

**FACULDADE DE ECONOMIA E ADMINISTRAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ECONOMIA APLICADA**

EDUARDO DESSUPOIO MOREIRA DIAS

**PREVISÃO DE MÉDIO PRAZO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
BRASIL: ESTIMAÇÃO VIA METODOLOGIA BOX & JENKINS E REGRESSÃO
DINÂMICA**

**JUIZ DE FORA
JANEIRO, 2008**

EDUARDO DESSUPOIO MOREIRA DIAS

**PREVISÃO DE MÉDIO PRAZO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
BRASIL: ESTIMAÇÃO VIA METODOLOGIA BOX & JENKINS E REGRESSÃO
DINÂMICA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada da Faculdade de Economia e Administração da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte das exigências do Mestrado em Economia Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zanini

JUIZ DE FORA
JANEIRO, 2008

EDUARDO DESSUPOIO MOREIRA DIAS

**PREVISÃO DE MÉDIO PRAZO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
BRASIL: ESTIMAÇÃO VIA METODOLOGIA BOX & JENKINS E REGRESSÃO
DINÂMICA**

Dissertação submetida à Faculdade de Economia e Administração da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia Aplicada, com área de concentração em Métodos de Análise Regional.

APROVADA EM: __/__/__.

Prof. Dr. Alexandre Zanini
FEA – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Fernando Salgueiro Perobelli
FEA – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Reinaldo Castro Souza
PUC-RJ – Pontifícia Universidade Católica do
Rio de Janeiro

*Dedico este trabalho,
com todo meu amor,
à minha maravilhosa família.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, sem os quais não existiria e pelo tempo e dedicação destinados à minha educação.

Aos meus irmãos, pelos conselhos e pelo papel fundamental que exerceram na minha formação.

Aos demais familiares, em especial, aos residentes em Juiz de Fora, que sempre me acolheram com muito carinho quando necessitei.

Ao Prof. Dr. Alexandre Zanini, pela paciência e pela ótima orientação que necessitei durante a elaboração desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Fernando Salgueiro Perobelli, pela cobrança e pelas conversas ao longo de todo mestrado.

Aos demais professores e funcionários do programa de mestrado em Economia Aplicada que contribuíram de diversas maneiras para que este objetivo fosse alcançado.

Aos meus colegas de classe, pela companhia e pela disposição em ajudar-me sempre que precisei.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, pelas oportunidades oferecidas durante estes 7 anos de estadia na cidade.

A Paty e família, que me acolheram e acompanharam durante boa parte deste mestrado. Agradeço, em especial, à Tia Neusa, que me orientou a participar do processo de seleção, e ao Tio Sérgio e à Paty, que contribuíram diretamente com esta dissertação.

A todos os meus amigos, grandes responsáveis pela minha felicidade e suporte para todas as horas. Em especial aos amigos Preá, Diogo, Ratinho, Sanderson e Macarrão, pessoas que tive grande sorte em conhecer e que sempre estiveram presentes durante todo esse período.

A Deus, que está ao meu lado em todas as horas.

"Somente de quem vive sem limites é exigida a verdadeira arte de viver"

O Scanner do Tempo - Jostein Gaarder

RESUMO

O objetivo principal desta dissertação é estimar um modelo para a previsão mensal do consumo de energia elétrica no Brasil. Foi utilizada na construção do modelo uma estratégia *bottom-up*, ou seja, inicialmente, com o uso da metodologia Box & Jenkins, estimou-se um modelo simples auto-projetivo que pudesse fornecer informações sobre o comportamento da série em questão. Num segundo momento, estimou-se um modelo de regressão dinâmica, onde se procurou relacionar o consumo de energia elétrica no país com outras possíveis variáveis causais. Nesta dissertação também é feito um estudo sobre a evolução do setor elétrico no Brasil, enfatizando-se as reformas ocorridas em meados dos anos 1990, o que deu origem ao chamado “novíssimo” modelo institucional do setor elétrico brasileiro.

Com a metodologia Box & Jenkins, foi encontrado um modelo SARIMA (0,1,0) x (1,0,0)₁₂ e o modelo de regressão dinâmica indicou que o consumo de energia elétrica no Brasil está relacionado, dentre outros fatores, ao nível de atividade econômica do país. Por fim, foram feitos testes dentro e fora da amostra, com o objetivo de comparar os modelos obtidos, e projeções de consumo para os meses do ano de 2008.

Palavras-chave: setor elétrico, séries temporais, Box & Jenkins, regressão dinâmica

ABSTRACT

The main point of this dissertation is to find a monthly forecasting model to the Brazilian of electric energy consumption. The methodology consists of the construction of a model using a *bottom-up* strategy. In other words, it was first adjusted a Box & Jenkins model; i.e., a simple univariate model that could give information about the behavior of the series. Then, a dynamic regression model was fitted which relates Brazilian electric energy consumption to all possible explanatory variable. In this dissertation, it was also carried out a study of the Brazilian electricity sector evolution, emphasizing the changes occurred in the nineties, that originated the so called “brand new” institutional model of the Brazilian electricity sector.

By mean of the Box & Jenkins method, a SARIMA model $(0,1,0) \times (1,0,0)_{12}$ was found, and the dynamic regression model shows that the consumption of electricity in Brazil is related, among others factors, to the level of the economic activities in the country. Finally, tests in and out of sample were made, with the objective of comparing the obtained models, and the monthly forecasts for the 2008 months were produced by the selected model.

Keywords: electricity sector, time series, Box & Jenkins, dynamic regression

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	13
1.1 - Infra-Estrutura, Energia e Desenvolvimento Econômico	13
1.2 - A Energia Elétrica no Brasil	17
2 - O NOVO MODELO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	21
2.1 - A evolução do setor elétrico brasileiro	21
2.2 - As reformas no setor elétrico do Brasil	29
2.2.1 - <i>A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)</i>	34
2.2.2 - <i>O Operador Nacional do Sistema (ONS)</i>	36
2.3 - O mercado spot e a necessidade de previsão do consumo de energia elétrica	40
3 - METODOLOGIA E BANCO DE DADOS	45
3.1 - Séries temporais	45
3.1.1 - <i>Definição</i>	45
3.1.2 - <i>Processo Estocástico</i>	45
3.1.3 - <i>Domínio do tempo x Domínio da frequência</i>	47
3.2 - Modelos Box & Jenkins	49
3.2.1 - <i>Modelos Auto-Regressivos (AR)</i>	50
3.2.2 - <i>Modelos de Médias Móveis (MA)</i>	50
3.2.3 - <i>Modelos ARMA</i>	51
3.2.4 - <i>Modelos ARIMA</i>	52
3.2.5 - <i>A metodologia Box & Jenkins</i>	52
3.2.6 - <i>Modelos SARIMA</i>	54
3.3 - Regressão Dinâmica	55
3.3.1 - <i>Conceituação</i>	56
3.3.3 - <i>Estrutura dos Modelos de Regressão Dinâmica</i>	57
3.3.4 - <i>Modelos de Regressão Cochrane-Orcutt Generalizados</i>	58
3.3.5 - <i>Construção de modelos de regressão dinâmica</i>	60
3.3.6 - <i>Testes usados nos modelos de regressão dinâmica</i>	62
3.4 - Banco de Dados	66
4 - RESULTADOS	69
4.1 - Resultados da metodologia Box & Jenkins	69
4.2 - Resultados da Metodologia de Regressão Dinâmica	76

4.3 - Comparação dos modelos.....	79
4.4 - Previsões.....	83
4.5 - Análise do racionamento sob a ótica do modelo Box & Jenkins....	88
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
Anexo 1	102
Anexo 2	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação por Fonte na Oferta Mundial de Energia (2004)	16
Figura 2 - Participação por Fonte na Matriz de Oferta de Energia Elétrica do Brasil (2006)	17
Figura 3 – As instituições do novo modelo do setor elétrico.....	34
Figura 4 - Os ambientes de contratação	39
Figura 5 - A energia comercializada no mercado spot	41
Figura 6 - Equilíbrio no mercado spot	41
Figura 7 - Teoria Geral de Sistemas Lineares.....	49
Figura 8- Construção de um modelo de regressão dinâmica	61
Figura 9 - Gráfico do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Brasil -Janeiro de 1992 a Setembro de 2007 (GWh)	70
Figura 10 - Gráfico da Função de Autocorrelação(FAC)	70
Figura 11 - Gráfico da Função de Autocorrelação Parcial(FACP).....	71
Figura 12 - Gráfico da Função de Autocorrelação(FAC) após a 1ª diferença ..	72
Figura 13 - Gráfico da Função de Autocorrelação Parcial(FACP) após a 1ª diferença.....	72
Figura 14 - Gráfico da Função de Autocorrelação (FAC) dos Erros.....	75
Figura 15 - Gráfico da Função de Autocorrelação (FAC) dos Erros do Modelo de Regressão Dinâmica	78
Figura 16 - Gráfico das previsões obtidas (em GWh).....	87
Figura 17 - Comparação entre consumo real e consumo projetado por modelo BJ ajustado com dados anteriores ao racionamento.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - A evolução da capacidade instalada de energia elétrica por categoria de concessionário (1952 – 1965).....	23
Quadro 2 - Participação (%) das fontes de recursos do setor de energia elétrica (1967/1973).....	25
Quadro 3 - Indicadores selecionados para o período 1980-1991.....	28
Quadro 4 - Resultado dos leilões de privatização do setor elétrico.....	30
Quadro 5 - Variáveis Causais.....	66
Quadro 6 - Grupo de Variáveis.....	68
Quadro 7 - Análise fora da amostra	80
Quadro 8 - Desempenho do modelo Box & Jenkins fora da amostra.....	81
Quadro 9 - Desempenho do modelo de Regressão Dinâmica fora da amostra	82
Quadro 10 - Comparação entre os modelos Box & Jenkins e de Regressão Dinâmica	82
Quadro 11 - Box & Jenkins: Previsões em GWh.....	84
Quadro 12 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário pessimista	85
Quadro 13 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário moderado	85
Quadro 14 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário otimista	86
Quadro 15 - Consumo de Energia (em GWh) – valores anuais	87
Quadro 16 - Comparação entre consumo verificado e previsto pelo modelo Box & Jenkins com dados antes do racionamento	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo final energético por setor do Brasil (2005)	15
Tabela 2 - Composição Setorial do Consumo de Energia Elétrica (2005).....	18
Tabela 3 - Resumo das características teóricas da FAC e da FACP dos modelos AR(p),MA(q) e ARMA(p,q)	53

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Infra-Estrutura, Energia e Desenvolvimento Econômico

Várias teorias de desenvolvimento regional afirmam que há uma íntima relação entre desenvolvimento e infra-estrutura. Segundo Myrdal (1957), as externalidades positivas que resultam na expansão econômica são fortalecidas pela melhoria das comunicações, do padrão educacional e dos transportes. Na teoria de polarização de Perroux, *apud in* Schwartzman (1977), somente as ligações entre as indústrias de uma determinada região não são suficientes para alavancarem o crescimento da mesma, pois, além disso, é preciso a prestação de serviços ao interior pelo centro, a demanda de fatores produtivos pelas zonas de influência e uma infra-estrutura altamente desenvolvida. Para North, *apud in* Schwartzman (1975), uma região alcança o estágio final de desenvolvimento quando se especializa em atividades terciárias e produz para exportação. Para tal, os custos de transporte e o setor energético têm importâncias decisivas.

Tal tema tem despertado o interesse de diversos pesquisadores por possuir características bem peculiares que, segundo Benitez (1999) são:

- i) o investimento em infra-estrutura é caracterizado pelos altos custos em períodos irregulares;
- ii) o capital social fixo é um complemento ao capital privado e influencia suas taxas de retorno;

iii) não se pode manter uma trajetória de desenvolvimento equilibrada sem uma adequada provisão de capital público; e

iv) as infra-estruturas são, em sua grande maioria, espacialmente imóveis.

Ainda segundo Benitez, a infra-estrutura favorece a instalação e o desenvolvimento de empresas, propiciando melhores condições de produção, podendo acarretar “efeitos diretos ou indiretos sobre o emprego, sobre a renda, sobre critérios de localização de empresas, sobre o capital, sobre o progresso técnico e outras variáveis econômicas”.(BENITEZ, 1999, p. 282)

Logo, a disponibilidade de infra-estrutura torna-se uma variável que pode explicar o desenvolvimento das regiões sendo, assim, um fator a ser considerado pelos investidores públicos e privados.

Como componente da infra-estrutura, a energia torna-se ingrediente essencial para o desenvolvimento. Conforme Reis (2001):

“Na organização mundial atual, a energia pode ser considerada um bem básico para a integração do ser humano ao desenvolvimento. Isso porque a energia proporciona oportunidades e maior variedade de alternativas tanto para a comunidade como para o indivíduo. Sem uma fonte de energia de custo aceitável e de credibilidade garantida, a economia de uma região não pode se desenvolver plenamente. Também o indivíduo e a comunidade não podem ter acesso adequado a diversos serviços essenciais ao aumento da qualidade de vida como a educação, saneamento e saúde pessoal.” (REIS, 2001, p.28 e 29)

Para ilustrar esta realidade, apresenta-se na Tabela 1 a utilização da energia por parte de todos os setores da economia nacional.

Tabela 1 - Consumo final energético por setor do Brasil (2005)

Setor	TEP ¹ (mil)	%
AGROPECUÁRIO	8.358	4,6
COMERCIAL	5.452	3,0
ENERGÉTICO	17.643	9,7
INDUSTRIAL	73.496	40,2
PÚBLICO	3.451	1,9
RESIDENCIAL	21.827	11,9
TRANSPORTES	52.459	28,7
TOTAL	182.687	100,0

Fonte: Balanço Energético Nacional 2006 - Dados Preliminares

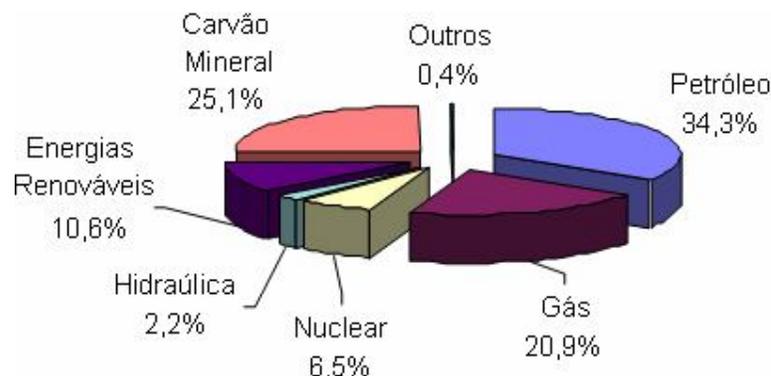
Vê-se que os setores que consomem a maior parte da energia produzida no país são o da indústria (40,2%) e o de transportes (28,7%). Na indústria, a fonte mais utilizada é a eletricidade que corresponde a 20,5% do uso de energia pelo setor e nos transportes, o diesel ocupa posição de destaque com 50,9% de participação (Balanço Energético Nacional, 2005).

No ano de 2004, as principais fontes de energia foram os derivados de petróleo, carvão mineral, gás natural, hidráulica, combustíveis nucleares e outras energias renováveis² como a eólica e a solar. A Figura 1 exhibe a participação de cada fonte na oferta mundial de energia.

¹ TEP: Toneladas Equivalentes de Petróleo.

² As fontes de energia são classificadas em fontes renováveis e não-renováveis. Segundo Reis (2001), são consideradas fontes não-renováveis "aquelas passíveis de se esgotarem por serem utilizadas com velocidade bem maior que os milhares de anos necessários para sua formação." Exemplos desse tipo de fonte são os derivados de petróleo, o carvão mineral, os combustíveis radioativos e o gás natural. Já as fontes renováveis são "aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que sua utilização energética ou cujo manejo pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética". São fontes renováveis as águas dos rios, o sol e o vento. Essas fontes podem ser usadas para a produção de eletricidade através de usinas hidrelétricas, solar-fotovoltaicas e eólicas.

Figura 1 - Participação por Fonte na Oferta Mundial de Energia (2004)



Fonte: Balanço Energético Nacional 2005

Vê-se, pela Figura 1, que a matriz energética mundial depende, atualmente, em cerca de 80% de combustíveis fósseis (carvão, gás e petróleo), cuja combustão contribui para o rápido aumento da concentração de gases-estufa na atmosfera, agravando o efeito-estufa que é o responsável por várias mazelas ambientais como, por exemplo, a elevação da temperatura média da Terra (REIS, 2001).

Ainda segundo Reis (2001), uma alternativa para diminuir a poluição decorrente do setor energético seria a substituição da energia decorrente da queima de combustíveis fósseis pela energia elétrica, pois a energia elétrica é renovável, ao contrário da energia derivada da combustão de biomassa. O mesmo autor também destaca as seguintes características da energia elétrica:

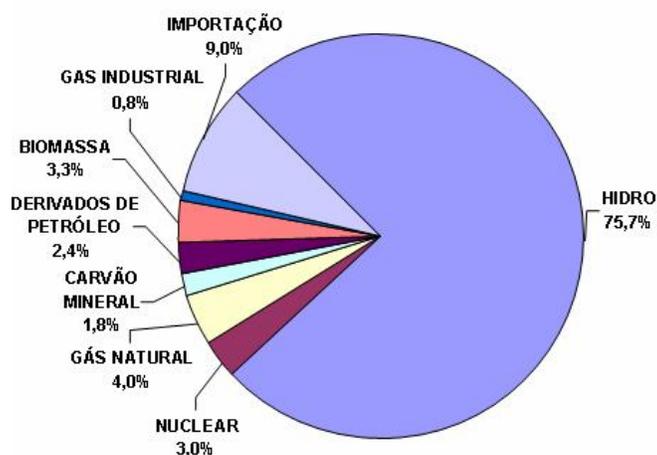
- i) flexibilidade e confiabilidade;
- ii) alternativas variadas para produção ambiental limpa;
- iii) limpeza nos usos finais;
- iv) tecnologia bem dominada e em franco desenvolvimento;
- v) fácil integração às novas tendências e tecnologias de globalização, descentralização, informação, e maior eficiência, e
- vi) aptidão para fornecer os principais serviços de energia desejados na sociedade atual.

Porém, como será visto adiante, a maior parte da energia elétrica gerada no Brasil é proveniente das usinas hidrelétricas. Tal fonte de geração possui algumas desvantagens, podendo-se citar dentre elas o impacto ambiental (flora e fauna); o alto custo de implantação e a perda de energia na transmissão (cerca de 30%).

1.2 - A Energia Elétrica no Brasil

No ano de 2006, o Brasil ofertou 459.631 GWh de energia elétrica, incluindo-se a geração de 41.007 GWh oriunda de autoprodutores. A participação por fonte na matriz de oferta de energia elétrica no Brasil pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Participação por Fonte na Matriz de Oferta de Energia Elétrica do Brasil (2006)



Fonte: Balanço Energético Nacional 2006 - Dados Preliminares

Pela Figura 2, nota-se que a geração hidrelétrica é responsável por 84,7% da geração total de energia elétrica do país (incluindo-se as importações). Tal fato pode ser explicado por alguns fatores como a riqueza em bacias hidrográficas, a existência de rios bem distribuídos no território e a tecnologia de produção nacional. Em 2005, todos os setores da economia do país consumiram um total 32.267 TEP. A Tabela 2 mostra o destino dessa energia por setores.

Tabela 2 - Composição Setorial do Consumo de Energia Elétrica (2005)

Setor	TEP(mil)	%
AGROPECUÁRIO	1.349	4,2
COMERCIAL	4.600	14,3
ENERGÉTICO	1.164	3,6
INDUSTRIAL	15.082	46,7
PÚBLICO	2.815	8,7
RESIDENCIAL	7.155,6	22,2
TRANSPORTES	102	0,3
TOTAL	32.267	100,0

Fonte: Balanço Energético Nacional 2006 - Dados Preliminares

Os setores que mais utilizaram a energia elétrica do país foram os setores industrial (46,7%) e as famílias (22,2%). Estes dados são um indicativo do quanto a eletricidade é um insumo importante para o desenvolvimento do país.

No censo realizado pelo IBGE, em 2000, foi constatado que 97,3% da população urbana têm acesso à energia elétrica do país e apenas 68,2% da população rural gozam de tal privilégio indicando um mercado consumidor em potencial. Com o objetivo de levar energia elétrica para a população do meio rural, o Governo Federal iniciou em 2004 o "Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos". O objetivo deste programa é fazer com que as comunidades atendidas com eletricidade a utilizem como vetor de desenvolvimento social e econômico, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar. O acesso à energia elétrica também facilita o acesso a demais serviços básicos como saúde, educação, abastecimento de água e saneamento.

Logo, um bom planejamento energético é fundamental para dar suporte ao desenvolvimento das regiões e, segundo Audy e Brodbeck (2003), uma das principais metas do planejamento é diminuir o impacto das incertezas relacionadas ao futuro de qualquer organização. Para tal, um gestor de políticas públicas deve ter em mãos estudos que visem prever o consumo por cada tipo de energia a fim de direcionar os investimentos de maneira ótima, minimizando custos e equívocos. A seguir serão apresentados, resumidamente, alguns estudos sobre o tema.

Araújo (2005) fez uso de redes neurais artificiais para modelar a demanda anual de energia elétrica para todas as regiões do estado do Rio Grande do Sul entre os anos de 1999 a 2002. Para tal, utilizou como vetores de entrada da rede a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, o PIB e a população anual de cada um dos 125 municípios da amostra. Concluiu que as demandas dos setores residencial e comercial demonstraram sensibilidade a todas as variáveis, com destaque para as variáveis climáticas umidade do ar e temperatura. A demanda do setor industrial estava vinculada apenas ao PIB.

