientador).
Formação de Preços de Energia Elétrica para o Mercado Brasileiro.
Rio de Janeiro, 2007. 191p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os preços de energia elétrica, insumo básico para todo o Modelo Setorial, constituem uma das maiores incertezas do setor. Estas incertezas abrangem todos os elementos formadores de preços: a oferta, a demanda e as regras de mercado, tornando muitas vezes difícil ao agente a avaliação concreta e precisa do processo da formação de preços e do impacto que a variação de um dos elementos do processo produz no resultado final. O objetivo deste trabalho é apresentar a estrutura de formação de preços no mercado energético brasileiro de forma sistematizada, avaliando a composição das variáveis que afetam esta estrutura: a demanda por consumo, a expansão do sistema e as disponibilidades energéticas. O mercado é modelado em todos os seus detalhes físicos, e o cálculo é realizado a partir de todo o arcabouço regulatório, incluindo a reprodução do modelo de operação ótima responsável pelos preços de energia. Descreve-se inicialmente um modelo de previsão de demanda por subsistema, utilizando-se técnicas de Teoria de Análise Funcional. Focaliza-se em seguida o suprimento futuro de energia no país a partir da expansão da oferta. Finalmente, utiliza-se uma simulação da operação ótima do sistema a partir da reprodução dos resultados do modelo utilizado no setor – o Newave – a partir de uma implementação própria desenvolvida especialmente no escopo deste trabalho. De posse dos possíveis cenários futuros, pode-se mensurar o impacto que a variação de cada elemento formador (demanda, expansão e afluências) tem sobre os custos de energia. É possível observar que as incertezas nestas variáveis podem gerar grandes impactos nos custos marginais e, conseqüentemente, nos custos futuros de energia elétrica.

Palavras-chave

Preços de Energia, Mercados de Energia, Tarifação, Custos Marginais.

Abstract

Szczerbacki, Carolina Ferreira; Szczupak, Jacques (Advisor). **Electrical Energy Price Structuring for the Brazilian Market**. Rio de Janeiro, 2007. 191p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Energy Prices, essential input for the Sectorial Model, consist on the biggest uncertainties of the Electric Sector. These uncertainties enclose all price elements: the supply, the demand and the market rules, making sometimes difficult for the agents to evaluate the price process and the impact that the variation of each process element can produce on the result. The objective is to present Brazilian price process in a structuralized way, evaluating the variables composition that affects this structure: the demand, the electric system expansion and the energy supply availability. The market is modeled in all its physical details, and the calculation is done into the regulatory environment, including a reproduction of the optimal operation model responsible for energy prices. First, a demand forecast model is described, based on Functional Analysis Theory. Then, the focus is on the energy future supply, analyzing the supply expansion in Brazil. Finally, an optimal operation system is simulated, reproducing the sector model (*Newave*) results from an implementation developed in this work. From these possible future settings, each element (demand, expansion and energy supply availability) variation impact on energy prices can be measured. The simulations show that uncertainties about these variables can have big impacts on marginal costs and, consequently, on the energy future prices.

Keywords

Energy Prices, Energy Markets, Tariffs, Marginal Costs.

Sumário

1.	Introdução	16
1.1.	Objetivo	16
1.2.	Metodologia	17
1.3.	Estrutura do trabalho	17
2.	Estrutura de Formação de Preços no Mercado Brasileiro	19
3.	O Setor Elétrico Brasileiro.....	21
4.	O Sistema Eletro-energético Brasileiro.....	24
5.	O Desafio: Atender às Necessidades Energéticas da Sociedade	30
5.1.	Idéia Central.....	30
5.2.	O Produto Interno e o Espaço de Hilbert	30
5.3.	Caso Exemplo.....	34
6.	Expansão Energética: custos a longo prazo.....	58
6.1.	Idéia Central.....	58
6.2.	Modelagem	58
6.3.	Caso Exemplo – Usinas Hidráulicas.....	59
6.4.	Caso Exemplo – Usinas Termelétricas	64
7.	A Operação: custos a curto prazo	68
7.1.	Estrutura Geral.....	68
7.2.	Incertezas Associadas à Operação	69
7.3.	Determinação da Função Objetivo	73
7.4.	Restrições do Problema.....	75
7.5.	A Solução do Modelo e a Determinação dos Custos	84
7.6.	Estudo de caso:	91
7.7.	Observação Importante	117
8.	Conclusão	119
	Bibliografia	121
	Anexo 1.....	123
	Anexo 2.....	124
	Anexo 3.....	125
	Anexo 4.....	129
	Anexo 5.....	130
	Anexo 6.....	134
	Anexo 7.....	143
	Anexo 8.....	147

