



Thayse Cristina Trajano da Silva

**Cenários Futuros de Oferta e Demanda
de Energia Elétrica: Simulações do
Possível Racionamento até 2011**

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: Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Novembro de 2008



Thayse Cristina Trajano da Silva

**Cenários Futuros de Oferta e Demanda
de Energia Elétrica: Simulações do
Possível Racionamento até 2011**

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.

Prof. Reinaldo Castro Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. André Luís Marques Marcato
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. José Francisco Moreira Pessanha
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

Profa. Monica Barros
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

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

Rio de Janeiro, 3 de novembro de 2008

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

Thayse Cristina Trajano da Silva

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência na Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ em 2005. Na UERJ, participou da Empresa Júnior de Engenharia – Hidros Consultoria, foi monitora junto ao Instituto de Química e bolsista de iniciação científica do Grupo de Estudos de Veículos Elétricos - GRUVE. Estagiou no Departamento de Planejamento da Transmissão em Furnas Centrais Elétricas. Atualmente é engenheira da Centrais Elétricas Brasileiras – ELETROBRÁS e atua no Departamento de Comercialização de Energia, na área de contabilização e operação de energia elétrica.

Ficha Catalográfica

Silva, Thayse Cristina Trajano da

Cenários futuros de oferta e demanda de energia elétrica: simulações do possível racionamento até 2011 / Thayse Cristina Trajano da Silva; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2008.

146 f. : il. ; 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. Séries temporais. 3. Simulações. 4. Racionamento de energia. 5. Previsão de demanda. 6. Cenário de oferta e demanda. 7. Planejamento da operação energética. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus amados pais,
Natal e Sônia, e irmã Karine.

Agradecimentos

Ao meu adorado Jesus que é a razão da minha existência.

Aos meus pais Natal e Sônia que são exemplos de vida para mim e que sempre me deram muito amor, compreensão e oportunidades para concluir os meus estudos.

A minha querida irmã Karine que é o meu presente de Deus, sendo uma companheira e amiga em todos os momentos importantes da minha vida.

Ao meu namorado Bruno Volaro que me deu todo apoio, estímulo e carinho que me ajudaram a concluir esta dissertação.

Ao meu orientador Reinado Castro que me proporcionou a oportunidade de realizar este trabalho com toda a sua atenção e esclarecimentos. Também pela grande paciência com os seus alunos e as maravilhosas aulas que nos oferece.

A professora Monica Barros que me auxiliou durante o estudo orientado e a elaboração desta dissertação.

A todos os amigos que fiz na PUC-Rio e que me ajudaram em muitos momentos, em especial, Armando, Bruno, Marcel, Marcela e Murilo.

Aos meus amigos da ELETROBRÁS que me ampararam nos momentos críticos. Em especial agradeço aos amigos do DEN, que me forneceram vários dados, além dos riquíssimos auxílios do Fabiano com o modelo NEWAVE.

Aos novos amigos do CEPEL.

A todos os meus eternos mestres da UERJ que me fizeram ser realizada na escolha profissional, em especial aos professores Erli Ferreira e Luiz Artur Pecorelli que também me indicaram e incentivaram a iniciar este mestrado, além do incentivo do Jorge Amon que foi meu chefe em Furnas.

A todos os meus parentes e amigos que torceram por mim.

A PUC- Rio e CNPq pelos auxílios recebidos.