O trabalho de Mattos e Lima (2005) utilizou um Modelo de Correção de Erros para estimar a demanda residencial anual de energia elétrica para os estado de Minas Gerais entre os anos de 1970 a 2002. Neste mesmo trabalho, os autores também estimaram um modelo econométrico para a demanda residencial de energia elétrica utilizando como variáveis explicativas renda, tarifa de energia e preço dos eletrodomésticos, obtendo uma elasticidade-renda igual a 0,532 e uma elasticidade-preço de -0,258.

Andrade e Lobão (1997) analisaram a evolução do consumo residencial anual de energia elétrica no Brasil durante o período 1963/95 por meio de um modelo econométrico que utilizou como variáveis causais a renda e os preços da energia e dos eletrodomésticos, encontrando como elasticidades renda e preço os valores de 0,211 e -0,064, respectivamente.

O objetivo do trabalho de Schmidt e Lima (2004) era estimar por cointegração as elasticidades preço e renda de longo prazo da demanda de energia elétrica no Brasil das classes residencial, comercial e industrial. Foram obtidas elasticidades-renda superiores a unidade e elasticidades-preço inferiores a unidade, em módulo, além de previsões de consumo para os anos de 2000 a 2005 para as três classes.

É importante atentar para o fato da grande diversidade de trabalhos na linha de elaboração de modelos de previsão de consumo de energia. Entretanto, estes trabalhos diferem entre si por diversos fatores como, por exemplo, a própria metodologia de estimação empregada, o horizonte de previsão, as variáveis consideradas, o tipo de série de energia, dentre outros fatores.

A literatura consultada³ indica, por exemplo, aplicações para previsões de curtíssimo (previsão horária), curto (previsões diárias), médio (previsões mensais) e

³ Ver Hippert *et all* (2005), Farinas *et all* (2004), Rizzo (2001), Souza *et all* (2001), Macrini (2000), Sobral (1999), Lourenço (1998), Lee *et all* (1992), Hsu e Yang (1991).

longo prazo (previsões anuais). Dentro de cada horizonte deste, pode ser encontrada a aplicação das mais diversas técnicas como, por exemplo, técnicas de inteligência artificial (como redes neurais, lógica *fuzzy*, dentre outras) para o curtíssimo e curto prazo; diversos modelos clássicos de séries de tempo (como Box & Jenkins, Amortecimento Exponencial, Estruturais, Regressão, dentre outros) para previsões de médio prazo; e modelos de cenarização para previsões de longo prazo (como técnicas de cenário Delphi). Podem ainda ser encontrados trabalhos com abordagem híbrida, utilizando-se, por exemplo, de modelos clássicos de séries de tempo associados a modelos de inteligência computacional. Por fim, existem ainda modelos estimados por classe, ou seja, específicos para o consumo de energia no setor industrial, comercial, residencial dentre outros.

Elucidados alguns aspectos sobre a importância da energia elétrica no tocante à economia brasileira, ressalta-se que esta dissertação tem por objetivo desenvolver um modelo para a previsão de médio prazo do consumo por energia elétrica no Brasil. A metodologia utilizada será a construção de modelos de previsão através de análise estatística aplicada a séries temporais. Usar-se-á uma estratégia *bottom-up*, partindo-se de um modelo simples autoprojeto (PINDYCK e RUBINFELD, 2004) e chegando a um modelo causal, via regressão dinâmica (GOODRICH, 1989). Por fim, além de se fazer uma comparação entre os modelos, serão projetados alguns cenários com o objetivo de avaliar como as possíveis variáveis econômicas causais presentes no modelo causal afetariam o consumo de energia no país.

Feitas estas considerações, atenta-se que esta dissertação, além desta introdução, é composta por mais três capítulos. O capítulo 2 abordará sobre o setor elétrico brasileiro. Já o capítulo 3 irá descrever as metodologias utilizadas neste estudo (Box & Jenkins e Regressão Dinâmica), bem como o banco de dados utilizado no trabalho. A análise dos dados, os resultados da modelagem e a comparação entre os modelos serão exibidos no capítulo 4. Por fim, ao final do trabalho, serão apresentadas algumas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 - O NOVO MODELO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

2.1 - A evolução do setor elétrico brasileiro

A eletricidade começou a ser produzida no Brasil no final do século 19 tendo como marcos as inaugurações da hidrelétrica de Ribeirão do Inferno⁴, em 1883, e da usina de Marmelos-Zero⁵, em 1889.

Seguindo a diretriz da Constituição de 1891, as concessões para prestação de serviços de eletricidade eram outorgadas pelas prefeituras municipais, especialmente no tocante ao segmento de distribuição, cabendo aos governos estaduais o poder concedente com relação ao aproveitamento e à utilização das quedas d'água. Os primeiros concessionários dos serviços de eletricidade constituíam-se de pequenos produtores e distribuidores, organizados como empresas de âmbito municipal por fazendeiros, empresários e comerciantes locais. Nesse tempo, a distribuição era tida como uma atividade acessória da geração, visto que as usinas eram localizadas nos melhores aproveitamentos de quedas d'água, próximos às áreas urbanas.

Segundo Saes (1986), o desenvolvimento da economia cafeeira no final do século XIX até o fim da década de 1930 foi fundamental ao nascimento e à consolidação da eletricidade no Brasil, visto que esta atividade dava origem a outras

⁴ Localizada na cidade de Diamantina, em Minas Gerais. Destinada ao fornecimento de força-motriz aos serviços de mineração da região.

⁵ Considerada a 1ª hidrelétrica de grande porte da América do Sul e construída no rio Paraibuna, em Juiz de Fora. Foi também a 1ª hidrelétrica de utilidade pública do país.

diversas atividades comerciais e de serviços, à construção de ferrovias e à expansão urbana.

Conjuntamente com esse processo, a eletricidade se ampliava e se enredava e, a partir de 1899, o capital nacional passou a conviver com os investimentos estrangeiros⁶, cada vez mais presentes, o que determinou, na segunda metade da década de 1920, a considerável monopolização e desnacionalização do setor. As principais concessionárias estrangeiras que inicialmente desenvolveram a indústria elétrica brasileira foram: a holding Brazilian Traction, Light and Power C. Ltda., que controlava a produção e distribuição nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo e em diversas pequenas localidades vizinhas; a American Share Foreign Power Company - AMFORP, filial da americana Bond and Share, que controlava a geração e a distribuição de energia elétrica no interior do Estado de São Paulo, em Porto Alegre, Pelotas, Salvador, Recife, Natal, Vitória e interior do Estado do Rio de Janeiro. (FELICIANO, 1988)

Em 10 de julho de 1934, com a publicação do decreto 24.643, se materializa o primeiro projeto voltado para a gestão do setor de águas e energia elétrica nacional: o Código de Águas. Essa nova lei deslocava para a órbita federal o controle do uso dos cursos e quedas d'água e o fornecimento de energia elétrica, além de impor a revisão dos contratos e concessões existentes e estabelecer o processo de fixação de tarifas⁷, a partir do serviço pelo custo. Segundo Lorenzo (2003), houve forte manifestação das empresas que se diziam desestimuladas aos investimentos por estarem descapitalizadas pela aplicação do princípio do custo histórico e, ainda, em razão da contínua alta de preços pela qual passava o país no final da década de 1930.

A redução dos investimentos por parte das empresas concessionárias que alegavam prejuízos com a nova lei e dificuldades de importações de máquinas e equipamentos devido à 2ª Grande Guerra, associada à expansão da demanda por energia proveniente do acelerado processo de urbanização, da difusão do uso de eletrodomésticos e da industrialização, reduziram o ritmo de expansão da

⁶ Nos anos 1920, parte das empresas de capital nacional foi transferida para o controle das empresas estrangeiras. O Grupo Light incorporou as empresas de Ataliba Vale, Fonseca Rodrigues e Ramos de Azevedo, constituídas no interior do estado de São Paulo. A American and Foreign Power Company (Amforp), organizada em 1923 pela Electric Bond and Share e atuante no Brasil a partir de 1927, passou a controlar as empresas de Armando de Salles Oliveira e do Grupo Silva Prado e a CPFL.

⁷ Até o ano de 1933 vigorava a liberdade tarifária que permitia às concessionárias contratar suas tarifas em equivalente ouro, havendo, assim, uma correção monetária embutida. (Lorenzo, 2003).

capacidade instalada, em descompasso com o crescimento do consumo, levando ao racionamento nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. (LANDI, 2006)

A falta de investimentos privados na ampliação da capacidade instalada fez com que o governo federal passasse a atuar mais ativamente no setor. Em 1948, foi criada a Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF⁸. Em 1961, foram criadas as Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás, holding que controlaria CHESF e FURNAS⁹. Os objetivos da Eletrobrás eram as realizações de estudos, projetos, construção e operação de usinas produtoras, linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, marcando o início de um novo ciclo para o setor, ao buscar ampliar a capacidade instalada de energia elétrica no país, com a ativa participação do Estado, conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - A evolução da capacidade instalada de energia elétrica por categoria de concessionário (1952 – 1965)

Anos	Público MW	%	Privado MW	%	Autoprodutor MW	%	Total MW	%
1952	135,6	6,8	1.635,5	82,4	213,7	10,8	1.985,00	100,00
1953	171,1	8,1	1.631,3	77,5	302,5	14,4	2.089,9	100,00
1954	303,2	10,8	2.159,6	77,0	342,7	12,2	2.805,5	100,00
1955	538,5	17,1	2.248,4	71,4	361,6	11,5	3.148,5	100,00
1956	657,1	18,5	2.551,9	71,9	341,0	9,6	3.550,0	100,00
1957	681,0	18,1	2.696,2	71,6	390,2	10,3	3.767,4	100,00
1958	824,5	20,6	2.742,8	68,7	425,8	10,7	3.993,1	100,00
1959	968,5	23,5	2.724,0	66,2	422,7	10,3	4.115,2	100,00
1960	1.098,9	22,9	3.182,2	66,3	519,0	10,8	4.800,1	100,00
1961	1.341,5	25,8	3.242,1	62,3	621,6	11,9	5.205,2	100,00
1962	1.791,9	31,3	3.161,4	55,2	775,5	13,5	5.728,8	100,00
1963	2.305,5	36,3	3.164,4	49,8	885,5	13,9	6.355,1	100,00
1964	2.872,4	42,0	3.084,7	45,1	882,9	12,9	6.840,0	100,00
1965	4.048,0	54,6	2.486,2	33,6	876,8	11,8	7.411,0	100,00

Fonte: LIMA (1984)

⁸A CHESF tinha como objetivo aproveitar o potencial energético da cachoeira de Paulo Afonso. A CHESF teve destacado papel na construção de grandes usinas de geração não apenas na Bahia, mas em todo o Nordeste. (Feliciano, 1988).

⁹ Criada, em 1957, para auxiliar a superação dos problemas de abastecimento da região Sudeste. Esta usina entrou em operação em 1963, no auge da crise de abastecimento (agravada pela ocorrência de um ano de secas, quando a represa de Billings, em São Paulo, chegou a esvaziar quase completamente) foi capaz de evitar o racionamento que vinha causando sérios transtornos à população e as indústrias. (Feliciano, 1988).

A União, no período compreendido entre 1967 e 1973, transferiu aos Estados os serviços de distribuição e subtransmissão de eletricidade. Por outro lado, a geração e a transmissão ficaram a cargo da Eletrobrás, através de suas empresas regionais CHESF, FURNAS, Eletrosul¹⁰ e Eletronorte¹¹.

A partir de então, a perspectiva nacionalista do papel do Estado na atividade de geração ganha importância e, com as empresas estatais produzindo grandes obras, a possibilidade de substituição das empresas estrangeiras por empresas estatais começa a se tornar viável. (PEREIRA, 1975)

O processo de estatização do setor elétrico culminou com a compra, pelo Estado, das empresas Amforp e Light. Em 1979, com a compra da Light, todas as concessionárias do setor eram constituídas por 100% de capital nacional. A partir de 1969, conforme Landi(2006), foi consolidada a estrutura básica da administração federal dos serviços de eletricidade que se manteve até a reestruturação do setor elétrico. Tal estrutura é gerida por dois grandes agentes federais:

a) Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE: assume todas as funções inerentes ao poder concedente, transformando-se, portanto, em órgão normativo e fiscalizador do setor de energia elétrica.

b) Eletrobrás: responsável pela execução das funções de coordenação e planejamento da expansão e operação do sistema elétrico, pela gestão financeira e empresarial e pela articulação do setor com a indústria.

Ainda segundo Landi (2006), basicamente três fatores foram responsáveis pelo financiamento do setor neste período:

a) Instituição da correção monetária: instrumento da política de “realismo tarifário”. A correção monetária dos ativos vinculados ao serviço público, associada à aplicação da taxa de remuneração de no mínimo 10% sobre o capital investido, “elevariam, de um lado, o custo do serviço prestado e, de outro, as margens de autofinanciamento das empresas, reduzindo as pressões de financiamento das empresas sobre o Tesouro Nacional”(Lima(1995), *apud in* Landi (2006), p. 74). Esta medida produziu um impacto imediato nas tarifas de energia¹².

¹⁰ As Centrais elétricas do Sul do Brasil – Eletrosul foi constituída em 23/12/1968 e seu funcionamento autorizado em 1969.

¹¹ A Centrais Elétricas do Norte – Eletronorte, foi criada em 1972.

¹² As tarifas elevam-se entre 1964 e 1967, em média, cerca de 60% acima da inflação do período. (Medeiros, 1993).

b) Aumento das fontes de recurso extra-tarifários: em 1967, foram fixadas alíquotas mais elevadas para o Imposto Único sobre Energia Elétrica; em 1969, foi ampliado o montante arrecadado por empréstimo compulsório; e, em 1971, foi criada a Reserva Global de Reversão - R.G.R. - para permitir a encampação das concessionárias não estatais, findo o prazo da concessão.

c) Linhas de financiamento externo: nesse período, ganha espaço o debate sobre a necessidade de participação de poupanças externas dada a incapacidade da poupança nacional responder ao processo acelerado de crescimento econômico. Sob essa perspectiva que o setor elétrico estreitou os vínculos com o sistema financeiro internacional.

O Quadro 2 apresenta as fontes dos recursos do setor de energia elétrica. É válido destacar o aumento da participação dos recursos externos que chegaram a atingir em 1972, 23% do total das fontes de recursos usados pelo setor.

Quadro 2 - Participação (%) das fontes de recursos do setor de energia elétrica (1967/1973)

Especificação	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
1.Recursos Próprios	65,97	65,83	59,32	57,06	55,60	64,04	65,24
1.1. <i>Autofinanciamento</i>	34,03	33,50	30,17	33,66	33,48	42,80	44,93
Geração Interna	24,64	21,97	18,82	24,94	21,47	24,21	25,39
IUEE	4,97	6,38	6,72	6,58	8,13	9,52	10,54
RGR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,48	10,50
Outros	4,42	5,15	4,63	2,14	3,88	0,59	-1,50
1.2. <i>Aporte de Capital</i>	31,93	32,32	29,15	23,40	22,12	21,22	20,31
Governo	31,38	30,59	25,93	21,44	19,41	16,43	20,02
<i>Federal</i>	8,01	6,85	6,84	6,19	6,83	6,34	6,80
<i>Estadual</i>	23,31	23,62	18,73	14,97	12,54	9,93	13,17
<i>Municipal</i>	0,06	0,12	0,36	0,29	0,04	0,16	0,05
Outros	0,55	1,73	3,22	1,95	2,71	4,79	0,29

Quadro 2 - Participação (%) das fontes de recursos do setor de energia elétrica (1967/1973) (continuação)

Especificação	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
2. Financiamento	34,03	34,17	40,68	42,94	44,40	35,96	34,76
Empréstimo Compuls.							
Em Moeda Nacional	8,01	7,91	8,21	10,38	11,53	8,86	9,37
Em Moeda	12,98	13,90	15,23	15,31	13,42	4,10	6,46
Estrangeira	13,04	12,36	17,24	17,25	19,45	23,00	18,93
<i>Resolução 63(*)</i>	0,00	0,63	2,72	1,08	0,70	0,00	0,10
<i>Outros</i>	13,04	11,73	14,52	16,17	18,75	23,00	18,83
3.Total de Fontes	100,00						

(*) Resolução 63, trata-se de empréstimo indexado à variação cambial, destinado a financiar as necessidades de capital de giro em geral, sendo os recursos normalmente aplicados para suprir eventuais necessidades do caixa da empresa, para reposição de estoques, pagamento de impostos e outras. Essa opção de empréstimo foi amplamente difundida ao longo da década de 70, como forma de captação de recursos externos.

Fonte: Eletrobrás, retirado de Landi(2006)

De acordo com Medeiros(1993), *apud in* Lorenzo (2003), a partir dessas condições “viabiliza-se a acelerada expansão do sistema elétrico nacional, que trouxe importantes efeitos multiplicadores por toda a economia, como a elevação da demanda para as indústrias de bens intermediários, a construção civil e as indústrias de bens de capital. Dessa forma, o setor elétrico contribuiu substancialmente para viabilizar o processo de industrialização acelerada, notado principalmente, no segundo governo militar. Entre 1967 e 1973 a economia pôde crescer 12% ao ano, em média, sustentada pelo vertiginoso crescimento de produção de eletricidade¹³ que, por sua vez, gerou crescentes investimentos (taxas de 16% a.a., em média, no mesmo período)”. (Medeiros, 1993, p.49)

Entretanto, as rápidas transformações ocorridas no cenário mundial na década de 1970, como primeiro e segundo choques do petróleo em 1973 e 1979, respectivamente, e a posterior elevação das taxas de juros no mercado externo no início de 1980, contribuíram para que o processo de crescimento econômico iniciado no Brasil em 1967 se revertesse.

Em resposta à crise mundial, o governo, em 1974, implementou o II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND) que orientou a política econômica brasileira no período de 1975 a 1979. O II PND, partindo de uma avaliação de que a crise e os

¹³ A capacidade instalada de geração de energia elétrica passou de 6.355MW, em 1963, para 15.354MW, em 1973, significando um crescimento de aproximadamente 142% no período.

transtornos da economia mundial eram passageiros, tinha como objetivos possibilitar a produção dos principais insumos básicos, como petróleo, aço e energia elétrica, buscando proporcionar o contínuo crescimento da economia, especialmente através da obtenção de financiamentos no mercado internacional e do apoio das empresas estatais. Projetos como Itaipú, Tucuruí, o Programa Nuclear e a Ferrovia do Aço foram concebidos no escopo desse plano.

O segundo choque do petróleo e a alta dos juros internacionais no final da década de 1970 aceleraram o processo de estrangulamento econômico-financeiro do setor público. Visando administrar a crise financeira interna e externa do setor público e do balanço de pagamentos, diversas esferas administrativas foram subordinadas às exigências de políticas macroeconômicas. No caso específico do setor elétrico, têm-se o esgotamento das transferências de recursos fiscais para o setor, a utilização das tarifas como instrumento de política anti-inflacionária e de promoções às exportações e a subordinação das captações de recursos externos à política de administração da dívida externa (LANDI, 2006). Além disso, para que os níveis de crescimento econômico fossem mantidos, o Estado induziu as empresas estatais, particularmente as do setor elétrico, a um processo de endividamento progressivo que culminaria com a inadimplência e a perda de eficiência setorial.

Assim, a deterioração da saúde financeira de suas empresas foi também uma realidade enfrentada pelo setor elétrico. Ao longo do II PND, o Estado passou a comandar a expansão do sistema de oferta de energia, sendo que este processo foi acompanhado da redução do fluxo de recursos de fontes setoriais (tarifas, impostos, etc.), e do aumento do endividamento externo, facilitado pelas condições de financiamentos internacionais até o início da década de 1980. No entanto, como as dívidas contraídas pelo setor eram na maioria de curto prazo, quando as taxas de juros internacionais se elevaram, as empresas elétricas começaram a encontrar grandes dificuldades para concluir seus projetos, todos de longo prazo, e saldar o que deviam. (Coutinho, 1989, Orselli, 1989, *apud* in Lorenzo, 2003)

Além destes fatores, a instituição do princípio da equalização tarifária para a taxa média de remuneração para o setor como um todo, em 1981, sem levar em conta as características de cada empresa, agravou mais ainda o quadro financeiro das concessionárias, especialmente as estaduais. Isto porque qualquer ganho de produtividade que uma empresa viesse a conseguir era transferido para outro concessionário para que a taxa média fosse mantida. Todos estes problemas

mencionados geraram diversos tipos de pressão sobre o setor elétrico, principalmente no que diz respeito à elevação dos custos operacionais e também nos planos de obras das empresas elétricas.(LORENZO, 2003)

O setor elétrico brasileiro inicia a década de 1990 em crise. Pelo lado da oferta, um conjunto de empreiteiras, firmas de engenharia, empresas de consultoria e fabricantes de equipamentos passaram a ter grande interesse na expansão acelerada do parque produtor de energia por dependerem das obras estatais para as suas ações empresariais. Pelo lado da demanda, a abundância de energia elétrica a baixos preços incentivou a instalação de grandes consumidores, que passaram a se organizar e a absorver altas quantidades de energia. Na contramão, o Estado não tinha condições de investir no setor já que suas empresas estavam endividadas, não podendo dar continuidade aos planos de extensão.

O Quadro 3 mostra uma queda de 51% no total de investimentos realizados no setor de 1991 em relação a 1980. A capacidade instalada apresentou um crescimento anual médio de 4,5% , impulsionada pela entrada em operação da Usina de Itaipu em 1985. No mesmo período, o consumo aumentou em média 5,88%.