Anexo 9.....	155
Anexo 10.....	158
Anexo 11.....	166
Anexo 12.....	168
Anexo 13.....	183
Anexo 14.....	189

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Cenários para o crescimento do PIB	53
Tabela 2 – Estrutura de Desembolso	58
Tabela 3 – Estrutura de capital.....	59
Tabela 4 – Custos de O&M – R\$/MWh	60
Tabela 5 – Encargos e Tributos.....	60
Tabela 6 – Despesas referentes ao investimento aportado – R\$.....	61
Tabela 7 – Estrutura de Desembolso	64
Tabela 8 – O&M e Tributação.....	64
Tabela 9 – Despesas referentes ao investimento aportado – Usina Térmica – R\$	65
Tabela 10 – Custos de déficit por submercado por patamar de carga (R\$/MWh) – fonte ONS	97
Tabela 11 – Volumes Iniciais por Subsistema (MWmês) – Fonte ONS	98
Tabela 12 – Séries históricas de demanda por submercados [15].....	123
Tabela 13 – Histórico do PIB nacional [11].....	124
Tabela 14 – Temperaturas mensais médias do submercado SE/CO [14]	125
Tabela 15 – Temperaturas mensais médias do submercado S [14]	126
Tabela 16 – Temperaturas mensais médias do submercado NE [14].....	127
Tabela 17 – Temperaturas mensais médias do submercado N [14]	128
Tabela 18 – PIB – Cenários projetados.....	129
Tabela 19 – Projeção da Temperatura Mensal Média - subsistema SE/CO	130
Tabela 20 – Projeção da Temperatura Mensal Média - subsistema S.....	131
Tabela 21 – Projeção da Temperatura Mensal Média - subsistema NE	132
Tabela 22 – Projeção da Temperatura Mensal Média - subsistema N.....	133
Tabela 23 – Geração Média	134
Tabela 24 – Despesas com O&M – R\$	135
Tabela 25 – Receitas da Usina Hidrelétrica – R\$.....	136
Tabela 26 – Despesas de uma usina hidrelétrica – R\$.....	137
Tabela 27 – Geração Média da usina Termelétrica.....	138
Tabela 28 – Despesas com O&M – Termelétrica - R\$.....	139
Tabela 29 – Despesas com combustível - R\$	140
Tabela 30 – Receitas da Usina Termelétrica– R\$	141
Tabela 31 – Despesas de uma usina termelétrica – R\$.....	142
Tabela 32 – Cenários Previstos para a Demanda no SE/CO - MWmês	143

Tabela 33 – Cenários Previstos para a Demanda no S - MWmês.....	144
Tabela 34 – Cenários Previstos para a Demanda no NE - MWmês	145
Tabela 35 – Cenários Previstos para a Demanda no N – Mwmês	146
Tabela 36 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema SE/CO - Parte 1	147
Tabela 37 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema SE/CO - Parte 2	148
Tabela 38 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema SE/CO - Parte 3	148
Tabela 39 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema SE/CO - Parte 4	149
Tabela 40 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema SE/CO - Parte 5	149
Tabela 41 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema S – Parte 1	150
Tabela 42 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema S – Parte 2	150
Tabela 43 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema S – Parte 3	151
Tabela 44 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema S – Parte 4	151
Tabela 45 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema S – Parte 5	152
Tabela 46 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema NE – Parte 1	152
Tabela 47 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema NE – Parte 2	153
Tabela 48 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema NE – Parte 3	153
Tabela 49 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema NE – Parte 4	154
Tabela 50 – Cronograma de Expansão de Energia Térmica – ONS – fevereiro de 2006. Subsistema NE – Parte 5	154
Tabela 51 – Expansão da Capacidade Hidráulica – subsistema SE/CO [15] ...	155
Tabela 52 – Expansão da Capacidade Hidráulica – subsistema Sul [15]	156
Tabela 53 – Expansão da Capacidade Hidráulica – subsistema Norte [15].....	157