Resumo

Silva, Thayse Cristina Trajano da; Souza, Reinaldo Castro. **Cenários futuros de oferta e demanda de energia elétrica: simulações do possível racionamento até 2011**. Rio de Janeiro, 2008. 146p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O sistema de geração de energia elétrica do Brasil é hidrotérmico e de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas. O seu tamanho e características peculiares permitem considerá-lo único em todo o mundo. Conseqüentemente a coordenação de todo esse sistema é uma tarefa de extrema complexidade e, portanto, há a necessidade de um correto planejamento e operação para evitar ou amenizar problemas relacionados a segurança de suprimento. Neste contexto, esta dissertação estuda as condições que resultaram no racionamento de energia elétrica no ano de 2001 e no início de 2002, além dos seus efeitos no curto e médio prazo e posteriormente infere sobre um possível novo racionamento. Para isto foram realizadas previsões do consumo de energia, durante o período de crise e foi desenvolvida uma modelagem computacional para simular os seus efeitos. Para obter os indicativos do racionamento passado e inferir sobre um novo, foram realizadas simulações no Modelo Computacional de Otimização Hidrotérmica de Médio Prazo – NEWAVE, desenvolvido pelo CEPEL.

Palavras-chave

Séries Temporais. Simulações. Racionamento de Energia. Previsão de Demanda. Cenário de Oferta e Demanda. Planejamento da Operação Energética.

Abstract

Silva, Thayse Cristina Trajano da; Castro, Reinaldo Souza (Advisor). **Futures settings of supply and demand of electric energy: simulations of possible energy-rationing until 2011.** Rio de Janeiro, 2008. 146p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Brazilian electric energy generation system is a hydrothermal system of great size, with predominance hydroelectric plants. Its peculiar size and characteristics is the only one in the world. Consequently, its coordination is very complex and, therefore, it's necessary the correct planning and operation to prevent or reduce problems related to supplement security. In this context, this work studies the conditions that resulted in the rationing of electric energy in 2001 and in the beginning of 2002, as well as the effect in the short term and the medium term and infers on a new rationing possible. For this, energy consumption estimations were done, during the period of crisis and was developed a computational modeling to simulate its effect. To get the indicative of the last rationing and to infer on a new one was done simulations in the Computational Model NEWAVE, developed by CEPEL.

Keywords

Temporal Series. Simulations. Energy-rationing. Demand Forecasting. Supply and Demand Scenarios. Operation Planning.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Introdução | 18 |
| 1.1. Motivação | 18 |
| 1.2. Objetivo | 19 |
| 1.3. Estrutura do Trabalho | 19 |
| 1.4. Organização da Dissertação | 20 |
| | |
| 2. Setor Elétrico Brasileiro | 21 |
| 2.1. Antes da Reforma da Década de 90 | 21 |
| 2.2. Após a Reforma da Década de 90 | 22 |
| 2.3. Racionamento de Energia em 2001/2002 | 25 |
| 2.4. Novo Modelo do Setor Elétrico | 26 |
| 2.5. Comercialização de Energia Elétrica no Novo Modelo | 29 |
| | |
| 3. Modelo Computacional NEWAVE | 32 |
| 3.1. Planejamento da Operação Energética Brasileira | 32 |
| 3.2. Estratégia de Operação: Mínimo Custo Total | 33 |
| 3.3. Série Estatística de Afluências | 36 |
| 3.4. Programação Dinâmica Dual Estocástica | 36 |
| 3.5. Critério de convergência ou de parada | 38 |
| 3.6. Fluxograma do Modelo NEWAVE | 39 |
| 3.7. Representação no NEWAVE | 40 |
| 3.8. Dados de Entrada do Modelo NEWAVE | 43 |
| 3.9. Resultado da Simulação Final | 45 |
| 3.10. Evolução do Programa computacional NEWAVE | 47 |
| | |
| 4. Modelagem do Racionamento de Energia em 2001/2002 | 49 |
| 4.1. Introdução | 49 |
| 4.2. Mercado de Energia Total do Brasil | 50 |
| 4.3. Mercado de Energia Total do Brasil por Classes de Consumo | 51 |
| 4.4. Mercado de Energia por Regiões do Brasil | 56 |
| 4.5. Mercado de Energia por Regiões do Brasil e Classes de | |