Quadro 3 - Indicadores selecionados para o período 1980-1991

Anos	PIB(%)	Capacidade Instalada		Investimentos		Consumo Total	
		MW	Variação anual (%)	US\$ milhões	Variação anual (%)	GWh	Variação anual (%)
1980	9,20	33.472	-	8.155,00	-	121.837	-
1981	-4,25	37.269	11,34	8.624,00	5,75	125.141	2,71
1982	0,83	39.346	5,57	9.161,00	6,23	132.202	5,64
1983	-2,93	40.366	2,59	7.045,00	-23,10	142.620	7,88
1984	5,40	41.096	1,81	6.312,00	-10,40	158.517	11,15
1985	7,85	44.107	7,33	7.037,00	11,49	172.712	8,95
1986	7,49	44.953	1,92	6.698,90	-4,80	186.414	7,93
1987	3,53	47.561	5,80	9.426,10	40,71	192.224	3,12
1988	-0,06	49.575	4,23	7.793,00	-17,33	204.248	6,26
1989	3,16	52.125	5,14	6.402,00	-17,85	212.324	3,95
1990	-4,35	53.050	1,77	5.515,00	-13,86	216.535	1,98
1991	1,03	54.141	2,06	3.978,90	-27,85	227.660	5,13

Fonte: LANDI (2006)

Tais resultados, tendo em vista os baixos níveis de atividade econômica registrados no período, expressos em termos de PIB, parecem não ter comprometido o atendimento da demanda. A dúvida que persistia, naquele momento, referia-se ao comportamento do setor em resposta a uma retomada do crescimento econômico sinalizada para a década de 1990.

O governo tentou por duas vezes reverter esse quadro através do Plano de Recuperação Setorial – PRS , lançado em 1985, e da criação, em 1987, do REVISE – Revisão Institucional do Setor Elétrico¹⁴, mas não obteve sucesso.

Nesse cenário era imprescindível que o setor elétrico brasileiro se reorganizasse, em especial, no que se refere ao papel das instituições, à revisão da matriz energética, à política tarifária e de financiamento e à eventual participação dos agentes privados.

2.2 - As reformas no setor elétrico do Brasil

O setor elétrico brasileiro inseriu-se na década de 1990 no contexto do Programa Nacional de Desestatização – PND que tinha por objetivo privatizar setores chaves da economia como o siderúrgico, petroquímico e de telecomunicações para alinhar a política econômica nacional à orientação liberal. Esta pregava o saneamento financeiro e o reordenamento estratégico do Estado, onde este deixaria o papel de empreendedor, que até o momento impulsionara o processo de desenvolvimento da nação, e passaria a atuar como fiscalizador e regulador da economia. (LANDI, 2006)

Segundo Bahiense (2001), a privatização do setor elétrico ocorreu paralelamente às reformas deste e de forma gradual, onde o governo priorizou a venda das empresas de distribuição por entender que dificilmente conseguiria atrair interessados para os ativos de geração caso não houvesse a perspectiva de um mercado atacadista privado de energia, no qual estariam eliminados os riscos de calote nas transações de venda de energia.

¹⁴ Landi (2006, p.94).

O processo de privatização teve início em 1995 com a venda da Escelsa. Além de privatizar as distribuidoras federais o governo estimulou a venda das distribuidoras estaduais criando o Programa de Estimulo às Privatizações Estaduais (PEPE), segundo o qual o BNDES antecipava recursos financeiros aos governos estaduais por conta da receita que seria obtida nos leilões de venda de respectivas empresas (BURATINI, 2004). Com essas medidas, em fevereiro de 2000, cerca de 65% do mercado nacional já havia se transferido para a iniciativa privada, conforme indica o quadro 4.

Quadro 4 - Resultado dos leilões de privatização do setor elétrico (1995-2000)

Empresa	Data da venda	Valor da Licitação (US\$ milhões)	Ágio (%)	% do capital total	Grupo que adquiriu controle
Distribuição					
Escelsa	12/07/95	385	11,78	50,00	Iven e GTD (Brasil)
Light	21/05/96	2.217	-	50,44	EDF (França), AES (EUA) e Houston (EUA)
Cerj	20/11/96	588	30,27	70,26	Chilectra/Enersis (Chile) e EDP (Portugal)
Coelba	01/07/96	1.602	77,38	62,54	Iberdrola (Espanha) e Previ (Brasil)
CEEE(COeste)	01/10/97	1.372	93,55	90,91	AES (EUA)
CEEE(Norte-NE)	21/10/97	1.487	82,62	90,75	VBC (Brasil), CEA (EUA) e Previ (Brasil)
CPFL	01/11/97	2.741	70,15	41,06	VBC (Brasil) e Bonnaire (Brasil)
Enersul	19/11/97	568	83,79	48,67	Escelsa
Cemat	27/11/97	356	21,09	86,91	Grupo Rede/Inepar (Brasil)
Energipe	01/12/97	525	96,05	86,42	Cataguases-Leopoldina (Brasil) e CMS (EUA)
Cosern	01/12/97	616	73,90	85,75	Iberdrola (Espanha) e Previ (Brasil)
Coelce	02/04/98	868	27,20	53,11	Enersis (Chile) e Endesa (Espanha)
Eletropaulo Metropolitana	15/04/98	1.776	-	29,80	EDF (França), AES (EUA) e Houston (EUA)
Celpa	01/07/98	388	-	51,26	Grupo Rede/Inepar (Brasil)

**Quadro 4 - Resultado dos leilões de privatização do setor elétrico
(1995-2000) (continuação)**

Empresa	Data da venda	Valor da Licitação (US\$ milhões)	Ágio (%)	% do capital total	Grupo que adquiriu controle
Elektro	16/07/98	1.273	98,90	46,62	Enron Brasil Power Holding
Eletropaulo Bandeirante	17/09/98	860	-	29,80	CPFL/EDP
Celb-Cia. Em. BORB.	30/11/99	45	-	75,26	Energipe
Celpe	17/02/00	1.004	-	99,56	ADL Energy (Iberdrola), Previ e BB – Banco de Investimento
Cemar	15/06/00	289	-	86,25	Pennsylvania Power & Light
SAELPA	30/11/00	185	-	74,29	Energipe
Geração					
Cachoeira Dourada	05/06/96	663	43,49	78,88	Endesa/Enersis
Gerasul	15/09/96	801	-	42,10	Tractebel (Bélgica)
Cesp Paranapanema	28/07/99	682	90,2	38,66	Duke Energia do Sudeste Ltda
Cesp Tietê	27/10/99	472	29,3	38,66	AES Gerasul
Outras Operações	-	3.284	-	-	-
Empresas Federais	-	3.403	-	-	-
Empresas Estaduais	-	18.358	-	-	-

Fonte: LANDI (2006)

Quanto ao novo modelo do setor elétrico, havia um consenso de que este, além de enfatizar o papel da iniciativa privada, deveria enfatizar os seguintes aspectos: a necessidade de criação de um mercado competitivo no atacado, importância do livre acesso à transmissão, fortalecimento do produtor independente, desverticalização do setor e liberalização progressiva de consumidores.

O marco do início da reestruturação do setor elétrico foi a promulgação, em 1993, da Lei 8.631 que, como aponta Pires e Piccini (1999), introduziu três inovações importantes:

- a) eliminação do regime de equalização tarifária;

b) promoção de um grande encontro de contas entre credoras e devedoras do setor;

c) obrigatoriedade de se estabelecer contratos de suprimentos de energia entre as geradoras e as distribuidoras.

Além disso, em dezembro de 1993, foi criado¹⁵ o Sistema Nacional de Transmissão de Energia Elétrica – SINTREL, composto pelos sistemas de transmissão de propriedade das empresas controladas pela Eletrobrás, que integram a malha básica dos sistemas interligados das regiões Sul/Sudeste/Centro Oeste e Norte/Nordeste. O governo federal, com esta medida, passa a distinguir as áreas de transmissão do restante do sistema elétrico. E em abril de 1994, o governo define os critérios para a formação de consórcio entre concessionárias e auto-produtores assegurando o livre acesso ao SINTREL, possibilitando a competição na geração e definindo as condições de comercialização.

Em 1995, foi aprovada a Lei de Concessões¹⁶ que dispõe sobre o regime concorrencial na licitação de concessões para projetos de geração e transmissão de energia elétrica. Esta lei também cria a figura jurídica do produtor independente de energia elétrica¹⁷, assegurando o acesso deste às redes de transmissão e de distribuição existentes, e estabelece a possibilidade de os consumidores livres¹⁸ terem direito à contratação de energia, inicialmente, de produtores independentes e, após cinco anos, de qualquer concessionária ou produtor de energia.

Durante o final de 1996 a junho de 1997, o Ministério de Minas e Energia, em conjunto com um consórcio consultor liderado pela empresa Coopers & Lybrand, elaborou um estudo que estabeleceu as linhas gerais do modelo de mercado a ser implantado no Brasil. O trabalho denominado “Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro” sugeria, basicamente, implementar a competição onde possível (geração e comercialização) e a regulamentação econômica dos monopólios naturais (transmissão e distribuição). Para tal, foram criadas novas estruturas para garantir o bom funcionamento do mercado como a ANEEL (Agência Nacional de

¹⁵ Pelo decreto nº 1.009/93.

¹⁶ Lei 8.987/95 e regulamentada, no caso do setor elétrico, pela Lei 9.074/95.

¹⁷ No que diz respeito a geração de hidreletricidade, é objeto de autorização o aproveitamento de potência superior a 1.000 kW e menor ou igual a 30.000 kW. Potências superiores a 30.000kW serão objeto de licitação para obtenção de concessão de uso de bem público. Implantação de usina termelétrica de potência superior a 5.000 kW precisaria apenas de autorização.

¹⁸ Segundo a Lei de Concessões, os consumidores livres são todos aqueles quem possuem carga igual ou superior a 10MW e que são atendidos em tensão igual ou superior a 69KV.

Energia Elétrica), o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), o MAE (Mercado Atacadista de Energia) e o CNPE (Conselho Nacional de Política Energética).

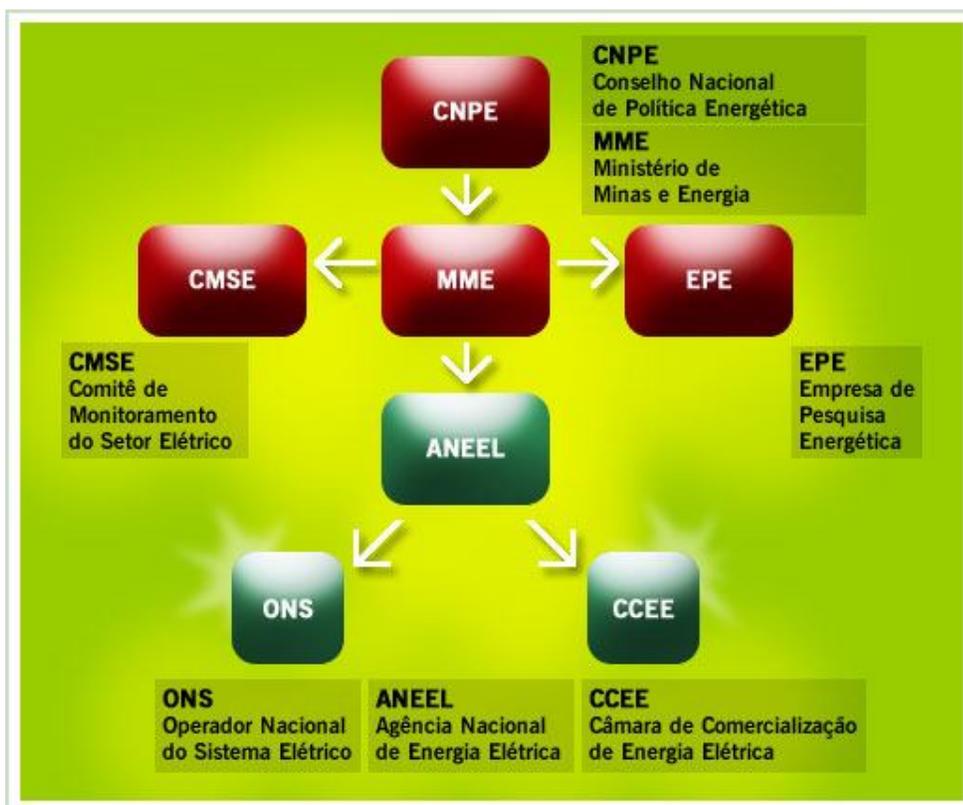
Entretanto, o crescimento da demanda em confronto com a falta de regulamentação adequada, o que não permitia um ambiente satisfatório para novos investimentos, e a estiagem vivenciada entre o fim de 2000 e início de 2001, que afetou diretamente a produção, deram início à crise energética que levou o governo a anunciar o racionamento de energia em abril de 2001. Esse acontecimento gerou uma série de questionamentos sobre os rumos que o setor elétrico estava trilhando fazendo com que o governo, em 2003, iniciasse a elaboração de um novo modelo para o setor, também conhecido como “novíssimo” modelo institucional do setor elétrico brasileiro.

Em vigor desde 2004, o “novíssimo” modelo proposto pretende atingir três objetivos principais¹⁹: garantir a oferta necessária de energia, promover a modicidade tarifária e a universalização do acesso à eletricidade. Em termos institucionais, o novo modelo definiu a criação de uma entidade responsável pelo planejamento do setor elétrico a longo prazo (a Empresa de Pesquisa Energética – EPE), uma instituição com a função de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica (o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE) e uma instituição para dar continuidade às atividades do MAE (Mercado Atacadista de Energia), relativas à comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado (a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE).

A Figura 3 ilustra as principais instituições do atual modelo setorial:

¹⁹ Para maiores informações, consultar Landi (2006).

Figura 3 - As instituições do novo modelo do setor elétrico



Fonte: CCEE (2007)

A seguir serão descritos mais detalhadamente as principais instituições que compõem o setor elétrico nacional atualmente.

2.2.1 - A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)

O novo formato institucional do setor de energia elétrica brasileiro foi estabelecido, em dezembro de 1996, com a promulgação da lei 9.427/96 que reordenou as áreas do negócio em produção de energia (geração), transporte nas tensões mais altas (transmissão), transporte com o objetivo específico de atendimento a consumidores finais (distribuição), e vendas no varejo, com a função de medir e faturar os consumidores finais (comercialização) que passaram a ter tratamento legal e regulatório diferenciados. Além disso, essa lei instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que sucedeu o antigo DNAEE.

Constituída sob a forma de autarquia especial vinculada ao Ministério das Minas e Energia, a ANEEL assume as novas atribuições relativas a concessões, licitações e fiscalização dos serviços, devendo “proporcionar as condições favoráveis para que o desenvolvimento do mercado de energia elétrica ocorra com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade.”²⁰

Sua natureza jurídica de autarquia especial permite a ANEEL usufruir de uma relativa independência nos seguintes aspectos (PIRES, 2000): a) autonomia decisória e financeira, o que lhe confere agilidade nas suas iniciativas; b) autonomia dos seus gestores, que após a investidura nos seus mandatos só podem ser afastados com base em critérios rígidos de demissão;²¹ c) elegação de competência normativa para regulamentar questões técnicas atinentes ao setor; e d) motivação técnica e não política de suas decisões, conferindo à atuação da agência neutralidade na solução dos conflitos e na adoção de medidas.

A independência do agente regulador possibilita que se atinjam dois objetivos importantes (PIRES, 1999): a) reduzir a incerteza dos investidores em negociar com o poder concedente, devido às dúvidas em relação aos interesses do Estado, realçando a importância de marcos regulatórios estáveis, com regras e atribuições bem definidas; e b) formular os pressupostos básicos para o efetivo cumprimento da missão regulatória na promoção da eficiência econômica e do bem-estar social.

Pode-se destacar, dentre as principais funções da ANEEL, as seguintes (BAHIENSE, 2001):

- i. Promover licitações para contratar concessionárias de serviço público de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica;
- ii. Celebrar e gerir os contratos de concessões ou de permissão de serviços públicos de energia elétrica;
- iii. Fiscalizar as concessões para a prestação de serviço público de energia elétrica;
- iv. Fiscalizar, diretamente ou mediante convênios²² com órgãos estaduais, as concessões e a prestação de serviço de energia elétrica;

²⁰ Lei n.º 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e regulamentada pelo Decreto n.º 2.335, de 6 de outubro do ano seguinte.

²¹ A demissão somente poderá ocorrer no caso de cometimento de falta grave, apurada em processo administrativo ou judicial, em que sejam assegurados a ampla defesa e o contraditório.

²² Conforme Art. 20 da Lei de criação da ANEEL, as atividades poderão ser descentralizadas mediante convênios de cooperação, desde que o Estado interessado disponha de serviços técnico e administrativos competentes, devidamente organizados e aparelhados para o exercício de suas

- v. Zelar pelo equilíbrio econômico financeiro das concessionárias e pela qualidade dos serviços prestados;
- vi. Definir a estrutura tarifária e autorizar os níveis propostos pelas empresas;
- vii. Assegurar a estabilidade da função regulatória; e
- viii. Solucionar no âmbito administrativo, as divergências entre concessionárias, permissionárias, autorizadas, produtores independentes e autoprodutores, bem como entre esses agentes e seus consumidores.

Nota-se, portanto, que a ANEEL possui um papel de destaque no novo modelo que é o de intermediador independente entre Governo, consumidores e as empresas reguladas.

2.2.2 - O Operador Nacional do Sistema (ONS)

As características do parque gerador brasileiro, onde a geração é fundamentalmente hidráulica (84,7%), fazem com que a geração de energia elétrica exija uma coordenação da operação (despacho de energia) das usinas hidrelétricas a fim de se otimizar a utilização das centrais geradoras e da rede básica de transmissão.

Um exemplo é o fato dos reservatórios de água das usinas serem utilizados de forma planejada para que se possa tirar proveito da diversidade pluviométrica nas diferentes bacias existentes no país. Assim, a possibilidade de interligação de bacias localizadas em diferentes regiões geográficas assegura ao sistema brasileiro um importante ganho energético, pois, dessa forma, é possível tirar proveito das diferentes sazonalidades e dos níveis pluviométricos. (PIRES, 2000).

Adicionalmente, no caso brasileiro, a coordenação do despacho é reforçada pelo fato de determinados aproveitamentos hidrelétricos serem efetuados “em cascata” e, muitas vezes, por diferentes proprietários, tornando-os interdependentes e adicionando complexidade à previsão das tradicionais variáveis referentes ao comportamento da demanda e à capacidade instalada de geração. (PIRES, 2000)

respectivas atividades. Os órgãos estaduais serão, ainda, avaliados e acompanhados pela agência nacional.

Para coordenar e controlar a operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), foi criado, em agosto de 1998, o Operador Nacional do Sistema (ONS). O ONS é subordinado à ANEEL e possui como principais atribuições:

i) o planejamento e a programação da operação e o despacho centralizado da geração, com vistas à otimização dos sistemas eletroenergéticos interligados;

ii) a supervisão e a coordenação dos centros de operação de sistemas elétricos;

iii) a supervisão e o controle da operação dos sistemas eletroenergéticos nacionais interligados e das interligações internacionais;

iv) a contratação e a administração de serviços de transmissão de energia elétrica e respectivas condições de acesso, bem como dos serviços ancilares;

v) propor à ANEEL as ampliações das instalações da rede básica de transmissão, bem como os reforços dos sistemas existentes, a serem licitados ou autorizados;

vi) a definição de regras para a operação das instalações de transmissão da rede básica dos sistemas elétricos interligados, a serem aprovadas pela ANEEL.

O ONS, então, exerce suas atribuições institucionais de supervisão definindo o quantitativo de energia elétrica que cada uma das empresas de geração deve ou pode produzir em determinado momento, o montante a ser transportado pelas linhas de transmissão e o quantitativo a ser entregue às distribuidoras.

Diante desse quadro, o ONS, considerando o excesso e as carências do potencial de geração de energia elétrica no território nacional, intervém no sistema de energia elétrica, o qual se encontra interligado pela rede de transmissão, determinando, estabelecendo e equacionando as quotas de trabalho de cada um de seus segmentos.

2.2.3 - A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)

Criada, em 2004²³, para suceder o MAE, a Câmara de Comercialização de Energia de Elétrica (CCEE) é uma associação civil subordinada a ANEEL e integrada pelos agentes das categorias de geração, de distribuição e de comercialização. A CCEE tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica entre os agentes do Sistema Interligado Nacional, além de efetuar a contabilização e a liquidação financeira das operações realizadas no mercado de curto prazo.

Foram criados dois ambientes de contratação:

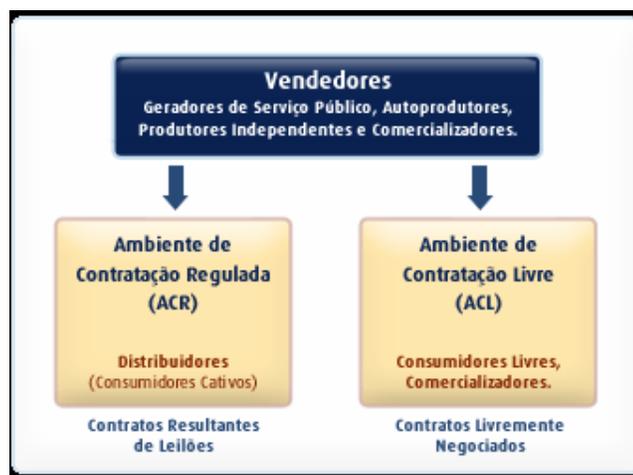
a) Ambiente de Contratação Regulada (ACR) – Nesse ambiente todos os geradores, incluindo produtores independentes, venderão energia para todas as distribuidoras através de leilões. Os geradores vencedores dos leilões deverão firmar contratos bilaterais com todas as distribuidoras em proporção às respectivas declarações de necessidade. Os leilões de energia já existentes (energia velha) são separados dos leilões de energia proveniente de novos empreendimentos (energia nova).

b) Ambiente de Contratação Livre (ACL) - participam desse ambiente agentes de geração, comercializadores, importadores e exportadores de energia elétrica e consumidores livres. Nesse ambiente há liberdade para se estabelecer volumes de compra e venda de energia e seus respectivos preços, sendo as transações pactuadas através de contratos bilaterais.