Tabela 54 - Coeficientes PAR(p) – Subsistema SE/CO [15].....	158
Tabela 55 – Cenários gerados de Afluências – Subsistema SE/CO	159
Tabela 56 – Coeficientes PAR(p) – Subsistema Sul [15]	160
Tabela 57 – Cenários gerados de Afluências – Subsistema S.....	161
Tabela 58 – Coeficientes PAR(p) – Subsistema NE [15]	162
Tabela 59 – Cenários gerados de Afluências – Subsistema NE	163
Tabela 60 – Coeficientes PAR(p) – Subsistema N [15].....	164
Tabela 61 – Cenários gerados de Afluências – Subsistema N	165
Tabela 62 – Custos das Térmicas do Subsistema SE/CO (R\$/MWh) [15].....	166
Tabela 63 – Custos das Térmicas do Subsistema Sul (R\$/MWh) [15].....	166
Tabela 64 – Custos das Térmicas do Subsistema NE (R\$/MWh) [15].....	167
Tabela 65 – Limites de Armazenamento – Subsistema SE/CO (MWmês) [15]	168
Tabela 66 – Limites de Armazenamento – Subsistema Sul (MWmês) [15]	169
Tabela 67 – Limites de Armazenamento – Subsistema NE (MWmês) [15].....	170
Tabela 68 – Limites de Armazenamento – Subsistema Norte (MWmês) [15]...	171
Tabela 69 – Limites Máximos de Turbinamento por Subsistema (MWmês) [15]	172
Tabela 70 – Limites Máximos de Geração das Térmicas do Subsistema SE/CO (MWmês) [15]	172
Tabela 71 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema SE/CO (MWmês) – Parte 1 [15].....	173
Tabela 72 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema SE/CO (MWmês) – Parte 2 [15].....	174
Tabela 73 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema SE/CO (MWmês) – Parte 3 [15].....	175
Tabela 74 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema SE/CO (MWmês) – Parte 4[15].....	175
Tabela 75 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema SE/CO (MWmês) – Parte 5[15].....	176
Tabela 76 – Limites Máximos de Geração das Térmicas do Subsistema Sul (MWmês) [15]	176
Tabela 77 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema Sul (MWmês) – Parte 1 [15].....	177
Tabela 78 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema Sul (MWmês) – Parte 2 [15].....	177
Tabela 79 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema Sul (MWmês) – Parte 3 [15].....	178

Tabela 80 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema Sul (MWmês) – Parte 4 [15].....	178
Tabela 81 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema Sul (MWmês) – Parte 5 [15].....	179
Tabela 82 – Limites Máximos de Geração das Térmicas do Subsistema NE (MWmês) [15]	179
Tabela 83 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema NE (MWmês) – Parte 1 [15].....	180
Tabela 84 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema NE (MWmês) – Parte 2 [15].....	180
Tabela 85 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema NE (MWmês) – Parte 3 [15].....	181
Tabela 86 – Tabela 87 - Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema NE (MWmês) – Parte 4 [15].....	181
Tabela 88 – Limites Mínimos de Geração das Térmicas do Subsistema NE (MWmês) – Parte 5 [15].....	182
Tabela 89 – Limites Mínimos e Máximos – intercâmbio a (MWmês) [15]	183
Tabela 90 – Limites Mínimos e Máximos – intercâmbio b (MWmês) [15]	184
Tabela 91 – Limites Mínimos e Máximos – intercâmbio c (MWmês) [15]	185
Tabela 92 – Limites Mínimos e Máximos – intercâmbio d (MWmês) [15]	186
Tabela 93 – Limites Mínimos e Máximos – intercâmbio d (MWmês) [15]	187
Tabela 94 – Limites Mínimos e Máximos – intercâmbio e (MWmês) [15]	188
Tabela 95 – Custos marginais de operação – com disponibilidade de gás (R\$/MWh)	189
Tabela 96 – Custos marginais de operação – sem disponibilidade de gás (R\$/MWh)	190
Tabela 97 – Custos marginais de operação – cenário ONS (R\$/MWh).....	191