| | |
|---|-----|
| Consumo | 61 |
| 4.6. Mercado de Energia por Submercados | 62 |
| 4.7. Modelagem das Curvas Características do Consumo dos Submercados | 63 |
| | |
| 5. Simulações Utilizando o Modelo Computacional NEWAVE | 72 |
| 5.1. Cenários de Referência em 2001 | 72 |
| 5.1.1. Análise dos Resultados e Critério de Decisão | 79 |
| 5.2. Cenários de Referência em 2008 | 80 |
| 5.2.1. Análise dos Resultados | 83 |
| 5.3. Cenários de Estudos | 84 |
| 5.3.1. Cenário Base sem a Curva de Aversão ao Risco | 84 |
| 5.3.1.1. Análise dos Resultados | 86 |
| 5.3.2. Cenário com Racionamento - Curva Ajustada | 86 |
| 5.3.2.1. Análise dos Resultados | 88 |
| 5.3.3. Cenário com Racionamento de 10% | 89 |
| 5.3.3.1. Análise dos Resultados | 90 |
| 5.3.4. Cenário com Racionamento de 20% | 90 |
| 5.3.4.1. Análise dos Resultados | 92 |
| 5.3.5. Cenário com Demanda Alta e Atrasos na Oferta | 92 |
| 5.3.5.1 Análise dos Resultados | 94 |
| | |
| 6. Conclusões e Trabalhos Futuros | 95 |
| | |
| Referências Bibliográficas | 97 |
| | |
| A. Dados de Entrada do Cenário de Referência em 2001 – NEWAVE versão 8.3 | 100 |
| A.1. Simulação do cenário base - PMO de janeiro de 2001 | 100 |
| A.2. Simulação do cenário base - PMO de fevereiro de 2001 | 103 |
| A.3. Simulação do cenário base - PMO de março de 2001 | 106 |
| A.4. Simulação do cenário base - PMO de abril de 2001 | 109 |
| A.5. Simulação do cenário base - PMO de maio de 2001 | 112 |
| A.6. Simulação do cenário base - PMO de junho de 2001 | 115 |

| | |
|--|-----|
| B. Dados de Entrada do Cenário de Referência em 2008 – NEWAVE versão 13a | 119 |
| B.1. Simulação do cenário base - PMO de março de 2008 | 119 |
| B.2. Simulação do cenário base - PMO de abril de 2008 | 127 |
| C. Dados de Entrada dos Cenários de Estudos | 135 |
| C.1. Simulação do caso de março de 2008 sem CAR (Curva de Aversão ao Risco) | 135 |
| C.2. Simulação do caso de abril de 2008 sem CAR (Curva de Aversão ao Risco) | 136 |
| C.3. Simulação do Cenário com as Curvas Ajustadas | 137 |
| C.4. Simulação do Cenário com racionamento de 10% | 139 |
| C.5. Simulação do Cenário com racionamento de 20% | 140 |
| C.6. Simulação do Cenário com atraso na oferta e expansão na demanda | 141 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 – Setores Eficientes por Região Geográfica | 62 |
| Tabela 5.1 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 01/2001 | 73 |
| Tabela 5.2 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 01/2001 | 73 |
| Tabela 5.3 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 01/2001 | 73 |
| Tabela 5.4 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 01/2001 | 73 |
| Tabela 5.5 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 02/2001 | 74 |
| Tabela 5.6 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 02/2001 | 74 |
| Tabela 5.7 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 02/2001 | 74 |
| Tabela 5.8 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 02/2001 | 74 |
| Tabela 5.9 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 03/2001 | 75 |
| Tabela 5.10 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 03/2001 | 75 |
| Tabela 5.11 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 03/2001 | 75 |
| Tabela 5.12 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 03/2001 | 75 |
| Tabela 5.13 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 04/2001 | 76 |
| Tabela 5.14 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 04/2001 | 76 |
| Tabela 5.15 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – | |

| | |
|---|----|
| Deck 04/2001 | 76 |
| Tabela 5.16 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 04/2001 | 76 |
| Tabela 5.17 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 05/2001 | 77 |
| Tabela 5.18 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 05/2001 | 77 |
| Tabela 5.19 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 05/2001 | 77 |
| Tabela 5.20 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 05/2001 | 77 |
| Tabela 5.21 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 06/2001 | 78 |
| Tabela 5.22 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 06/2001 | 78 |
| Tabela 5.23 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 06/2001 | 78 |
| Tabela 5.24 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 06/2001 | 78 |
| Tabela 5.25 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 03/2008 | 81 |
| Tabela 5.26 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 03/2008 | 81 |
| Tabela 5.27 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 03/2008 | 81 |
| Tabela 5.28 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 03/2008 | 81 |
| Tabela 5.29 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 04/2008 | 82 |
| Tabela 5.30 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 04/2008 | 82 |
| Tabela 5.31 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 04/2008 | 82 |
| Tabela 5.32 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – | |

| | |
|---|----|
| Deck 04/2008 | 82 |
| Tabela 5.33 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 03/2008 Sem CAR | 84 |
| Tabela 5.34 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 03/2008 Sem CAR | 85 |
| Tabela 5.35 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 03/2008 Sem CAR | 85 |
| Tabela 5.36 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 03/2008 Sem CAR | 85 |
| Tabela 5.37 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Deck 04/2008 Sem CAR | 85 |
| Tabela 5.38 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Deck 04/2008 Sem CAR | 85 |
| Tabela 5.39 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Deck 04/2008 Sem CAR | 85 |
| Tabela 5.40 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Deck 04/2008 Sem CAR | 86 |
| Tabela 5.41 – Séries com Déficit no Subsistema Sudeste – Com racionamento | 87 |
| Tabela 5.42 – Séries com Déficit no Subsistema Sul – Com racionamento | 87 |
| Tabela 5.43 – Séries com Déficit no Subsistema Nordeste – Com racionamento | 87 |
| Tabela 5.44 – Séries com Déficit no Subsistema Norte – Com racionamento | 87 |