A Figura 4 a seguir busca caracterizar a comercialização de energia envolvendo os dois ambientes de contratação.

²³ Pelo Decreto nº 5.177, de 12 de agosto de 2004.

Figura 4 - Os ambientes de contratação



Fonte: CCEE (2007)

No ambiente de contratação regulada, onde ocorrem os leilões de energia, as concessionárias e permissionárias apresentam seus preços e os vencedores do leilão são definidos através do critério da menor tarifa, ou seja, os vencedores serão aqueles que ofertarem energia elétrica pelo menor preço por Mega-Watt hora para atendimento da demanda prevista pelas distribuidoras. Os Contratos de Comercialização de Energia Elétrica em Ambiente Regulado serão, então, celebrados entre os vencedores e as Distribuidoras que declararam necessidade de compra para o início de suprimento da energia contratada no leilão.

O cronograma para a realização dos leilões, considerando “A” como o ano previsto para o início do suprimento de energia elétrica adquirida pelos agentes de distribuição, é o seguinte:

- no quinto ano anterior ao ano “A” (chamado ano “A” – 5), é realizado o leilão para compra de energia de novos empreendimentos de geração;
- no terceiro ano anterior ao ano “A” (chamado ano “A” – 3), é realizado o leilão para aquisição de energia de novos empreendimentos de geração;
- no ano anterior ao ano “A” (chamado ano “A” – 1), é realizado o leilão para aquisição de energia de empreendimentos de geração existentes.

Além disso, poderão ser promovidos Leilões de Ajuste tendo por objetivo complementar a carga de energia necessária ao atendimento do mercado consumidor das concessionárias de distribuição, até o limite de 1% dessa carga.

Na seção seguinte, descrever-se-á com mais detalhes a comercialização de energia enfatizando o mercado de curto-prazo (*spot*) e a necessidade da previsão de curto prazo do consumo de energia elétrica.

2.3 - O mercado *spot* e a necessidade de previsão do consumo de energia elétrica

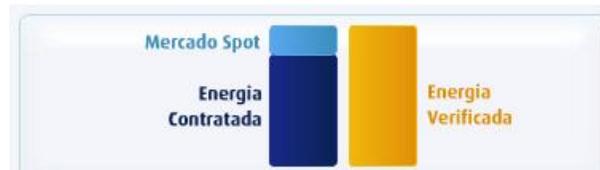
Geralmente, um mercado *spot* é caracterizado pela entrega imediata do produto. Porém, os mercados *spot* de energia não atendem inteiramente a esta descrição, uma vez que, nos mercados diários (*day ahead*), os preços para cada período ou patamar são calculados no dia anterior ao que se dá a entrega do produto.(BORN, 1998). Como será visto a seguir, no Brasil o cálculo do preço semanal baseia-se no despacho “*ex-ante*”, ou seja, é apurado com base em informações previstas, anteriores à operação real do sistema, considerando-se os valores de disponibilidades declaradas de geração e o consumo previsto de cada submercado.

Na verdade, o consórcio liderado pela Coopers & Lybrand, que deu suporte ao projeto de reestruturação do setor elétrico brasileiro, não recomendou o estabelecimento imediato de uma bolsa de energia, com preços e quantidades livremente negociados no mercado *spot*. Por causa da pouca presença termelétrica nos sistemas interligados brasileiros e pelos complexos vínculos hidráulicos existentes entre usinas de diferentes proprietários, a comercialização no curto prazo é feita num regime denominado *tight pool*, onde o despacho é definido centralizadamente com base em ferramentas de otimização. (BORN, 1998)

Primeiramente, a CCEE contabiliza as diferenças entre o que foi produzido ou consumido e o que foi contratado conforme mostra a Figura 5. As diferenças positivas ou negativas de energia são liquidadas no Mercado de Curto Prazo e valoradas ao PLD (Preço de Liquidação das Diferenças), determinado semanalmente para cada patamar de carga²⁴ e para cada submercado²⁵.

²⁴ Patamar de carga é a classificação das horas do mês, de acordo com o perfil de carga definido pelo ONS, podendo ser: leve (horários de baixo consumo), médio (horários de consumo médio) e pesado (horários em que se verificam picos de consumo). De segunda a sábado, com o horário de

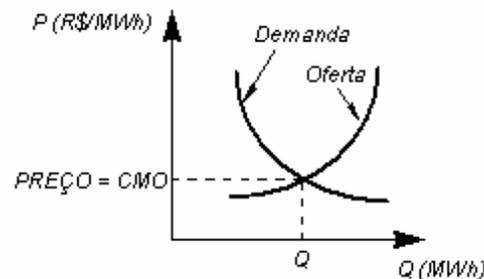
Figura 5 - A energia comercializada no mercado spot



Fonte: CCEE(2007)

A teoria microeconômica indica que, se um mercado opera em concorrência perfeita, os preços tendem aos custos marginais de curto prazo ou custos marginais de operação(CMO). (VARIAN, 1997)

Figura 6 - Equilíbrio no mercado spot



Fonte: Varian(1997)

Para encontrar os CMOs para cada patamar de carga e para cada submercado, a CCEE utiliza um modelo matemático que considera as condições hidrológicas, a demanda de energia, os preços de combustível, o custo de déficit, a entrada de novos projetos e a disponibilidade de equipamentos de geração e transmissão para obter o despacho (geração) ótimo para o período em estudo, definindo a geração hidráulica e a geração térmica para cada submercado.

Em suma, o *tight pool* é caracterizado pelos seguintes aspectos (Coopers & Lybrand, 1997):

a) Os geradores hidrelétricos submetem os dados técnicos de suas usinas, incluindo níveis de armazenamento, vazões afluentes e disponibilidade das turbinas;

verão vigorando, o período de 0h às 6h é classificado como patamar leve, de 19h às 21h como pesado, sendo as demais horas do dia classificadas como patamar médio. Para domingos e feriados, o período entre 18h e 22h possui classificação de patamar médio, sendo os demais horários classificados como patamar leve.

²⁵ Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte.

b) Os geradores termelétricos também submetem dados técnicos de suas usinas, além dos preços de combustível e seu consumo por unidade de energia produzida;

c) Os participantes do mercado pelo lado da demanda (comercializadores e grandes consumidores) submetem seus dados de carga;

d) Os preços da energia no mercado spot são então obtidos com base nos custos marginais de curto prazo, calculados por um modelo de otimização;

e) A metodologia de obtenção dos preços spot é definida no âmbito de um acordo celebrado entre os participantes da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE);

f) O despacho da geração é controlado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

Vale-se ressaltar que o preço do mercado *spot* é usado para liquidar os volumes de energia que não foram cobertos nos ambientes de contratação. Porém, todos os fluxos de energia, incluindo os volumes contratados, devem ser levados em conta no estabelecimento do preço *spot*.

Um problema que está fortemente relacionado com o pré-despacho, é a previsão de carga à curto prazo, uma vez que é em função do mercado que se determina a política de operação de cada unidade. A precisão na previsão de carga é importante, pois grandes desvios em relação à carga prevista podem levar o sistema a situações críticas. Um requerimento importante deste tipo de previsão é que o erro esteja abaixo da tolerância prevista nestes contratos que é, geralmente, de cerca de 5%. (Ruas *et al*, 2007)

De uma maneira geral, as previsões do consumo de energia elétrica têm impacto direto e/ou indireto sobre as seguintes decisões (ELETROBRÁS, 2003):

- Planejamento da Operação dos Sistemas;
- Programas de Investimento das Empresas;
- Contratos de Compra e Venda de Energia entre Empresas;
- Preço da Energia no mercado atacadista;
- Programa de Licitação de obras do agente regulador.

De acordo com o horizonte de previsão podem se ter várias denominações para a previsão de carga, tais como: previsão de curtíssimo prazo (de poucos

minutos a uma hora à frente), curto prazo (referente às próximas horas a uma semana à frente), médio prazo (vários meses) e longo prazo (superiores a um ano). Cada um dos tipos de previsão tem um tipo de finalidade.

A importância das previsões de curtíssimo e curto prazo é mais técnica. A previsão de curtíssimo prazo pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de controle. Além disso, a previsão de curto prazo tem um impacto importante na operação econômica das concessionárias, já que muitas das decisões tomadas pelos despachantes são baseadas nestas previsões. Dentre as decisões tomadas influenciadas pela previsão a curto prazo, pode-se citar como exemplos, a programação da geração, a avaliação da segurança do sistema e o planejamento para transações de energia.

A previsão de médio prazo, que pode variar entre semanas e meses é, em geral, importante para que se possa definir e organizar as manutenções que precisam ser efetuadas no sistema de geração e distribuição de energia. E para o governo, “o acompanhamento mensal do mercado de energia elétrica brasileiro é ferramenta essencial para o entendimento da dinâmica do processo do consumo de energia nas diversas classes consumidoras e regiões do País, fornecendo subsídios valiosos para os estudos do planejamento da operação e da expansão do sistema.” (EPE, 2007)

A previsão de longo prazo também é importante tanto para o governo quanto para os agentes do setor. O governo, por exemplo, realiza anualmente por meio da Empresa de Pesquisa Energética – EPE um estudo denominado Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE, que tem como objetivo “(na infra-estrutura de oferta de energia, necessárias para se atender ao crescimento dos requisitos do mercado, segundo critérios de garantia de suprimento pré-estabelecidos, de forma ambientalmente sustentável e minimizando os custos totais esperados de investimento, inclusive socioambientais, e de operação.”(ELETROBRÁS, 2006)

Com a reforma do setor elétrico as distribuidoras ficaram obrigadas a informar suas projeções de demanda a longo prazo, podendo ser penalizadas em caso de previsões subestimadas em 4% ou sobrestimadas em 3%. Percebe-se que esse limite não tem uma grande amplitude, especialmente ao se pensar em previsões de longo prazo, na qual as distribuidoras têm que informar sua demanda para dez anos à frente. Por isso, as distribuidoras de energia estão sujeitas a grandes riscos derivados da imprecisão das previsões de energia para o médio e longo prazo.

Portanto, pode-se concluir que a previsão nos mais diversos horizontes é de fundamental importância para todos os agentes do setor elétrico, o que justifica o objetivo e a metodologia proposta nessa dissertação. Neste sentido, este trabalho concentra-se em desenvolver um modelo de previsão mensal do consumo de energia elétrica no Brasil. O banco de dados utilizado, bem como as metodologias empregadas serão vistas no próximo capítulo.

3 - METODOLOGIA E BANCO DE DADOS

3.1 - Séries temporais

3.1.1 - Definição

Uma série temporal é um conjunto de observações de uma determinada variável, ordenadas segundo o tempo e geralmente em intervalos eqüidistantes. Supondo-se que Z_t representa o valor da variável aleatória Z no instante t , a série temporal será a seqüência Z_1, Z_2, \dots, Z_n , onde Z_n é a última observação e n é o tamanho da amostra. Para as séries temporais discretas as periodizações de coleta de dados mais frequentemente usadas são os dados diários, mensais e anuais (SOUZA & CAMARGO,1996).

3.1.2 - Processo Estocástico

Um processo estocástico é um modelo de série temporal que oferece uma descrição da natureza aleatória do processo que gerou a amostra de observações

em estudo. Ou seja, admite-se que a amostra obtida foi retirada de uma função de distribuição de probabilidade Z e que cada Z_t é uma variável aleatória.

Pela definição de série temporal feita no item anterior, conclui-se que uma série temporal pode ser interpretada como uma parte da trajetória ou de uma realização parcial de um processo estocástico.

Nesse sentido vale ressaltar que nem todo evento observado no tempo consiste numa série temporal. Por exemplo, não existe uma distribuição de probabilidade que nos permita estimar o resultado futuro de uma loteria, mesmo que se conheçam os resultados passados e presente da mesma.

De acordo com Souza e Camargo (1996), um processo estocástico está estatisticamente determinado quando se conhece suas funções de distribuição até a n -ésima ordem. Na prática, porém, não se pode conhecer todas as funções de distribuição até a n -ésima ordem tendo-se em vista uma única observação do processo estocástico, a partir do qual deseja-se inferir características do mecanismo gerador da série. Porém, normalmente é possível construir um modelo simplificado da série temporal que explica sua natureza aleatória de uma maneira útil para fazer previsões. Para tal, assume-se duas restrições: estacionariedade e ergodicidade.

Um processo é dito estacionário se o processo estocástico subjacente que gerou a série é invariante em relação ao tempo. Porém, na prática, a maioria dos processos são não-estacionários, ou seja, variam em relação ao tempo. Por exemplo, o consumo atual de energia hoje é muito maior do que o de 30 anos atrás. Isso indica que o processo que gerou a série de 30 anos atrás é diferente do processo gerador atual.

Felizmente, muitas das séries temporais não-estacionárias têm a propriedade de se tornarem estacionárias após a diferenciação sucessiva destas. Neste caso, a série é dita não-estacionária homogênea. O número de vezes que a série original deve ser diferenciada antes de resultar numa série estacionária é denominado ordem de homogeneidade.

Quanto à ergodicidade, um processo estocástico é dito ergódico se apenas uma realização é suficiente para obter todas as suas estatísticas. Logo, todo processo ergódico é também estacionário, já que apenas uma realização de um processo não estacionário não poderá conter todas as informações necessárias para a especificação do processo. De forma geral, o objetivo do estudo de uma série

temporal consiste em: dada uma realidade (processo estocástico) retira-se uma amostra finita de observações eqüiespaçadas no tempo (série temporal) e através do estudo desta amostra (análise de séries temporais) identifica-se um modelo cujo objetivo é inferir sobre o comportamento da realidade (modelo estocástico). (HAMILTON, 1994)

3.1.3 - Domínio do tempo x Domínio da freqüência

Uma série temporal pode ser analisada tanto no domínio do tempo quanto no domínio da freqüência.

A análise no domínio da freqüência é uma análise da freqüência com que certos eventos ocorrem. Esta representação é útil quando os componentes harmônicos da série têm um significado físico ou os efeitos práticos do processo são analisados por suas componentes de freqüência. A função associada é a densidade espectral. A análise espectral visa estabelecer as propriedades de um processo estocástico em termos de freqüência²⁶. Porém, neste estudo será feita uma análise no domínio do tempo.

Na análise no domínio do tempo é considerada a evolução temporal do processo, ou seja, mede-se a magnitude do evento que ocorre em determinado instante de tempo. Muitas das vezes, uma observação Z_t é influenciada por uma observação passada Z_{t-k} . Para analisar essa possível dependência são utilizadas as funções de autocovariância e autocorrelação.

A autocovariância é a covariância entre Z_t e seu valor k períodos adiante Z_{t+k} , definida como:

$$\gamma_k = Cov[Z_t, Z_{t+k}] = E[(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu)]$$

Note que se $k = 0$, tem-se $\gamma_0 = 1$.

A função de autocorrelação informa quanta correlação (isto é, quanta interdependência) existe entre pontos vizinhos na série Z_t . Mais precisamente, ela serve para medir o comprimento e a memória de um processo, ou seja, a extensão

²⁶ Para maiores informações, consultar Hamilton (1994).

para qual o valor tomado no tempo t depende daquele tomado no tempo $t+k$. A autocorrelação de defasagem k é definida como:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \frac{\text{Cov}[Z_t, Z_{t+k}]}{\sqrt{\text{Var}(Z_t)\text{Var}(Z_{t+k})}} \quad (3.1)$$

Para um processo estacionário, a variância no tempo t é a mesma que a variância no tempo $t+k$. Logo, na equação (3.1), se tem $\text{Var}(Z_t) = \text{Var}(Z_{t+k}) = \text{variância do processo}$.

É fácil verificar que a função de autocorrelação é simétrica, isto é, a correlação de um deslocamento positivo é a mesma de um deslocamento negativo, ou seja, $\rho_k = \rho_{-k}$. Isso indica que se pode considerar apenas os valores positivos de k .

O gráfico dos coeficientes de autocorrelação ρ_k contra k é chamado de correlograma. Esse gráfico é muito importante para a estimação do melhor modelo, pois fornece informações sobre a sazonalidade e sobre a estacionariedade ou não da série. (PINDYCK e RUBINFELD, 2004)

Um tipo de processo estocástico muito importante é o processo estocástico ruído branco. Ele é definido como

$$y_t = \varepsilon_t$$

onde ε_t é uma variável aleatória independentemente distribuída com média 0.

A autocorrelação desse processo é dada por

$$\rho_k = \begin{cases} 1; k = 0 \\ 0; k > 0 \end{cases}$$

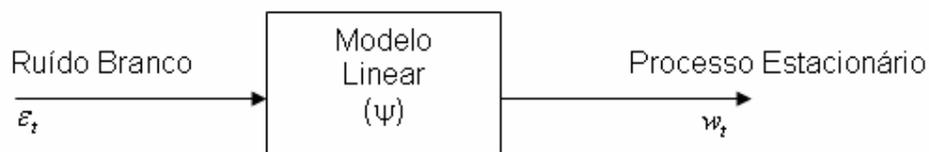
Se a função de autocorrelação de uma determinada série de tempo é zero (ou próxima de zero) para todos os $k > 0$, há um grande indício de que a série estudada se comporta como um ruído branco. Caso um teste estatístico confirme tal hipótese, a utilidade de usar um modelo autoprojeto para prever a série é pouca ou praticamente nula.

Apresentados alguns conceitos importantes vinculados às séries temporais, na próxima seção será descrita uma das metodologias que serão utilizadas nesta dissertação para prever o consumo de energia elétrica no Brasil. Trata-se de um método autoprojeto, mais especificamente o método de análise de Box & Jenkins.

3.2 - Modelos Box & Jenkins

O fundamento teórico do modelo de Box & Jenkins²⁷ baseia-se na Teoria Geral de Sistemas Lineares que diz que a passagem de um ruído branco por um filtro linear de memória infinita gera um processo estacionário de segunda ordem²⁸, como indica a Figura 7.

Figura 7 - Teoria Geral de Sistemas Lineares



Fonte: Box & Jenkins (1994)

Definindo um operador de defasagem B (*backward shift operator*) como

$$B^k Z_t = Z_{t-k}$$

tem-se que:

$$w_t = \varepsilon_t - \Psi_1 \varepsilon_t B - \Psi_2 \varepsilon_t B^2 - \dots$$

$$w_t = (1 - \Psi_1 B - \Psi_2 B^2 - \dots) \varepsilon_t = \Psi(B) \varepsilon_t$$

$$w_t = \Psi(B) \varepsilon_t \Leftrightarrow \varepsilon_t = \Psi(B)^{-1} w_t$$

sendo que:

$$\Psi(B)^{-1} = \pi(B), \text{ onde } \pi(B) = 1 - \pi_1 B - \pi_2 B^2 - \dots$$

Como $\Psi(B)$ [ou $\pi(B)$] possuem infinitos parâmetros, o que causa um problema, Box & Jenkins mencionam que, sob certas restrições, pode-se afirmar que todo polinômio infinito pode ser expresso pelo quociente de dois polinômios finitos.

Então:

$$\Psi(B) = \theta(B) / \phi(B), \text{ onde:}$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \Rightarrow \text{Polinômio MA (q)}$$

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \Rightarrow \text{Polinômio AR (p)}$$

²⁷ Ver Box & Jenkins (1994).

²⁸ Em termos gerais, processo estacionário de 2ª ordem é um processo estocástico com média e variância constantes.

Nas seções seguintes serão feitos mais esclarecimentos sobre os polinômios AR e MA, bem como sobre os modelos ARMA e ARIMA.

3.2.1 - Modelos Auto-Regressivos (AR)

Num modelo auto-regressivo de ordem p , cada observação Z_t é gerada pela média ponderada das p observações passadas $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-p}$ juntamente com uma perturbação aleatória do período corrente. Tal processo será denotado por AR(p) e sua equação é da forma

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \delta + \varepsilon_t \quad (3.2)$$

Onde δ é uma constante que se relaciona com a média da seguinte maneira:

$$\mu = \frac{\delta}{1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p}$$

Para a identificação da ordem p de um modelo auto-regressivo se faz necessária a utilização da função de autocorrelação parcial (FACP)²⁹. A autocorrelação parcial (ϕ_{kk}) é representada por: $Cor(Z_t, Z_{t+k} | Z_{t+1}, \dots, Z_{t+k-1})$. Um processo AR(p) deve apresentar $\phi_{kk} \neq 0$ para valores de k menores ou iguais a p e $\phi_{kk} = 0$ para valores de k maiores do que p . (PINDYCK e RUBINFELD, 2004)

3.2.2 - Modelos de Médias Móveis (MA)

Num modelo de médias móveis de ordem q , cada observação de Z_t é gerada por uma média ponderada das perturbações aleatórias de q períodos atrás. Denota-se esse processo como MA(q) e sua equação é da forma

$$Z_t = \mu + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.3)$$

onde os parâmetros $\theta_1, \dots, \theta_q$ podem ser positivos ou negativos.

²⁹ Maiores detalhes sobre a identificação da ordem de um modelo AR será feita na seção 3.5.