Lista de Figuras

Figura 1 – Estrutura de Formação de Preços.....	20
Figura 2 – Os Organismos Setoriais.....	22
Figura 3 – O esquemático de intercâmbios (a) e o mapa (b) do Sistema Interligado Nacional.	24
Figura 4 – Estrutura da capacidade instalada do SIN.	25
Figura 5 – Produção por Submercado.....	26
Figura 6 – Carga Própria por Submercado.....	27
Figura 7– Etapas do Planejamento e Operação do SIN.....	27
Figura 8 – O processo de decisão do planejamento de médio prazo	28
Figura 9 – Projeção da demanda do submercado na variável explicativa PIB nacional	32
Figura 10 – Projeção do resíduo ¹ na variável explicativa temperatura média do submercado.....	33
Figura 11 – Série Histórica – Demanda do Subsistema SE/CO (MWmês)	34
Figura 12 – Série Histórica – Demanda do Subsistema Sul (MWmês)	35
Figura 13 – Série Histórica – Demanda do Subsistema NE (MWmês)	35
Figura 14 – Série Histórica – Demanda do Subsistema Norte (MWmês)	36
Figura 15 – Série Histórica – PIB	36
Figura 16 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema SE/CO (°C) ..	37
Figura 17– Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema Sul (°C)	37
Figura 18 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema NE (°C).....	38
Figura 19 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema Norte (°C).....	38
Figura 20 – Demanda histórica do submercado SE/CO normalizada x série histórica do PIB normalizada	39
Figura 21 – Projeção da série histórica de demanda do SE/CO na variável explicativa PIB	40
Figura 22 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do SE/CO na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal – normalizada.....	41
Figura 23 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – SE/CO.....	41
Figura 24 – Projeção final da demanda do SE/CO.....	42

Figura 25 – Demanda histórica do submercado S normalizada x série histórica do PIB normalizada	43
Figura 26 – Projeção da série histórica de demanda do S na variável explicativa PIB.....	44
Figura 27 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do S na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal - normalizada	44
Figura 28 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – Sul.....	45
Figura 29 – Projeção final da demanda do Sul.....	45
Figura 30 – Demanda histórica do submercado NE normalizada x série histórica do PIB normalizada	46
Figura 31 – Projeção da série histórica de demanda do NE na variável explicativa PIB.....	47
Figura 32 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do NE na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal - normalizada	48
Figura 33 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – NE.....	48
Figura 34 – Projeção final da demanda do NE.....	49
Figura 35 – Demanda histórica do submercado N normalizada x série histórica do PIB normalizada	50
Figura 36 – Projeção da série histórica de demanda do N na variável explicativa PIB.....	51
Figura 37 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do N na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal - normalizada	51
Figura 38 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – N	52
Figura 39 – Projeção final da demanda do N	52
Figura 40 – Cenários projetados – PIB.....	54
Figura 41 – Projeção da Temperatura Média por Subsistema (°C).....	55
Figura 42 – Cenários futuros para a demanda no subsistema SE/CO (MWmês).....	56
Figura 43 – Cenários futuros para a demanda no subsistema Sul (MWmês)	56
Figura 44 – Cenários futuros para a demanda no subsistema NE (MWmês)	57
Figura 45 – Cenários futuros para a demanda no subsistema N (MWmês).....	57
Figura 46 – Fluxo de Caixa – Hidrelétrica	63

Figura 47 – Fluxo de Caixa – Termelétrica a Gás	66
Figura 48 – Intercâmbios entre os submercados do SIN.	77
Figura 49 – Construção geométrica da função $\alpha_1(X_1)$	87
Figura 50 – Cenários para a expansão de energia térmica no SE/CO	93
Figura 51 – Cenários para a expansão de energia térmica no S	94
Figura 52 – Cenários para a expansão de energia térmica no NE.....	95
Figura 53 – Expansão Hidráulica.....	96
Figura 54 – Comparação - cenários demanda SE/CO	98
Figura 55 – Comparação - cenários demanda - S.....	99
Figura 56 – Comparação - cenários demanda - NE	99
Figura 57 – Comparação - cenários demanda – N.....	100
Figura 58 – Operação submercado – cenário 1 de demanda	100
Figura 59 – CMO por submercado – cenário 1 de demanda	101
Figura 60 – Operação por submercado – cenário 2 de demanda	102
Figura 61 – CMO por submercado – cenário 2 de demanda	103
Figura 62 – Operação por submercado – cenário 3 de demanda	104
Figura 63 – CMO por submercado – cenário 3 de demanda	105
Figura 64 – Operação por submercado – cenário ONS de demanda	106
Figura 65 – CMO por submercado – cenário ONS de demanda.....	107
Figura 66 – Operação por submercado – cenário 1 de demanda	109
Figura 67 – CMO por submercado – cenário 1 de demanda	110
Figura 68 – Operação por submercado – cenário 2 de demanda	111
Figura 69 – CMO por submercado – cenário 2 de demanda	112
Figura 70 – Operação por submercado – cenário 3 de demanda	113
Figura 71 – CMO por submercado – cenário 3 de demanda	114
Figura 72 – Operação por submercado – cenário ONS de demanda	115
Figura 73 – CMO por submercado – cenário ONS de demanda.....	116