Lista de Gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 3.1 – Curvas de Custo Imediato e Futuro | 34 |
| Gráfico 3.2 – Custo Total | 35 |
| Gráfico 3.3 – Derivada do Custo Futuro pelo enfoque Pente | 37 |
| Gráfico 4.1 – Mercado do Brasil e Projeção | 50 |
| Gráfico 4.2 – Razão entre o Mercado de Energia do Brasil e a Projeção | 51 |
| Gráfico 4.3 – Carga do Setor Comercial do Brasil e Projeção | 52 |
| Gráfico 4.4 – Razão entre a Carga do Setor Comercial do Brasil e Projeção | 52 |
| Gráfico 4.5 – Carga do Setor Residencial do Brasil e Projeção | 53 |
| Gráfico 4.6 – Razão entre a Carga do Setor Residencial do Brasil e Projeção | 53 |
| Gráfico 4.7 – Carga do Setor Industrial do Brasil e Projeção | 54 |
| Gráfico 4.8 – Razão entre a Carga do Setor Industrial do Brasil e Projeção | 54 |
| Gráfico 4.9 – Carga das Outras Classes do Brasil e Projeção | 55 |
| Gráfico 4.10 – Razão entre a Carga das Outras Classes do Brasil e Projeção | 55 |
| Gráfico 4.11 - Consumo de Energia no Brasil por Segmentos de Consumo | 56 |
| Gráfico 4.12 - Carga da Região Sudeste e Projeção | 57 |
| Gráfico 4.13 - Razão entre a Carga da Região Sudeste e Projeção | 57 |
| Gráfico 4.14 - Carga da Região Sul e Projeção | 58 |
| Gráfico 4.15 - Razão entre a Carga da Região Sul e Projeção | 58 |
| Gráfico 4.16 - Carga da Região Nordeste e Projeção | 59 |
| Gráfico 4.17 - Razão entre a Carga da Região Nordeste e Projeção | 59 |
| Gráfico 4.18 - Carga da Região Centro-Oeste e Projeção | 60 |
| Gráfico 4.19 - Razão entre a Carga da Região Centro-Oeste e Projeção | 60 |
| Gráfico 4.20 - Carga da Região Norte e Projeção | 61 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 4.21 - Razão entre a Carga da Região Norte e Projeção | 61 |
| Gráfico 4.22 - Carga do Submercado Sudeste e Projeção | 62 |
| Gráfico 4.23 - Razão entre a Carga do Submercado Sudeste e Projeção | 63 |
| Gráfico 4.24 – Submercado Sudeste - Razão entre a Carga e a Projeção | 64 |
| Gráfico 4.25 – Curva ajustada para região decrescente do submercado Sudeste | 64 |
| Gráfico 4.26 – Curva ajustada para região crescente do submercado Sudeste | 65 |
| Gráfico 4.27 – Curva ajustada e Razão no submercado Sudeste | 65 |
| Gráfico 4.28 - Curva ajustada e Razão no submercado Sul | 66 |
| Gráfico 4.29 – Submercado Nordeste - Razão entre a Carga e a Projeção | 67 |
| Gráfico 4.30 – Curva ajustada para região decrescente do submercado Nordeste | 67 |
| Gráfico 4.31 – Curva ajustada para região crescente do submercado Nordeste | 68 |
| Gráfico 4.32 - Curva ajustada e Razão no submercado Nordeste | 68 |
| Gráfico 4.33 – Submercado Norte - Razão entre a Carga e a Projeção | 69 |
| Gráfico 4.34 – Curva ajustada para região decrescente do submercado Norte | 70 |
| Gráfico 4.35 – Curva ajustada para região crescente do submercado Norte | 70 |
| Gráfico 4.36 - Curva ajustada e Razão no submercado Norte | 71 |
| Gráfico 5.1 – Energia Não Suprida por Submercado – Deck janeiro/2001 | 73 |
| Gráfico 5.2 – Energia Não Suprida por Submercado – Deck fevereiro/2001 | 74 |
| Gráfico 5.3 – Energia Não Suprida por Submercado – Deck março/2001 | 75 |
| Gráfico 5.4 – Energia Não Suprida por Submercado – Deck abril/2001 | 76 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 5.5 – Energia Não Suprida por Submercado – Deck maio/2001 | 77 |
| Gráfico 5.6 – Energia Não Suprida por Submercado – Deck junho/2001 | 78 |
| Gráfico 5.7 – Distribuição do Mercado Total de Energia pelos Subsistemas | 79 |
| Gráfico 5.8 – Valor Médio Mensal do CMO – Deck 03/2008 | 81 |
| Gráfico 5.9 – Valor Médio Mensal do CMO – Deck 04/2008 | 82 |
| Gráfico 5.10 – Valor Médio Mensal do CMO – Curvas Ajustadas | 87 |
| Gráfico 5.11 – Energia Não Suprida com e sem racionamento | 88 |
| Gráfico 5.12 – Valor Médio Mensal do CMO – Racionamento de 10% | 89 |
| Gráfico 5.13 – Diferença entre o CMO médio original e o CMO com racionamento de 10% | 89 |
| Gráfico 5.14 – Energia Não suprida com e sem racionamento de 10% | 90 |
| Gráfico 5.15 – Valor Médio Mensal do CMO – Racionamento de 20% | 91 |
| Gráfico 5.16 – Diferença entre o CMO médio original e o CMO com racionamento de 20% | 91 |
| Gráfico 5.17 – Energia Não suprida com e sem racionamento de 20% | 92 |
| Gráfico 5.18 – Valor Médio Mensal do CMO – Novo Cenário | 93 |
| Gráfico 5.19 – Energia Não suprida com o cenário novo | 94 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Processo de Planejamento da Operação | 33 |
| Figura 3.2 – Subsistemas do Sistema Interligado Nacional | 43 |