Nesse modelo se supõe que as variações aleatórias são distribuídas independentemente ao longo do tempo, ou seja, que são geradas por um processo ruído branco. Em particular, se supõe que cada termo da perturbação ε_t é uma variável aleatória de distribuição normal com média 0 e variância σ_ε^2 e covariância $\gamma_k = 0$ para $k \neq 0$. Assim, um processo MA(q) é descrito por exatamente q + 2 parâmetros : a média μ , a variância da perturbação σ_ε^2 e os q parâmetros $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$.

Para a determinação da ordem q de um modelo de médias móveis, usa-se a função de autocorrelação ρ_k ³⁰. A função de autocorrelação de um modelo MA(q) possui os q primeiros valores diferentes de zero e para $k > q$ tem-se $\rho_k = 0$.

3.2.3 - Modelos ARMA

Como definido anteriormente, B é o operador que impõe uma defasagem no tempo de um período cada vez que é aplicado a uma variável. Por exemplo, $B\varepsilon_t = \varepsilon_{t-1}$, $B^2\varepsilon_t = \varepsilon_{t-2}$ e $B^n\varepsilon_t = \varepsilon_{t-n}$. Usando esse operador, pode-se reescrever a equação (3.3) de um modelo MA(q) como:

$$Z_t = \mu + \varepsilon_t + \theta_1\varepsilon_{t-1} + \theta_2\varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q\varepsilon_{t-q} = \mu + (1 + \theta_1B + \theta_2B^2 + \dots + \theta_qB^q)\varepsilon_t = \mu + \theta(B)\varepsilon_t$$

onde $\theta(B)$ é um polinômio de grau q em B.

Da mesma maneira, a equação de um modelo AR(p) (3.2) pode ser reescrita sob a forma:

$$Z_t = \phi_1Z_{t-1} + \phi_2Z_{t-2} + \dots + \phi_pZ_{t-p} + \delta + \varepsilon_t \Rightarrow \phi(B)Z_t = \delta + \varepsilon_t$$

onde $\phi(B)$ é um polinômio de grau p em B.

Porém, muitos processos aleatórios estacionários não podem ser modelados apenas como médias móveis ou apenas como auto-regressivos, pois possuem características de ambos os tipos de processo. A extensão dos modelos apresentados no tópico anterior é o modelo misto auto-regressivo e de médias móveis de ordem (p,q), ou seja, ARMA(p,q), representado por:

³⁰ Maiores detalhes sobre a identificação da ordem de um modelo MA será feita na seção 3.5.

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \delta + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.4)$$

Reescrevendo a equação (3.4) usando o operador defasagem B, obtemos

$$\phi(B)Z_t = \delta + \theta(B)\varepsilon_t \quad (3.5)$$

3.2.4 - Modelos ARIMA

Como dito anteriormente, muitas das séries de tempo encontradas nas aplicações reais são não-estacionárias, ou seja, o processo gerador dos dados se modifica ao passar do tempo. Entretanto, as séries não-estacionárias podem possuir uma característica desejável de homogeneidade. Nessa situação, pode-se derivar a série original até que esta se torne estacionária. É dito que Z_t é não-estacionária homogênea de ordem d se a série

$$w_t = \Delta^d Z_t$$

é estacionária. Aqui, Δ é o operador diferenciação, isto é,

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}, \quad \Delta^2 Z_t = \Delta Z_t - \Delta Z_{t-1}$$

e, assim, sucessivamente.

Surge, então, o modelo chamado ARIMA(p,d,q) que nada mais é do que um modelo ARMA(p,q) onde a série foi diferenciada d vezes a fim de se tornar estacionária.

A equação de um modelo ARIMA (p,d,q) é representada como

$$\phi(B)\Delta^d Z_t = \delta + \theta(B)\varepsilon_t$$

Note que esta equação é a equação (3.5) de um modelo ARMA(p,q), com o operador defasagem de ordem d , Δ^d , aplicado à série Z_t .

3.2.5 - A metodologia Box & Jenkins

Existem alguns passos básicos para utilização da metodologia de Box & Jenkins. O primeiro passo da metodologia Box & Jenkins para a estimação de um

modelo ARIMA(p,d,q) é a identificação da ordem de homogeneidade “d” da série estudada, isto é, determinar o número de vezes que esta deve ser diferenciada até que se torne estacionária. Este procedimento pode ser feito através da observação do próprio gráfico da série ou da função de autocorrelação (FAC). (PINDYCK e RUBINFELD, 2004)

O próximo passo é a identificação das ordens “p” e “q” do modelo. Para tal, usa-se a função de autocorrelação (FAC) e a função de autocorrelação parcial (FACP) da série. Os comportamentos desses correlogramas devem ser comparados com a Tabela 3 a seguir que é um resumo das características dessas funções para os modelos AR(p), MA(q) e ARMA(p,q).

Tabela 3 - Resumo das características teóricas da FAC e da FACP dos modelos AR(p),MA(q) e ARMA(p,q)

Modelo	Função de Autocorrelação (ρ_k)	Função de Autocorrelação Parcial (ϕ_{kk})
AR(p)	Infinita (Exponencial e/ou senóides amortecidas)	Finita (Corte após o <i>lag</i> “p”)
MA(q)	Finita (Corte após o <i>lag</i> “q”)	Infinita (Exponencial e/ou senóides amortecidas)
ARMA(p,q)	Infinita (Exponencial e/ou senóides amortecidas após o <i>lag</i> “q-p”)	Infinita (Exponencial e/ou senóides amortecidas após o <i>lag</i> “p-q”)

Fonte: Souza e Camargo (1996)

Para a identificação da ordem p de um modelo AR(p), deve-se observar se a FAC decresce e se a FACP apresenta um corte³¹. Neste caso, o *lag* onde este corte ocorre fornecerá a ordem p ($p = \text{lag}$ do corte).

O comportamento das funções FAC e FACP de um modelo MA(q) deve ser inverso ao de um modelo puramente autoregressivo, ou seja, a FACP deve ser decrescente e a FAC deve apresentar um corte no *lag* q.

³¹ Geralmente nos *softwares* específicos para previsão, tanto o gráfico da FAC quanto da FACP apresentam intervalos de significância dos *lags*. Os *lags* cujos valores da autocorrelação ultrapassam estes intervalos são ditos significantes (Goodrich & Stellwagem, 1999). Caso se observe, por exemplo, a autocorrelação de *lag* 1 significativa e, a partir do *lag* 2 (inclusive), as autocorrelações estão todas dentro do intervalo, isto indica um “corte” no *lag* 1.

Após a identificação da ordem do modelo, é necessário obter as estimativas dos parâmetros desse modelo. A técnica usada para a obtenção das estimativas será a da máxima verossimilhança (Dudewicz e Mishra, 1988).

Depois da identificação do modelo e da estimação dos parâmetros, serão feitos os testes de aderência com o objetivo de verificar o ajustamento do modelo obtido. Nestes testes encontram-se, entre outros, testes para os resíduos e os testes de sobrefixação.

Basicamente, os testes residuais servem para verificar se os resíduos gerados pelo modelo obtido se comportam como um ruído branco, ou seja, se o modelo apenas não explicou o componente aleatório, de forma que os erros não sejam correlacionados entre si. Este fato consiste num dos indicadores de eficiência explicativa do modelo.

Os testes de sobrefixação consistem, simplesmente, em gerar modelos de ordem superior ao estimado, a fim de compará-los e, assim, ratificar a pertinência deste.

3.2.6 - Modelos SARIMA

Os processos encontrados na prática, além de raramente serem estacionários, apresentam muitas vezes componentes sazonais. Assim Box & Jenkins (1994) formularam seus modelos para séries temporais com componentes sazonais dando origem aos modelos SARIMA. Nesse caso a modelagem segue a equação:

$$\phi(B)\Phi(B^S)\nabla_S^D\nabla^d Z_t = \theta(B)\Theta(B^S)\varepsilon_t \quad (3.6)$$

onde:

$\phi(B)$: operador não sazonal auto-regressivo

ϕ_i : parâmetros auto-regressivos não sazonais

$\nabla^d = (1 - B)^d$: operador diferença não sazonal de ordem d

$\Phi(B^S)$: operador sazonal auto-regressivo

Φ_i : parâmetros auto-regressivos sazonais

$\nabla_S^D = (1 - B^S)^D$: operador diferença sazonal de ordem D

$\theta(B)$: operador não sazonal de médias móveis

θ_i : parâmetros de médias móveis não sazonais

$\Theta(B^S)$: operador sazonal de médias móveis

Θ_i : parâmetros de médias móveis sazonais

ε_t : ruído branco associado ao modelo

Um modelo com esta estrutura é denominado SARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)_S. Ressalta-se que o procedimento de obtenção deste modelo segue os mesmos passos empregados para especificar o modelo ARIMA não sazonal. Isto quer dizer que, no SARIMA, faz-se também a observação do comportamento da FAC e da FACP (inclusive observância dos *lags* de “cortes”), entretanto, considera-se apenas os *lags* sazonais (para uma série mensal, por exemplo, são os *lags* 12, 24, 36, etc).

Neste capítulo foi apresentada a metodologia autoprojativa que será empregada na abordagem *bottom-up* proposta para a construção do modelo de médio prazo para consumo de energia elétrica no Brasil. Dando prosseguimento, na seção 3.3 a seguir, será apresentado o modelo causal que será empregado neste trabalho. Trata-se do modelo de Regressão Dinâmica.

3.3 - Regressão Dinâmica

Como o objetivo deste trabalho é a construção de um modelo de previsão que explique o comportamento do consumo real de energia elétrica através da identificação de possíveis influências de alguns fatores econômicos, nesta seção será usada o que a literatura chama de regressão dinâmica. Pretende-se chegar a um modelo com melhor desempenho preditivo, na medida em que a estratégia de modelagem utilizada neste momento contempla as relações entre o consumo de energia e outras causalidades. Portanto, trata-se de uma tentativa de melhorar o desempenho do modelo autoprojativo expresso na seção anterior, fazendo-se uso de outras variáveis que não o próprio consumo da energia elétrica no passado.

3.3.1 - Conceituação

Nos modelos de regressão linear estudados comumente na literatura³², supõe-se que os erros “gerados” pelo modelo possuem algumas características como: média zero, variância constante, distribuição normal e independência, implicando, assim, na inexistência de correlação serial.

Segundo Barros e Souza (1995), ao se tentar modelar uma série temporal através de um modelo de regressão, a hipótese de independência dos ruídos não é realista, e os resultados e testes usados nos modelos de regressão não são válidos. Por exemplo, segundo os autores, algumas das conseqüências da autocorrelação dos resíduos são:

- 1) Os estimadores usuais por mínimos quadrados são ainda não tendenciosos, mas não têm variância mínima;

- 2) Os estimadores da variância e dos erros padrões dos coeficientes da regressão são subestimados, o que levaria à conclusão de que os estimadores são mais precisos do que na realidade;

- 3) Os intervalos de confiança para os parâmetros da regressão e os testes de hipóteses relacionados a estes intervalos perdem a validade (como uma conseqüência direta de 2).

Logo, pode-se chegar a conclusões errôneas se ignoradas tais conseqüências e deve-se procurar procedimentos para que tal problema seja contornado. Uma das soluções pode ser a utilização de modelos de regressão dinâmica.

Os modelos de regressão dinâmica além de contemplarem a evolução no tempo da variável de interesse, também consideram o efeito de variáveis explicativas, sendo assim uma expansão dos modelos de série temporais. Atenta-se que o termo “regressão dinâmica” não indica que os parâmetros do modelo evoluem no tempo³³. Ao contrário, a palavra “dinâmica” significa aqui um modelo de regressão no qual incluímos a estrutura de dependência de uma série temporal.

³² Gujarati (2005).

³³ Caso dos modelos de espaço de estados que usam o Filtro de Kalman (Hamilton, 1994).

Segundo Goodrich (1989), modelos de regressão dinâmica devem ser usados quando existe uma estrutura de dependência entre a variável de interesse e variáveis causais e, ao mesmo tempo, quando a estrutura de correlação da série dependente (série a ser explicada) indicar que não se pode supor a independência dos erros.

A estimação dos parâmetros de um modelo de regressão dinâmica é feita através de mínimos quadrados ordinários como nos modelos de regressão usuais. Entretanto, a estimação para um modelo de regressão dinâmica é mais complicada e envolve um processo iterativo com vários estágios. Tal procedimento é necessário para que o modelo final atenda aos seguintes critérios (GILBERT, 1996 *apud in* CORVALÃO, 2002):

1) coerência dos dados, observando se o modelo cumpre com as suposições básicas como não autocorrelação nos resíduos, homocedasticidade, etc.;

2) validade do condicionamento, durante as inserções das variáveis explicativas que devem apresentar características exógenas;

3) exibir constância dos parâmetros;

4) critério de admissibilidade, já que os valores estimados devem ter sentido. Por exemplo, que não se obtenham valores extremos para as elasticidades;

5) consistência com a teoria, revisar os sinais, a magnitude dos coeficientes, observando se os valores estimados são congruentes com a teoria postulada e, em geral, com a teoria econômica;

6) um modelo só será considerado adequado se abranger (*encompassing*) os resultados dos modelos rivais.

3.3.3 - Estrutura dos Modelos de Regressão Dinâmica

Os modelos de regressão dinâmica possuem equação da forma

$$Y_t = \beta_0 x_t + \beta_1 x_{t-1} + \dots + \beta_k x_{t-k} + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_m Y_{t-m} + \varepsilon_t \quad (3.7)$$

Percebe-se pela equação (3.7) que a variável endógena Y_t no modelo de regressão dinâmica é explicada pelas suas defasagens e pela variável causal (exógena) x_t e suas defasagens. Visando uma simplificação do modelo, considera-

se as defasagens da variável exógena como uma variável exógena, omitindo-se assim os termos $x_{t-1} + x_{t-2} + \dots + x_{t-k}$. Portanto, a equação (3.7) pode ser reescrita como:

$$\varphi(B)Y_t = \beta x_t + \varepsilon_t \quad (3.8)$$

Onde:

Y_t é a variável dependente (exógena) no instante t ;

β é o vetor de coeficientes das variáveis causais que será estimado por mínimos quadrados;

x_t é o vetor de variáveis causais (exógenas) (incluindo suas possíveis defasagens);

ε_t é o ruído aleatório associado ao modelo, onde supõe-se que estes são independentes e identicamente distribuídos com distribuição $N(0, \sigma^2)$;

$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_m B^m$ é o polinômio autoregressivo de ordem p , onde B é o operador de defasagem.

A diferença entre os modelos de regressão dinâmica e os modelos ARIMA é justamente a inclusão do vetor de variáveis exógenas βx_t . Lembrando que nos modelos univariados ARIMA de Box & Jenkins apenas os valores passados da série Y_t e os valores defasados da série de erros são usados na modelagem e na previsão de Y_t .

Procura-se, portanto, dentro da metodologia definida, evoluir na modelagem buscando-se novas variáveis que possam explicar a série do consumo de energia com o objetivo de encontrar um modelo mais adequado. O modelo de regressão dinâmica mencionado pode ser considerado como um caso particular do que é conhecido na literatura como modelos de Cochrane e Orcutt generalizados.

3.3.4 - Modelos de Regressão Cochrane-Orcutt Generalizados

O modelo de regressão generalizado de Cochrane e Orcutt (1949) é dado por:

$$\varphi(B)Y_t = \beta x_t + w_t \quad (3.9)$$

$$R(B)w_t = \varepsilon_t \quad (3.10)$$

onde $R(B)$ é o polinômio autoregressivo.

Pode-se notar que a equação (3.9) tem a mesma forma da equação de regressão dinâmica (3.8), entretanto os erros w_t apresentam uma estrutura autoregressiva dada pela equação (3.10).

Isolando o termo de erro autoregressivo w_t na equação (3.9), chega-se a

$$w_t = \varphi(B)Y_t - \beta x_t$$

Substituindo w_t na equação (3.10), obtém-se

$$R(B)[\varphi(B)Y_t - \beta x_t] = \varepsilon_t \quad (3.11)$$

A equação (3.11) representa o modelo decorrente do sistema formado pelas equações (3.9) e (3.10). Desta equação nota-se que o modelo de regressão generalizado de Cochrane e Orcutt introduz defasagens tanto na variável dependente Y_t quanto nas causais. A equação (3.11) indica também que a relação de causalidade entre Y_t e x_t não é afetada pela introdução do polinômio autoregressivo $R(B)$.

Esta última equação pode ainda ser escrita em termos de novas variáveis Y_t^* e x_t^* dadas por:

$$Y_t^* = R(B)Y_t \quad \text{e} \quad x_t^* = R(B)x_t$$

onde $R(B)$ é chamado de “fator comum” e representa a estrutura de correlação presente no erro w_t .

A equação obtida usando-se estas novas variáveis é

$$\varphi(B)Y_t^* = \beta x_t^* + \varepsilon_t \quad (3.12)$$

Logo, o modelo de regressão generalizado de Cochrane Orcutt reduz-se ao modelo de regressão dinâmica usual ao se considerar as novas variáveis Y_t^* e x_t^* . O modelo original de Cochrane e Orcutt tem como fator comum $R(B) = 1 - \alpha B$ e então a equação (3.12) reduz-se a

$$\varphi(B)[Y_t - \alpha Y_{t-1}] = \beta[x_t - \alpha x_{t-1}] + \varepsilon_t \quad (3.13)$$

Salienta-se que, neste modelo, o procedimento de estimação é seqüencial. A estimativa inicial de α é 0, e a partir dela estima-se β e $\varphi(B)$ por mínimos quadrados ordinários. A partir destas estimativas encontra-se um estimador de $R(B)$ através da equação $R(B)w_t = \varepsilon_t$. O polinômio estimado $R(B)$ é então usado para transformar Y_t e x_t e reestimar β e $\varphi(B)$. O processo é repetido até que se alcance a convergência dos parâmetros³⁴.

3.3.5 - Construção de modelos de regressão dinâmica

Segundo Barros e Souza (1995), geralmente os modelos econométricos já possuem uma estrutura conhecida baseada na teoria econômica, bastando apenas estimar os parâmetros do modelo já conhecido. Entretanto, este é raramente o caso dos modelos de séries de tempo, em que o modelo é construído a partir dos dados. A estratégia usualmente empregada na construção de um modelo de regressão dinâmica é uma estratégia *bottom-up*, onde se parte de um modelo simples, incrementando-o até que se obtenha um modelo apropriado. Muitas vezes esse processo é custoso, pois, além da escolha das variáveis explicativas, deve-se escolher os *lags* destas, o que, geralmente, não é abordado pela teoria econômica.

Como dito anteriormente, não é suficiente que os parâmetros estimados sejam significantes. É preciso que o modelo estimado esteja consistente com a teoria econômica. Por exemplo, um coeficiente positivo da variável explicativa preço de certo produto num modelo de previsão de consumo deste, indica que um aumento do preço acarretaria um aumento no consumo do mesmo o que contradiz a teoria econômica.

Para se obter as previsões futuras $Y_{t+1}, Y_{t+2}, \dots, Y_{t+k}$ da variável de interesse Y_t é necessário fornecer ao modelo os valores futuros das variáveis causais x_t . Logo, as previsões destas variáveis devem ser adequadas para que o modelo de regressão dinâmica não gere valores futuros para Y_t inadequados. Por outro lado, esta condição possibilita a criação de cenários futuros para as variáveis causais,

³⁴ Para mais detalhes, ver Cochrane e Orcutt (1949).

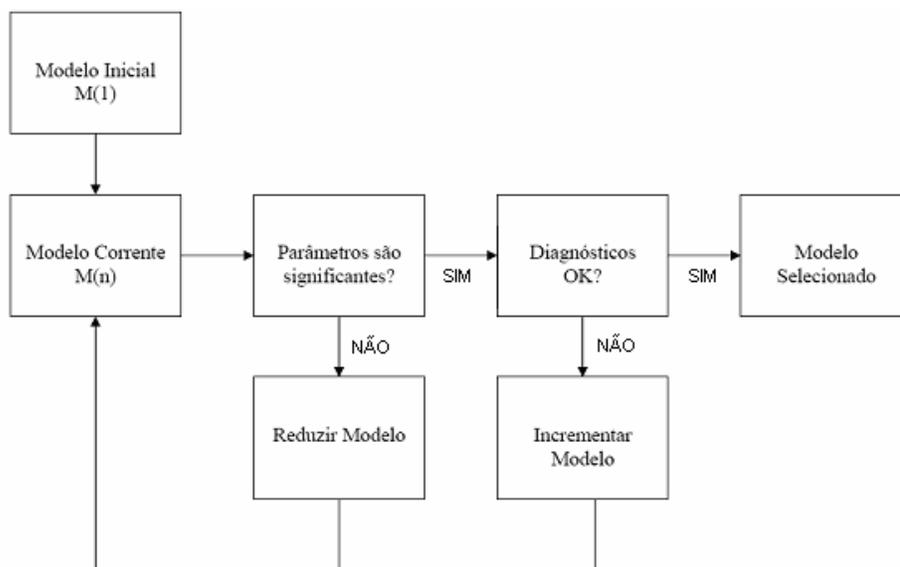
possibilitando analisar os possíveis valores futuros da variável de interesse em diversas condições.

Nos modelos de regressão dinâmica podem ser usadas também variáveis de intervenção (ou variáveis *dummy*). O objetivo deste tipo de procedimento é considerar situações atípicas como, por exemplo, aumento das vendas de brinquedo no Natal e no Dia das Crianças (neste caso é razoável incluir *dummies* para os meses de dezembro e outubro no modelo, respectivamente). O mesmo procedimento pode ser usado para levar em conta os efeitos de situações incomuns como greves e planos econômicos³⁵.

Os modelos de regressão dinâmica incorporam ainda diretamente a sazonalidade da série ao modelo, ao invés de supor que a série será previamente dessazonalizada. Atenta-se que existem duas maneiras de tratar a sazonalidade: via *dummies* sazonais ou diretamente, através de defasagens na variável dependente ou nos erros estruturados.

A Figura 8, a seguir, descreve, de maneira genérica, os passos a serem seguidos para a construção de um modelo de regressão dinâmica.

Figura 8- Construção de um modelo de regressão dinâmica



Fonte: Zanini(2000)

³⁵ Variáveis *dummies* são geralmente definidas como 1 (no período de ocorrência do fato relevante) e 0 fora deste período.

3.3.6 - Testes usados nos modelos de regressão dinâmica

Para responder as perguntas presentes na Figura 8 sobre a significância dos parâmetros e diagnósticos, até que se chegue ao modelo selecionado, são usados vários testes estatísticos³⁶. Tais testes são aplicados em diversos estágios da série e possuem diversos objetivos como:

- 1) definir a especificação do modelo explicativo;
- 2) encontrar a dinâmica do modelo, isto é, definir a inclusão ou não de variáveis defasadas;
- 3) verificar o ajuste do modelo.

A seguir serão apresentados vários testes que são utilizados na prática, segundo Goodrich (1989).

3.3.6.1 - Testes de verificação da “dinâmica” do modelo

Como dito anteriormente, a dinâmica de um modelo acontece através dos *lags* da variável dependente e/ou através da presença de erros estruturados num modelo de Cochrane-Orcutt. A cada momento da elaboração do modelo, são realizados testes de hipóteses sobre a “dinâmica” do modelo.

Em todos os casos a seguir, a hipótese nula afirma que a dinâmica do modelo está corretamente especificada, ou seja, a inclusão de outros *lags* da variável dependente ou outros erros estruturados não é necessária. A hipótese alternativa, em cada caso, representa a necessidade de inclusão de novos termos. Sendo assim, tem-se:

- 1) Teste de defasagem da variável endógena

Suponha que a variável dependente Y_t e seus *lags* $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p-1}$ estão presentes no modelo atual. A hipótese alternativa consiste em adicionar a variável

³⁶ A maioria dos testes empregados em regressão dinâmica é uma variante dos testes de Multiplicadores de Lagrange (testes LM) e são baseados na distribuição Qui-Quadrado. (Barros e Souza, 1995).

defasada Y_{t-p} ao modelo, isto é, adiciona-se o primeiro *lag* ainda não presente no modelo atual. Se esta variável for considerada significativa, a hipótese nula é rejeitada e deve-se adicionar a variável Y_{t-p} ao modelo.

2) Teste da defasagem sazonal da variável endógena

Este teste é semelhante ao anterior. A hipótese alternativa consiste em adicionar ao modelo atual a variável defasada até o primeiro *lag* sazonal Y_{t-pS} ainda não presente ao modelo. Se o coeficiente de Y_{t-pS} for significativo, esta variável deve ser incluída no modelo, e a hipótese nula deve ser rejeitada.

3) Teste da seqüência de defasagens da variável endógena

A hipótese alternativa consiste em adicionar todos os *lags* da variável dependente que ainda não estão presentes no modelo.

4) Teste da defasagem dos resíduos

A hipótese alternativa consiste em adicionar ao modelo o primeiro termo defasado ε_{t-p} ainda não incluído no modelo atual.

5) Teste da defasagem sazonal dos resíduos

Na hipótese alternativa adiciona-se ao modelo atual o primeiro *lag* sazonal ε_{t-pS} ainda não presente no modelo.

6) Teste da seqüência de defasagens dos resíduos

Na hipótese alternativa adiciona-se às variáveis do modelo atual uma seqüência de resíduos defasados $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-S}$, onde S é o período sazonal. É importante ressaltar que, na hipótese alternativa, inclui-se apenas os resíduos ainda ausentes no modelo atual.

3.3.6.2 - Testes para a especificação das variáveis causais

O objetivo de todos estes testes é verificar se a inclusão de uma ou mais variáveis ainda não contempladas no modelo resulta numa melhora do ajuste. Atenta-se para o fato de que os testes para a especificação de variáveis causais não se referem à parte dinâmica do modelo, e não tratam da inclusão de *lags* da variável dependente e de erros estruturados.

1) Teste das variáveis causais excluídas

Neste teste verifica-se a necessidade de inclusão de cada uma das variáveis (escolhidas previamente para análise) mas que ainda não estão presentes no modelo. Se quaisquer destas variáveis são consideradas significantes, deve-se incluí-las no modelo (talvez seqüencialmente) e executar a mesma bateria de testes para verificar se a inclusão foi vantajosa.

2) Teste de tendência temporal

Este teste corresponde à inclusão de uma variável do tipo $X_t = t$ no modelo. Esta variável é útil em casos onde a série dependente não é estacionária.

3) Teste da defasagem das variáveis exógenas (causais)

Na hipótese alternativa inclui-se um *lag* adicional das variáveis causais já presentes no modelo atual.

4) Teste para a presença de funções não lineares das variáveis exógenas

Neste teste inclui-se o quadrado de cada variável exógena já presente no modelo. Todos os quadrados das variáveis exógenas são incluídos de uma só vez e, portanto, é necessário buscar quais (ou qual) quadrados são realmente significantes.

5) Teste do fator comum

Este teste é realizado só quando o modelo inclui erros estruturados. Sob a hipótese alternativa, a auto-regressão dos erros é eliminada, e todos os *lags* da variável dependente e das causais são adicionados ao modelo. Se a hipótese nula é

rejeitada, existe evidência de que um modelo mais geral deveria ser considerado, ao invés do modelo de Cochrane-Orcutt. O grande problema é descobrir em que direção deve-se generalizar o modelo corrente, e não existe uma resposta única para esta questão.

3.3.6.3 - Testes baseados na autocorrelação dos resíduos

Como pode ser visto, o processo de construção de um modelo de regressão dinâmica deve levar em conta diversos diagnósticos com o objetivo de verificar se o modelo atual é apropriado. Em particular, deve-se sempre examinar o gráfico das autocorrelações dos resíduos. Se estas são significantes para alguns *lags*, este fato pode indicar que alguma característica da variável dependente não foi capturada pelo modelo estimado. Por exemplo, no caso de dados mensais, se a autocorrelação dos resíduos é significativa no *lag* 12, a observação situada num período genérico $t - 12$ meses é relevante para explicar a observação no período t e espera-se que sua inclusão no modelo resulte num decréscimo dos erros de previsão do modelo.

Segundo Barros e Souza (1995), a existência de autocorrelações significantes nos resíduos pode então indicar uma das seguintes situações:

- 1) deve-se incluir mais *lags* da variável dependente; ou
- 2) deve-se incluir *lags* adicionais das variáveis exógenas já presentes no modelo ou incluir novas variáveis causais. Enfim, é importante saber que, em qualquer das situações mencionadas, o fato de os resíduos apresentarem autocorrelações significantes indica que algum tipo de estrutura presente na série Y_t não foi captada pelo modelo em consideração.

Apresentadas as metodologias de análise de dados de séries de tempo que serão empregadas, na próxima seção será descrita todo o banco de dados utilizado neste estudo.

3.4 - Banco de Dados

A coleta das séries necessárias para a elaboração dos modelos Box & Jenkins e de Regressão Dinâmica presentes neste estudo foi feita através do site do Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada - IPEA (www.ipeadata.gov.br) que disponibiliza várias séries macroeconômicas, financeiras e regionais do Brasil. Para o presente estudo, foram coletados dados referentes ao período de janeiro de 1992 a setembro de 2007, num total de 189 observações para cada variável.

Além da série mensal de consumo de energia no país foram levantadas 35 possíveis variáveis causais para a formulação do modelo de regressão dinâmica, pois fatores macroeconômicos como renda, produção, emprego, nível de atividade econômica, entre outros podem ser representados ou mensurados por uma série de variáveis. Neste caso, procurou-se levantar o maior número de séries possíveis para serem testadas nas estruturas dos modelos.

O Quadro 5 descreve as variáveis causais utilizadas no estudo e indica a fonte de cada uma delas, segundo o site do IPEA:

Quadro 5 - Variáveis Causais

Variáveis	Sigla	Fonte ³⁷
Taxa de câmbio - R\$ / US\$ - comercial - compra - fim período	CAMB_X1	BCB Boletim/BP
Taxa de câmbio - R\$ / US\$ - comercial - compra - média - R\$	CAMB_X2	BCB Boletim/BP
Cheques sem fundo - (%)	CV_X1	Serasa
Vendas nominais - indústria - índice (1992 = 100)	CV_X2	CNI
Vendas reais - indústria - índice (1992 = 100)	CV_X3	CNI
Usecheque - número de consultas	CV_X4	ACSP/IEGV
SPC - número de consultas - Mensal	CV_X5	ACSP/IEGV
Horas trabalhadas - indústria - índice (1992 = 100)	EMP_X1	CNI
Pessoal empregado - indústria - índice (1992 = 100)	EMP_X2	CNI
Taxa de desemprego – Região Metropolitana de São Paulo	EMP_X3	SEADE e DIEESE/PED
Taxa de juros - Over / Selic	JUROS_X1	BCB

³⁷ BCB Boletim/BP - Banco Central do Brasil, Boletim, Seção Balanço de Pagamentos; CNI - Confederação Nacional da Indústria, Indicadores Industriais; ACSP/IEGV - Associação Comercial de São Paulo, Boletim do Instituto de Economia Gastão Vidigal; SEADE e DIEESE/PED - Sistema Estadual de Análise de Dados e Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio-Econômicos, Pesquisa de Emprego e Desemprego; BCB Boletim/M.Finan - Banco Central do Brasil, Boletim, Seção Mercado financeiro e de capitais; ANDIMA - Associação Nacional das Instituições do Mercado Aberto, Sinopse; FGV/Conj. Econômica - Fundação Getúlio Vargas, Conjuntura Econômica; IBGE/SNIPC - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor; IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; IBGE/PIM-PF - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa Industrial Mensal - Produção Física; Funcex - Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior.

Quadro 5 - Variáveis Causais (continuação)

Variáveis	Sigla	Fonte ³⁸
*Poupança - rendimento nominal - 1º dia útil	JUROS_X2	ANDIMA
* Taxa de juros - CDB	JUROS_X3	BCB
IGP-DI - geral - índice (ago. 1994 = 100)	PRECOS_X1	FGV/Conj.
IPC - geral - índice (ago. 1994 = 100)	PRECOS_X2	FGV/Conj.
IPCA - geral - índice (dez. 1993 = 100)	PRECOS_X3	IBGE/SNIPC
IGP-M - geral - índice (ago. 1994 = 100)	PRECOS_X4	FGV/Conj.
*Commodities - geral (exceto petróleo) - preço - índice (jan. 2002 = 100)	PRECOS_X5	IPEA
*Commodities - geral - preço - índice (jan. 2002 = 100)	PRECOS_X6	IPEA
Produção industrial - bens de capital - quantum - índice (média 2002 = 100) - Mensal	PROD_X1	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - bens intermediários - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X2	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - bens de consumo - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X3	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - bens de consumo duráveis - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X4	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - bens de consumo não duráveis - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X5	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - indústria geral - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X6	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - extrativa mineral - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X7	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - indústria de transformação - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X8	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - material eletrônico, equip. comunicações - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X9	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - máquinas e equipamentos - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X10	IBGE/PIM-PF
Produção industrial - máquinas, aparelhos e mater. elétricos - quantum - índice (média 2002 = 100)	PROD_X11	IBGE/PIM-PF
**Utilização da capacidade instalada - indústria	PROD_X12	CNI
Importações - (FOB) - US\$(milhões)	PROD_X13	FUNCEX
Exportações - (FOB) - US\$(milhões)	PROD_X14	FUNCEX
Salário - real - indústria - índice (média 1992 = 100)	SR_X1	CNI
Salário mínimo real	SR_X2	IPEA

Nota: *Os dados referentes ao mês de setembro de 2007 não estavam disponíveis e foram estimados via metodologia Box & Jenkins; **Os dados referentes aos meses de agosto e setembro de 2007 foram estimados via metodologia Box & Jenkins. Fonte: Elaboração Própria

³⁸ BCB Boletim/BP - Banco Central do Brasil, Boletim, Seção Balanço de Pagamentos; CNI - Confederação Nacional da Indústria, Indicadores Industriais; ACSP/IEGV - Associação Comercial de São Paulo, Boletim do Instituto de Economia Gastão Vidigal; SEADE e DIEESE/PED - Sistema Estadual de Análise de Dados e Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio-Econômicos, Pesquisa de Emprego e Desemprego; BCB Boletim/M.Finan - Banco Central do Brasil, Boletim, Seção Mercado financeiro e de capitais; ANDIMA - Associação Nacional das Instituições do Mercado Aberto, Sinopse; FGV/Conj. Econômica - Fundação Getúlio Vargas, Conjuntura Econômica; IBGE/SNIPC - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor; IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; IBGE/PIM-PF - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa Industrial Mensal - Produção Física; Funcex - Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior.

As siglas foram utilizadas para facilitar o trabalho de modelagem dentro do software utilizado³⁹ e indicam a variável macroeconômica cuja série pode ser vista como *proxy*. O Quadro 6 relaciona as siglas e essas variáveis.

Quadro 6 - Grupo de Variáveis

Sigla	Variável (Proxy)
CAMB	Câmbio
CV	Comércio, Compra e Venda
EMP	Emprego
JUROS	Juros e Poupança
PRECOS	Preços
PROD	Produção Industrial
SR	Salário / Renda

Fonte: Elaboração Própria

O capítulo a seguir expõe os resultados obtidos pelas metodologias descritas anteriormente, bem como a comparação entre os modelos e as previsões obtidas pelos mesmos.

³⁹ O software utilizado para as estimações foi o FPW (*Forecast Pro for Windows*) versão 4.00.

4 - RESULTADOS

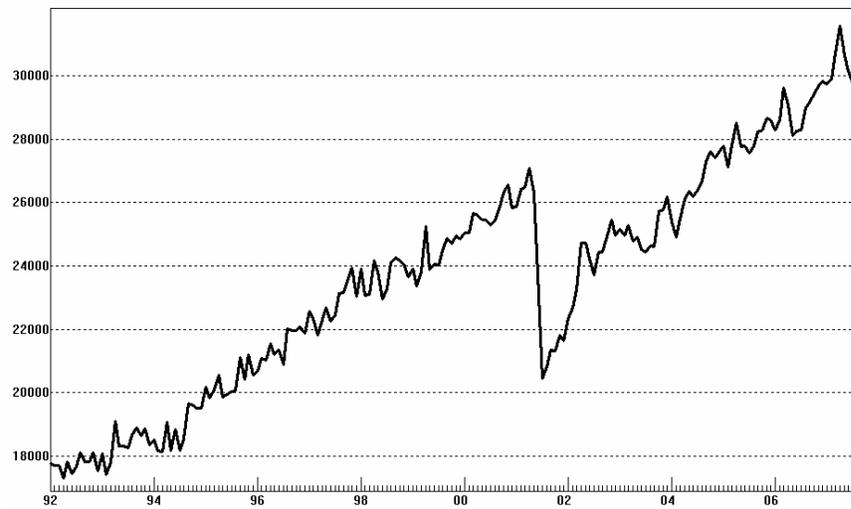
4.1 - Resultados da metodologia Box & Jenkins

Nesta seção serão apresentados os primeiros resultados obtidos da análise do consumo de energia elétrica no Brasil através da abordagem proposta por Box & Jenkins vista no capítulo 3.

A opção por começar pela modelagem autoprojativa se justifica por uma análise exploratória dos dados de consumo, ou seja, procurar-se-á verificar determinados padrões no consumo de energia elétrica no Brasil através da análise da estrutura de correlação destes dados no tempo. Isto será feito através da análise da função de autocorrelação e da função de autocorrelação parcial. Acredita-se também que a análise dos correlogramas pode gerar subsídios importantes para a construção do modelo de regressão dinâmica que será feito posteriormente.

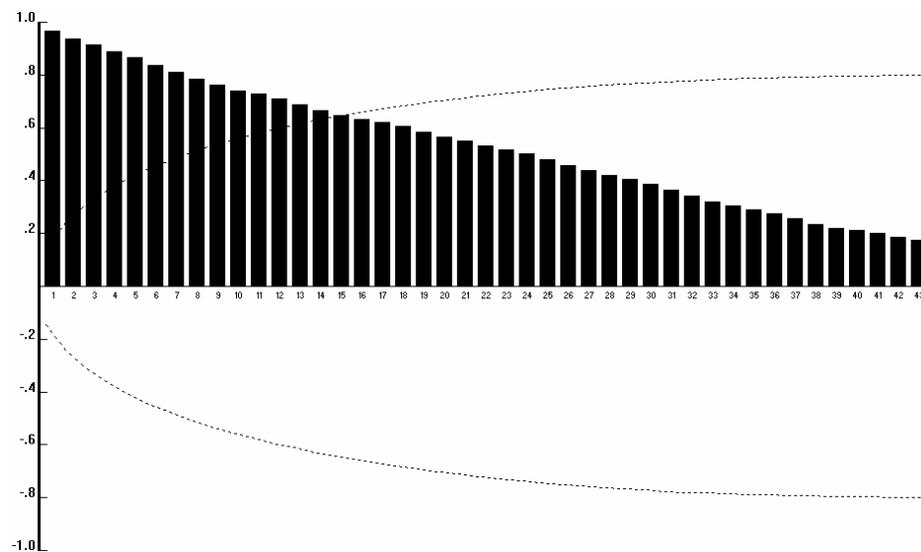
O passo inicial da metodologia Box & Jenkins é verificar se a série em estudo é estacionária e, caso não o seja, determinar o possível grau de homogeneidade desta. Isso pode ser feito observando-se os gráficos da própria série (Figura 9), da função de autocorrelação (FAC) e da função de autocorrelação parcial (FACP) nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 9 - Gráfico do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Brasil -Janeiro de 1992 a Setembro de 2007 (GWh)



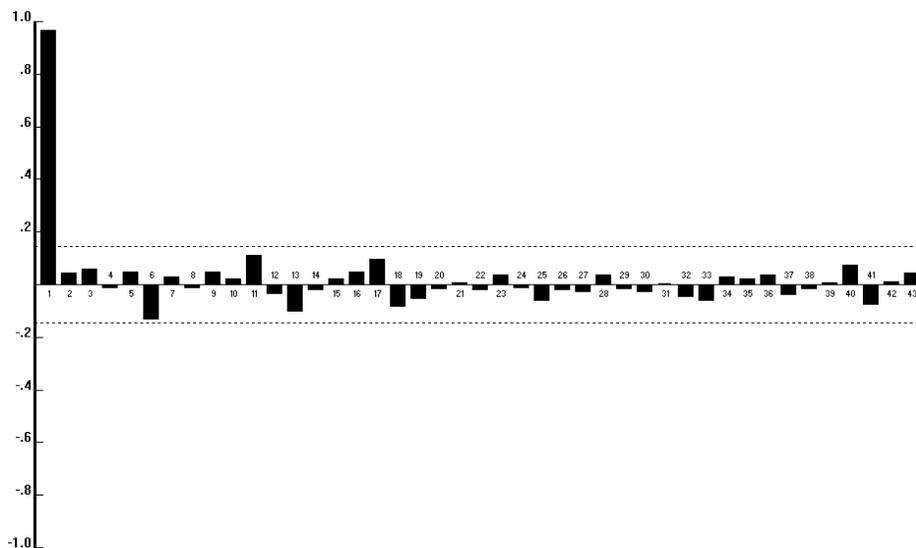
Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

Figura 10 - Gráfico da Função de Autocorrelação(FAC)



Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

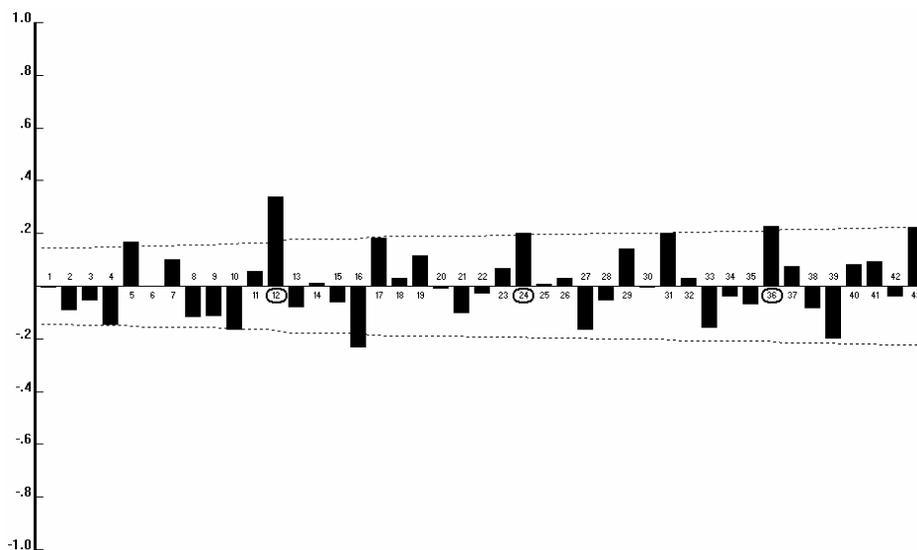
Figura 11 - Gráfico da Função de Autocorrelação Parcial(FACP)



Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

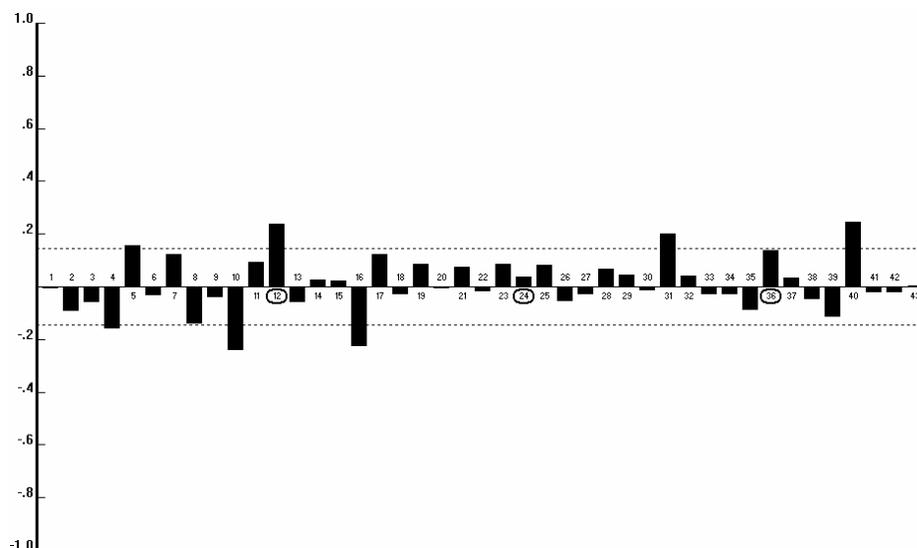
Percebe-se pela Figura 10 que a FAC decresce muito lentamente o que corrobora a constatação da não estacionariedade da série. Além disso, observa-se uma tendência de crescimento linear no gráfico da série (Figura 9) com uma queda brusca por causa do racionamento de energia que vigorou de junho de 2001 a fevereiro de 2002. Tal linearidade indica que, provavelmente, a série é não-estacionária homogênea de grau 1. Para verificar tal hipótese, deve-se analisar os gráficos da FAC e da FACP da série diferenciada, ou seja, após a primeira diferença (Figuras 12 e 13).

Figura 12 - Gráfico da Função de Autocorrelação(FAC) após a 1ª diferença



Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

Figura 13 - Gráfico da Função de Autocorrelação Parcial(FACP) após a 1ª diferença



Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

Pela Figura 12, vê-se que a FAC indica correlações não significativas⁴⁰ nos *lags* iniciais após a primeira diferença, confirmando que a série possui uma ordem de diferenciação $d=1$. Percebe-se também que o comportamento da FACP é muito

⁴⁰ Pode parecer uma contradição o que foi dito pois os *lags* iniciais 5, 10 e 16 estão na fronteira de significância. Entretanto, não há explicação lógica para autocorrelações significantes nestes *lags*. Portanto, estas serão tratadas como correlações espúrias.

parecido com o da FAC nos *lags* não-sazonais, ou seja, a FACP também indica *lags* iniciais não significativos. Estas correlações não significantes em *lags* iniciais indicam a ausência de termo autoregressivos e de médias móveis, conforme aponta a Tabela 3. Portanto, de acordo com a metodologia Box & Jenkins, pode-se identificar esse modelo como sendo ARIMA(0,1,0)⁴¹.

Entretanto, analisando os *lags* sazonais (12, 24, 36, etc.), vê-se que na FAC estes decrescem, enquanto que a FACP apresenta um corte no *lag* 1 sazonal (ou *lag* 12). Comparando essas observações com a Tabela 3, conclui-se que o modelo possui uma estrutura AR(1) na parte sazonal.

Finalmente, frente a estas considerações, foi identificado um modelo SARIMA (0,1,0)x(1,0,0)₁₂. Pela formulação geral de um modelo SARIMA vista no tópico 3.6, tem-se que um modelo SARIMA (0,1,0)x(1,0,0)₁₂ possui equação teórica da forma:

$$(1 - \Phi_1 B^{12}) \nabla^1 Z_t = \varepsilon_t$$

$$(1 - \Phi_1 B^{12})(1 - B)Z_t = \varepsilon_t$$

$$(1 - \Phi_1 B^{12})(Z_t - Z_{t-1}) = \varepsilon_t$$

$$Z_t - Z_{t-1} - \Phi_1 Z_{t-12} + \Phi_1 Z_{t-13} = \varepsilon_t$$

$$Z_t = Z_{t-1} + \Phi_1 Z_{t-12} - \Phi_1 Z_{t-13} + \varepsilon_t$$

$$Z_t = Z_{t-1} + \Phi_1 (Z_{t-12} - Z_{t-13}) + \varepsilon_t$$

Esta última equação é o modelo SARIMA identificado para o consumo de energia elétrica no Brasil no período considerado, ou seja, de janeiro de 1992 a setembro de 2007. Esta formulação matemática indica que o consumo no mês atual é influenciado pelo consumo no mês anterior, o consumo em doze meses atrás e o consumo em 13 meses atrás. Existe uma coerência lógica nesta formulação, pois o consumo do mês anterior indica um certo componente “inercial” do consumo de energia, na medida que o consumo anterior seria um “indicador” do padrão de consumo para o próximo mês. Já a influência do consumo de 12 meses atrás se deve à sazonalidade característica do consumo de energia elétrica e que está sendo corretamente incorporada ao modelo⁴². Por sua vez, existe uma correlação entre o

⁴¹ Isto na parte chamada “não sazonal” do modelo. Para se contemplar a sazonalidade, é analisado o padrão de correlação nos *lags* sazonais que, neste caso, para séries mensais, são os 12, 24, 36, etc.

⁴² Em modelos por classe, por exemplo, vê-se comportamento periódico padrão na atividade industrial, com incremento de consumo em determinados períodos do ano devido ao aquecimento da atividade econômica. Por outro lado, o consumo residencial aumenta em meses de verão devido ao aumento da temperatura.

consumo de 12 meses atrás com o seu mês antecedente, ou seja, o consumo de 13 meses atrás.

Após a estimação do modelo, passou-se à fase de estimação do parâmetro Φ_1 que teve valor estimado em 0,3699, significativa estatisticamente (p-valor = 0,00). O modelo de Box & Jenkins identificado para o consumo de energia elétrica no país assume, então, a seguinte equação de previsão:

$$Z_t = Z_{t-1} + 0,3699(Z_{t-12} - Z_{t-13}) + \varepsilon_t$$

onde:

Z_t é o consumo de energia elétrica no tempo t ;

Z_{t-1} é o consumo de energia elétrica no tempo $t-1$;

Z_{t-12} é o consumo de energia elétrica no tempo $t-12$;

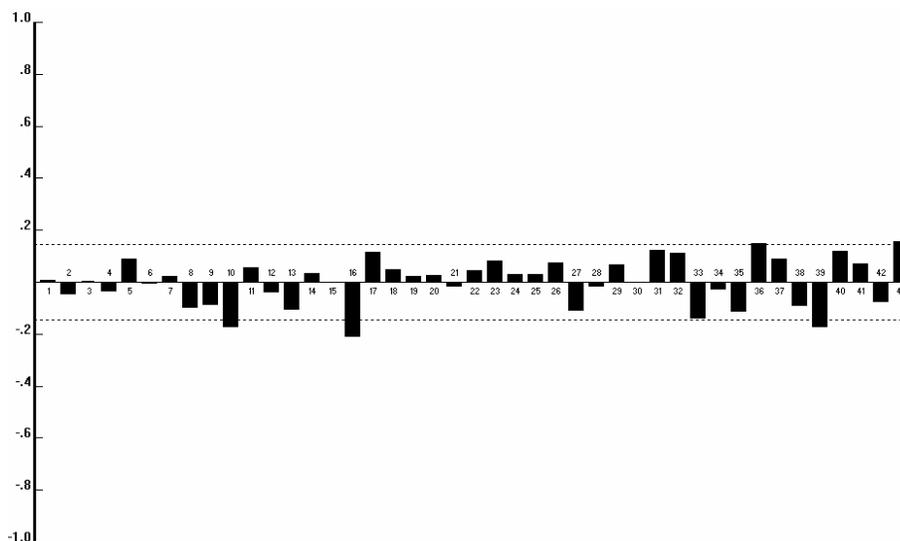
Z_{t-13} é o consumo de energia elétrica no tempo $t-13$; e

ε_t é o ruído no tempo t .

Após estimado os parâmetros, fez-se testes de aderência e também mensurou-se o desempenho preditivo do modelo através do cálculo de algumas medidas de desempenho como o erro absoluto médio percentual (MAPE) e o coeficiente de explicação (R^2 ajustado). Foram encontrados MAPE⁴³ igual a 1,75% e R^2 ajustado de 97,63%, indicando que este modelo errou 1,75%, em média, para baixo ou para cima, nas previsões para o mês seguinte. Por sua vez, este modelo explica também cerca de 97,63% da variação do consumo de energia elétrica no Brasil neste período. Dentro do teste de aderência, foi verificado se os erros gerados por este modelo não apresentam correlação, ou seja, se são gerados por um processo ruído branco. Utilizou-se o teste de Ljung-Box, corroborado pelo gráfico de autocorrelação dos erros (Figura 14).

⁴³ MAPE: *Mean Absolute Percentual Error*. Estas medidas de desempenho serão abordadas de forma mais detalhada posteriormente.

Figura 14 - Gráfico da Função de Autocorrelação (FAC) dos Erros



Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

O teste de Ljung-Box testa a hipótese nula de que as correlações dos erros nos primeiros k lags são iguais a zero⁴⁴. O p-valor associado a este teste foi de 0,053, aceitando-se a hipótese do teste a 5% de significância. Já pelo Figura 14, pode-se considerar que as autocorrelações são insignificantes em todos os *lags*.⁴⁵

Finalmente, foram feitos testes de sobrefixação⁴⁶ e os modelos estimados apresentaram parâmetros não-significantes ou presença de correlação nos resíduos, indicando, portanto, que o modelo inicialmente estimado, realmente, é o mais pertinente.

Por fim, percebe-se que, neste item, atingiu-se um dos objetivos primordiais de análise de uma série temporal, segundo a metodologia Box & Jenkins, que consiste no fato de dada a existência de uma série temporal não “branca” (isto é, que apresenta uma estrutura de dependência serial), achar o modelo matemático que descreve esta dependência serial e a transforme num ruído branco.

Estes primeiros resultados indicam o início da modelagem da série de consumo de energia elétrica no Brasil. Aplicou-se a metodologia de Box & Jenkins⁴⁷

⁴⁴ O FPW testa a significância das correlações nos primeiros 18 *lags*.

⁴⁵ Mais uma vez as autocorrelações presentes na fronteira de significância serão tratadas como correlações espúrias, pelo mesmo motivo anterior.

⁴⁶ Foram estimados modelos SARIMA $(0,1,0) \times (2,0,0)_{12}$, $(0,1,0) \times (1,0,1)_{12}$, $(1,1,0) \times (1,0,0)_{12}$ e $(0,1,1) \times (1,0,0)_{12}$.

⁴⁷ Sabe-se que poderia ter sido utilizada também a metodologia de estimação de função de transferência que consiste no modelo causal de Box & Jenkins (ver Box&Jenkins, 1994). Entretanto,

chegando-se a um modelo com bom desempenho preditivo e que cumpre a hipótese de gerar ruídos não correlacionados. Por fim, atenta-se que a estrutura de “defasagem” (*lags*) encontrada pode gerar informações importantes para a construção do modelo de Regressão Dinâmica a seguir.

4.2 - Resultados da Metodologia de Regressão Dinâmica

Para a estimação do modelo de regressão dinâmica para o consumo de energia elétrica no Brasil foi utilizada, além das variáveis causais descritas no Quadro 5 na seção 3.4, uma variável *dummy* a fim de captar os efeitos do racionamento de energia ocorrido no período de junho de 2001 a fevereiro de 2002.

É importante salientar que optou-se pela forma LOG-LOG, ou seja, trabalhou-se com o logaritmo neperiano das variáveis⁴⁸. Após todos os diagnósticos de causalidade e dinâmica⁴⁹, bem como os testes de aderência, o modelo estimado possui a seguinte equação⁵⁰:

$$\ln(Z)_t = 0,87 + 0,12\ln(\text{prod_X6})_t + 0,85\ln(Z)_{t-1} - 0,03\text{racionamento} + 0,45\varepsilon_{t-12}$$

[0,23]
[0,03]
[0,03]
[0,00]
[0,07]

onde:

$\ln(Z)_t$ é o logaritmo neperiano do consumo de energia elétrica no tempo t ;

$\ln(\text{prod_X6})_t$ é o logaritmo neperiano da produção industrial geral no tempo t ;

$\ln(Z)_{t-1}$ é o logaritmo neperiano do consumo de energia elétrica no tempo $t - 1$;

racionamento é a variável *dummy* que modela o racionamento ocorrido entre junho de 2001 e fevereiro de 2002;

ε_{t-12} é o ruído em $t - 12$.

não era objetivo desta dissertação. Como já explicitado, o objetivo é partir de um modelo autoprotetivo e chegar num modelo causal estimado pela metodologia de Regressão Dinâmica.

⁴⁸ Um dos motivos é poder fazer a leitura dos coeficientes de regressão na forma de coeficientes de elasticidade. Para maiores detalhes, ver Zanini (2000).

⁴⁹ O procedimento de estimação, os testes de causalidade e dinâmica seguem no Anexo 01.

⁵⁰ Os valores entre colchetes são os erros-padrões dos coeficientes.

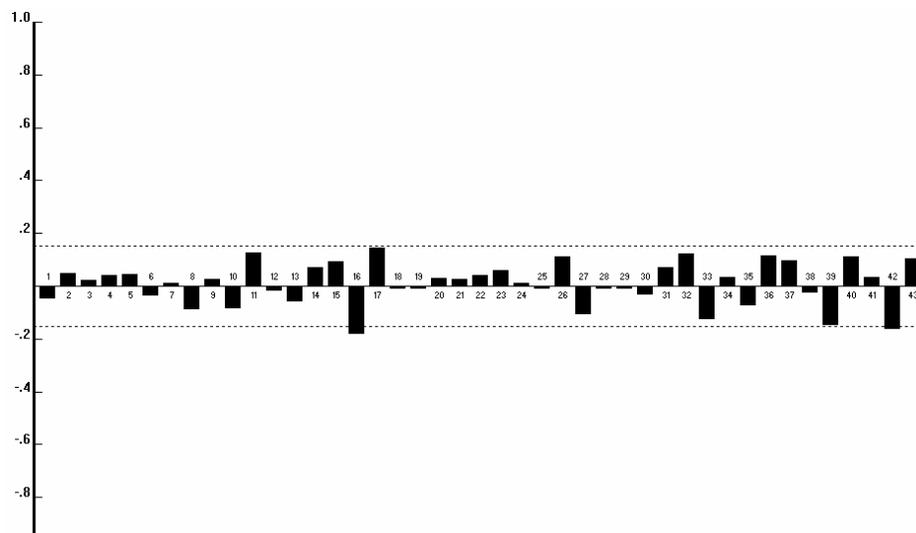
É importante observar que todos os coeficientes apresentaram significância estatística. Atenta-se ainda para o aspecto lógico da equação acima. Percebe-se, neste sentido, que os coeficientes, além de significativos, possuem o sinal esperado. De cerca das 35 variáveis causais testadas através do teste de especificação de variáveis, observa-se que a única selecionada para compor a equação é uma variável que expressa o índice de produção da indústria geral (prod_X6). Desta forma, o coeficiente positivo (igual a 0,12) indica que um aumento na atividade econômica, implicaria num maior consumo de energia elétrica por parte dos diversos setores da economia. Fazendo ainda a leitura em termos de elasticidade, pode-se dizer que um aumento de 10% no índice de produção da indústria geral implicaria num aumento de 1,2% no consumo total de energia elétrica no Brasil. De maneira análoga, pode-se verificar a consistência do sinal esperado negativo para a variável *dummy* de racionamento, já que o objetivo do racionamento é diminuir o consumo de eletricidade.

Analisando os resultados dos testes de dinâmica, vê-se a presença da variável dependente defasada em $t-1$ e do erro estruturado em $t-12$. A presença da variável dependente defasada em $t-1$ na equação acima é responsável por modelar a tendência da série de consumo de energia elétrica no Brasil. Por sua vez, a presença do termo de erro em $t-12$ se deve à característica sazonal da série, característica esta já verificada pela modelagem Box & Jenkins⁵¹.

Além dos testes de dinâmica e de especificações de variáveis causais utilizados para obter a equação acima, deve-se observar o gráfico da função de autocorrelação dos resíduos com o intuito de verificar se alguma “estrutura” característica da variável dependente não foi capturada pelo modelo estimado.

⁵¹ Neste momento é importante ressaltar que os testes de dinâmica indicaram que tanto a variável dependente quanto o termo de erro defasados em $t-12$ poderiam compor a equação. Entretanto, o termo de erro gerou melhores resultados ao se realizar os testes de aderência, particularmente o teste de Ljung-Box.

Figura 15 - Gráfico da Função de Autocorrelação (FAC) dos Erros do Modelo de Regressão Dinâmica



Fonte: Elaboração própria, com o auxílio do software FPW

Como pode ser visto na Figura 15, os termos de erros não apresentam correlação⁵² indicando que o erro gerado por este modelo se comporta como um processo ruído branco. O teste de Ljung-Box para este modelo apresentou p-valor igual a 0,17 indicando, portanto, ausência de correlação dos erros gerados pelo modelo.

Por fim, acredita-se que houve uma evolução na modelagem do consumo de energia já que se tentou buscar outras variáveis, além da própria série, que pudessem fornecer maiores informações sobre o consumo de energia elétrica do país.

Como se tem neste momento dois modelos obtidos através de metodologias distintas, na próxima seção será adotada uma heurística de comparação do desempenho preditivo destes.

⁵² Exceto pelo lag 16. Como a correlação é pequena e não tem explicação lógica, será tratada com espúria.

4.3 - Comparação dos modelos

Chega-se, neste momento, a um passo importante da metodologia desenvolvida no presente estudo. Após partir de um modelo autoprotetivo e chegar a um modelo de regressão dinâmica que inclui variáveis causais, realizar-se-á uma análise comparativa dos resultados obtidos através destes modelos.

Com o objetivo de enriquecer a comparação entre os modelos, foram calculadas estatísticas que visam medir o desempenho preditivo dos mesmos tanto dentro da amostra (*in-sample*) quanto fora desta (*out-of-sample*). Para analisar o desempenho fora da amostra, foram utilizados os dados dos últimos 9 meses, ou seja, foram retirados da amostra os dados referentes aos meses de janeiro a setembro de 2007. Feito isto, os parâmetros da equação são novamente estimados calculando-se, com origem em dezembro de 2006, a previsão para todo o período fora da amostra, ou seja, nove previsões. Tem-se, neste momento, uma previsão para cada horizonte, ou seja, uma previsão para 1 mês à frente, 1 previsão para 2 meses à frente e assim sucessivamente. Depois, para maior robustez da análise, é feito um deslocamento da origem de previsão, isto é, através do mesmo modelo estimado com dados até dezembro de 2006, desloca-se a origem para janeiro de 2007, realizando-se as previsões para o período de fevereiro a setembro de 2007, ou seja, oito previsões. Este processo se repete até que se obtenha apenas uma previsão fora da amostra. Ao final, tem-se 9 previsões para 1 mês à frente, 8 previsões para 2 meses à frente, 7 previsões para 3 meses à frente e assim sucessivamente. Obtém-se assim um total de 45 previsões fora da amostra para diferentes horizontes. O Quadro 7 a seguir ilustra esta análise de avaliação fora da amostra.

Quadro 7 - Análise fora da amostra

HORIZONTE (2007)

ORIGEM	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set
		R	R	R	R	R	R	R	R
dez	P	P	P	P	P	P	P	P	P
jan	R	P	P	P	P	P	P	P	P
fev	R	R	P	P	P	P	P	P	P
mar	R	R	R	P	P	P	P	P	P
abr	R	R	R	R	P	P	P	P	P
mai	R	R	R	R	R	P	P	P	P
Jun	R	R	R	R	R	R	P	P	P
jul	R	R	R	R	R	R	R	P	P
ago	R	R	R	R	R	R	R	R	P

Fonte: Elaboração própria. Nota: R = consumo real de energia elétrica; P = previsão do consumo de energia elétrica. Obviamente, $R - P = \text{erro}$.

De posse de todas estas previsões, como são conhecidos obviamente os valores reais, é possível calcular várias medidas de desempenho. Pode-se, por exemplo, calcular o MAPE para as previsões relativas ao próximo mês (1 passo à frente). É possível fazer o mesmo para as previsões relativas a dois meses à frente. Obviamente, consegue-se ainda uma análise acumulada, mensurando-se o MAPE das 17 previsões, 9 para o mês seguinte e 8 para dois meses à frente. Isto é, a análise proposta possibilita a verificação do desempenho dos modelos para diferentes horizontes de previsão fora da amostra.

É importante ressaltar que, neste trabalho, além do MAPE, será calculado também para os diferentes horizontes fora da amostra, uma medida de comparação do erro do modelo em questão com o erro do modelo ingênuo (ou *Naive*). O modelo ingênuo usa como previsor sempre o último dado. Esta medida, chamada de GMRAE, é uma média geométrica da razão entre o erro do modelo estimado e o erro do modelo ingênuo. Obviamente espera-se que o modelo testado seja melhor do que o ingênuo e, para isto, o GMRAE deve assumir valores menores do que 1. As fórmulas de cálculo destas duas medidas de desempenho podem ser vistas a seguir:

i) MAPE (Mean Absolute Percentual Error⁵³)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100$$

ii) GMRAE (Geometric Mean Relative Absolute Error⁵⁴)

$$GMRAE = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \frac{\left| y_i - \hat{y}_i \right|}{\left| Z_i - \hat{Z}_i \right|}}, \text{ onde } \hat{Z}_i = Z_{i-1} \text{ (Método Naive (Ingênuo))}$$

Feitas estas considerações, nos Quadros 8 e 9 a seguir podem ser visualizadas estas estatísticas fora da amostra para cada um dos modelos. Já o Quadro 10 exibe um resumo das estatísticas calculadas para dentro e fora da amostra para ambos os modelos.

Quadro 8 - Desempenho do modelo Box & Jenkins fora da amostra

H	N	MAPE (%)	MAPE Acumulado (%)	GMRAE	GMRAE Acumulado
1	9	1,7	1,7	0,634	0,634
2	8	2,5	2,1	0,814	0,713
3	7	2,9	2,3	0,721	0,715
4	6	2,8	2,4	0,866	0,743
5	5	1,0	2,2	0,363	0,671
6	4	1,7	2,2	1,035	0,701
7	3	2,3	2,2	0,880	0,713
8	2	3,4	2,2	0,808	0,717
9	1	5,3	2,3	0,894	0,721

Fonte: Elaboração própria com ajuda do software FPW.

Nota: H = horizonte; N = quantidade de previsões.

⁵³ Erro médio absoluto percentual.

⁵⁴ Média geométrica da razão do erro absoluto.

Quadro 9 - Desempenho do modelo de Regressão Dinâmica fora da amostra

H	N	MAPE (%)	MAPE Acumulado (%)	GMRAE	GMRAE Acumulado
1	9	1,7	1,7	0,864	0,864
2	8	2,7	2,2	1,389	1,080
3	7	3,1	2,5	0,967	1,046
4	6	3,0	2,6	0,704	0,966
5	5	2,1	2,5	1,515	1,030
6	4	2,3	2,5	1,865	1,095
7	3	2,4	2,5	1,552	1,123
8	2	3,3	2,5	0,829	1,107
9	1	5,3	2,6	0,889	1,102

Fonte: Elaboração própria com ajuda do software FPW.

Nota: H = horizonte; N = quantidade de previsões.

Quadro 10 - Comparação entre os modelos Box & Jenkins e de Regressão Dinâmica

Modelo	<i>In-sample</i>		<i>Out-of-sample</i>			
	R ² ajustado(%)	MAPE (%)	MAPE (%)H=1 e N=9	MAPE (%) Acumulado	GMRAE H=1 e N=9	GMRAE Acumulado
Box & Jenkins	97,29	1,76	1,70	2,30	0,63	0,72
Regressão Dinâmica	97,06	1,70	1,70	2,60	0,86	1,10

Fonte: Elaboração própria. Nota: H = horizonte; N = quantidade de previsões.

Observa-se que, em geral, os modelos apresentaram um bom ajuste já que os R² ajustados apresentados por ambos ficaram por volta de 97%, indicando que os modelos explicam 97% da variação do consumo de energia elétrica do país. A estatística MAPE, por sua vez, indica que, dentro da amostra, ambos os modelos apresentaram erros menores que 2%.

Pode-se dizer que para a análise *out-of-sample* os modelos mantiveram o desempenho obtido na análise *in-sample*, pois os MAPE's apresentados ficaram muito próximos dos obtidos na análise anterior. Quando comparados com o modelo ingênuo, os modelos se sobressaíram já que as estatísticas GMRAE foram menores que 1.

As estatísticas acumuladas são importantes, pois indicam se as previsões se deterioram rapidamente com o aumento do horizonte de previsão. Neste caso, vê-se

que o MAPE acumulado dos modelos Box & Jenkins e de Regressão Dinâmica foram, respectivamente, iguais a 2,3% e 2,6% indicando que as previsões continuaram consistentes, mesmo com um horizonte de previsão maior. Analisando o GMRAE acumulado, percebe-se que o modelo Box & Jenkins manteve sua eficiência frente ao modelo ingênuo, porém, o modelo de Regressão Dinâmica apresentou GMRAE acumulado maior do que 1. Entretanto, esta estatística está próxima de 1, que é o valor desejado, e não é suficiente para invalidar os bons resultados do modelo comentados anteriormente.

É importante ressaltar que este procedimento de análise é apenas uma forma adicional de se analisar o desempenho do modelo. Obviamente não se quer projetar dados já conhecidos do consumo de energia, mas sim qual o consumo em um horizonte futuro. Desta forma, tendo em vista que os modelos estimados apresentaram um bom ajuste e uma boa capacidade de generalização, apresenta-se no tópico seguinte as previsões do consumo de energia elétrica no país, através dos modelos estimados, objetivo principal deste trabalho⁵⁵.

4.4 - Previsões

O horizonte de previsão escolhido para este presente trabalho é de 13 meses, ou seja, serão feitas as previsões para os 3 meses restantes de 2007 e para todo o ano de 2008.

As previsões geradas pelo modelo Box & Jenkins SARIMA(0,1,0)(1,0,0)₁₂ podem ser vistas no Quadro 11 a seguir.

⁵⁵ Neste momento, o período de dados utilizado como *out-of-sample*, ou seja, o período de janeiro a setembro de 2007 é reincorporado à amostra de dados, atualiza-se novamente os parâmetros e obtém-se as previsões.

Quadro 11 - Box & Jenkins: Previsões em GWh

Mês	Limite Inferior	Previsão	Limite Superior
10/2007	30.707	31.815	32.922
11/2007	30.346	31.912	33.478
12/2007	30.047	31.965	33.883
01/2008	29.716	31.930	34.144
02/2008	29.514	31.990	34.465
03/2008	29.576	32.288	35.000
04/2008	29.679	32.608	35.538
05/2008	29.135	32.266	35.398
06/2008	28.764	32.086	35.407
07/2008	28.445	31.946	35.447
08/2008	28.515	32.187	35.859
09/2008	28.824	32.659	36.495
10/2008	28.573	32.697	36.822
11/2008	28.339	32.733	37.128
12/2008	28.104	32.753	37.402

Fonte: Elaboração própria. Nota: Intervalo de Confiança de 95%.

Salienta-se que, como visto anteriormente, para se obter previsões por um modelo de regressão dinâmica é necessário fazer primeiro as previsões das variáveis causais que compõem o modelo. Isso quer dizer que para se obter previsões da série Y_t para $t+1$, $t+2$, $t+3$, etc, é necessário fornecer ao modelo os valores futuros do vetor de variáveis causais X_t . Se as previsões destas variáveis exógenas não forem apropriadas, o modelo de regressão dinâmica irá também gerar previsões inadequadas. Entretanto, isto caracteriza um aspecto importante dos modelos de regressão dinâmica que é a possibilidade de montagem de cenários.

O modelo de regressão estimado apresenta uma variável causal que pode ser vista como uma *proxy* para o nível de atividade econômica do país, além da variável *dummy* que modela o racionamento. Logo, deve-se projetar essas variáveis durante o horizonte de previsão escolhido de 13 meses para se obter as projeções do consumo de energia elétrica no país desejadas.

A variável *dummy* irá assumir valor 0 neste período, já que a probabilidade de racionamento de energia nos próximos 13 meses é pequena⁵⁶. Já para a variável

⁵⁶ Apesar da estiagem, que fez com que no início de janeiro o nível de chuvas atingisse o patamar mais baixo em 76 anos, o coordenador do grupo de estudos do Setor de Energia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Nivalde de Castro, acredita que não há possibilidade de racionamento de energia no país durante o ano de 2008. Segundo ele, a maior integração física entre os diferentes sistemas energéticos do país, além da existência de usinas termelétricas prontas para gerar energia garantem o abastecimento de energia à população. Entretanto, estudos indicam que há um aumento do risco de racionamento para os próximos anos. O ONS trabalha com o patamar de 6,8% de risco de déficit para 2008 e riscos crescentes para os anos seguintes, subindo

causal índice de produção da indústria geral serão projetados 3 cenários: um pessimista, um moderado e um otimista.

O cenário pessimista consiste numa diminuição de 5% do índice de produção da indústria geral durante o período de previsão. Por ser uma *proxy* de atividade econômica, estaria representando um período de recessão para a economia do país. As previsões obtidas para esse cenário podem ser vistas no Quadro 12.

Quadro 12 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário pessimista

Mês	Limite Inferior	Previsão	Limite Superior
10/2007	30.205	31.588	33.036
11/2007	29.650	31.455	33.369
12/2007	29.030	31.064	33.240
01/2008	28.442	30.610	32.943
02/2008	27.975	30.227	32.660
03/2008	28.142	30.492	33.039
04/2008	28.227	30.646	33.272
05/2008	27.803	30.229	32.868
06/2008	27.498	29.930	32.577
07/2008	27.303	29.740	32.395
08/2008	27.626	30.109	32.815
09/2008	28.065	30.601	33.365
10/2008	27.814	30.456	33.349
11/2008	27.566	30.276	33.252
12/2008	27.045	29.768	32.766

Fonte: Elaboração própria. Nota: Intervalo de Confiança de 95%.

Para o cenário moderado, foi mantido o comportamento da variável índice de produção da indústria geral dos meses anteriores. Representaria um período de estagnação da atividade econômica do país durante os 15 meses do horizonte de previsão. As previsões estimadas se encontram no Quadro 13.

Quadro 13 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário moderado

Mês	Limite Inferior	Previsão	Limite Superior
10/2007	30.217	31.601	33.049
11/2007	29.685	31.492	33.408
12/2007	29.095	31.134	33.315
01/2008	28.544	30.719	33.061
02/2008	28.119	30.382	32.828

para 7,2% em 2009 e 10% em 2010. Pelos cálculos da EPE, os riscos de 2008 ficariam em 3,3%, subindo para 3,8% em 2009 e 5,7% em 2010. Fontes: Sites O Globo – On Line e Portal Exame.

Quadro 14 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário moderado (continuação)

Mês	Limite Inferior	Previsão	Limite Superior
03/2008	28.336	30.702	33.266
04/2008	28.476	30.916	33.566
05/2008	28.106	30.559	33.226
06/2008	27.858	30.322	33.003
07/2008	27.723	30.198	32.894
08/2008	28.118	30.645	33.400
09/2008	28.635	31.222	34.043
10/2008	28.462	31.166	34.126
11/2008	28.303	31.085	34.141
12/2008	27.870	30.677	33.766

Fonte: Elaboração própria. Nota: Intervalo de Confiança de 95%.

Finalmente, o cenário otimista foi modelado com um aumento de 5%, ao longo do período de previsão⁵⁷, nas observações dos meses anteriores da variável índice de produção da indústria geral. Indicaria um crescimento de 5% da atividade econômica do país. As previsões para esse cenário podem ser vistas no Quadro 14 a seguir.

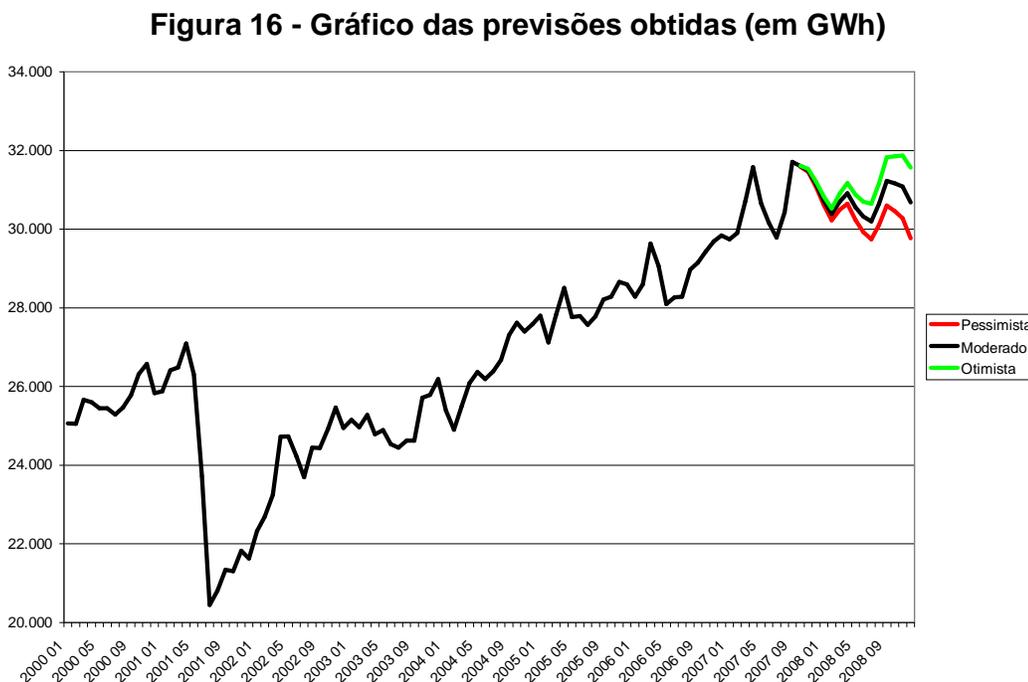
Quadro 14 - Regressão Dinâmica: Previsões em GWh para o cenário otimista

Mês	Limite Inferior	Previsão	Limite Superior
10/2007	30.205	31.588	33.036
11/2007	29.650	31.455	33.369
12/2007	29.030	31.064	33.240
01/2008	28.442	30.610	32.943
02/2008	27.975	30.227	32.660
03/2008	28.142	30.492	33.039
04/2008	28.227	30.646	33.272
05/2008	27.803	30.229	32.868
06/2008	27.498	29.930	32.577
07/2008	27.303	29.740	32.395
08/2008	27.626	30.109	32.815
09/2008	28.065	30.601	33.365
10/2008	27.814	30.456	33.349
11/2008	27.566	30.276	33.252
12/2008	27.045	29.768	32.766

Fonte: Elaboração própria. Nota: Intervalo de Confiança de 95%.

⁵⁷ Na verdade, o cenário otimista foi assim considerado tendo em vista a expectativa de crescimento da economia brasileira (PIB) em torno de 5% para o ano de 2008. Os cenários pessimista e moderado foram então considerados em torno deste cenário otimista. Como visto, o pessimista considerou uma queda da atividade nesta mesma magnitude e o moderado considerou uma estagnação da atividade econômica.

Para uma melhor visualização do comportamento das previsões, a Figura 16 exibe o gráfico das previsões de todos os cenários.



Fonte: Elaboração própria.

Observando apenas os valores esperados nos três cenários, vê-se no Quadro 15, a seguir, os dados anuais de consumo de energia elétrica projetado. Observa-se que os três cenários projetam um crescimento do consumo da ordem de 6,2% para o ano de 2007 em relação ao ano anterior. Para 2008, os cenários pessimista e moderado indicam uma queda de, respectivamente, 1,5% e 0,1%. Já o cenário otimista expressa um crescimento de 1,34% no consumo para o ano de 2008. É importante lembrar que o modelo de regressão dinâmica estimado contempla ainda a possibilidade de cenários para a ocorrência ou não de racionamento.

Quadro 15 - Consumo de Energia (em GWh) – valores anuais

	Pessimista	Var(%)	Moderado	Var(%)	Otimista	Var(%)
2.000	307.530	-	307.530	-	307.530	-
2.001	283.259	-7,89%	283.259	-7,89%	283.259	-7,89%
2.002	289.867	2,33%	289.867	2,33%	289.867	2,33%
2.003	300.992	3,84%	300.992	3,84%	300.992	3,84%
2.004	317.428	5,46%	317.428	5,46%	317.428	5,46%

Quadro 15 - Consumo de Energia (em GWh) – valores anuais (continuação)

	Pessimista	Var(%)	Moderado	Var(%)	Otimista	Var(%)
2.005	335.917	5,82%	335.917	5,82%	335.917	5,82%
2.006	347.312	3,39%	347.312	3,39%	347.312	3,39%
2.007*	368.779	6,18%	368.899	6,22%	369.013	6,25%
2.008	363.090	-1,54%	368.599	-0,08%	373.941	1,34%

Fonte: Elaboração própria. Nota:*Valores de outubro a dezembro de 2007 projetados.

4.5 – Análise do racionamento sob a ótica do modelo Box & Jenkins

Nesta seção, será apresentada uma análise sobre o impacto causado pelo racionamento de energia, ocorrido entre junho de 2001 e fevereiro de 2002, sobre o padrão de consumo atual, usando-se a metodologia Box & Jenkins. Para este fim será adotada a seguinte abordagem:

- (i) será estimado um modelo de Box & Jenkins a partir dos dados anteriores à ocorrência do racionamento, portanto, de janeiro de 1992 a maio de 2001.
- (ii) Com o modelo estimado no passo (i), serão feitas previsões para o período de junho de 2001 a setembro de 2007.
- (iii) Comparar-se-á as previsões obtidas no passo (ii) com os dados reais de consumo verificados neste período, calculando-se a diferença percentual entre eles. O índice de comparação entre eles poderia ser visto, a princípio, como uma medida do impacto do racionamento sobre o padrão atual de consumo.

Sendo assim, com dados anteriores ao racionamento, utilizou-se o mesmo procedimento descrito na seção 3.2⁵⁸. Verifica-se então que o modelo estimado para este período é um modelo SARIMA (0,1,1)x(1,0,1)₁₂ de equação teórica:

$$(1 - \Phi_1 B^{12}) \nabla^1 Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \Theta_1 B^{12}) \varepsilon_t$$

$$(1 - \Phi_1 B^{12})(1 - B)Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \Theta_1 B^{12}) \varepsilon_t$$

$$Z_t - Z_{t-1} - \Phi_1 Z_{t-12} + \Phi_1 Z_{t-13} = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \Theta_1 \varepsilon_{t-12} + \theta_1 \Theta_1 \varepsilon_{t-13}$$

$$Z_t = Z_{t-1} + \Phi_1 (Z_{t-12} - Z_{t-13}) - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \Theta_1 \varepsilon_{t-12} + \theta_1 \Theta_1 \varepsilon_{t-13} + \varepsilon_t$$

⁵⁸ Os gráficos dos correlogramas necessários para a modelagem encontram-se no Anexo 02.

Após a identificação da ordem do modelo, estimou-se os parâmetros presentes na equação teórica encontrando-se os valores de $\Phi_1 = 0,9995$, $\theta_1 = 0,6771$ e $\Theta_1 = 0,8804$, todos estatisticamente significativos (p-valor = 0,00). Portanto, o modelo estimado considerando-se apenas as observações anteriores ao racionamento possui equação da forma:

$$Z_t = Z_{t-1} + 0,9995(Z_{t-12} - Z_{t-13}) - 0,6771\varepsilon_{t-1} - 0,8804\varepsilon_{t-12} + 0,5961\varepsilon_{t-13}$$

onde:

Z_t é o consumo de energia elétrica no tempo t ;

Z_{t-1} é o consumo de energia elétrica no tempo $t-1$;

Z_{t-12} é o consumo de energia elétrica no tempo $t-12$;

Z_{t-13} é o consumo de energia elétrica no tempo $t-13$;

ε_{t-1} é o ruído no tempo $t-1$;

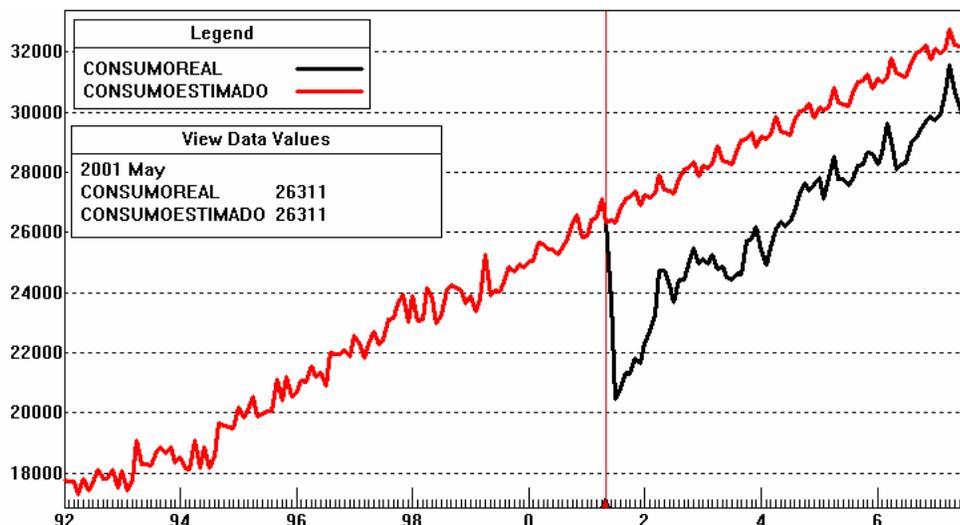
ε_{t-12} é o ruído no tempo $t-12$;e

ε_{t-13} é o ruído no tempo $t-13$.

Desta forma, obteve-se um modelo⁵⁹ para explicar o comportamento do consumo de energia do país antes do acontecimento do racionamento. Com isso, pode-se estimar o consumo de energia elétrica para os meses seguintes (junho de 2001 a setembro de 2007), caso este não tivesse acontecido. A Figura 17 exhibe os gráficos do consumo real verificado e do consumo estimado caso não houvesse o racionamento de energia.

⁵⁹ Este modelo tem MAPE igual a 1,2% e poder de explicação igual a 98,5%.

Figura 17 - Comparação entre consumo real e consumo projetado por modelo BJ ajustado com dados anteriores ao racionamento



Fonte: Elaboração própria.

Na figura 17, pode-se visualizar que o último dado real utilizado para estimar o modelo de Box & Jenkins antes do racionamento é o de maio de 2001, mais especificamente igual a 26.311 GWh. A partir de junho de 2001, é que se pode então visualizar a diferença entre o consumo estimado pelo modelo de Box & Jenkins, caso não tivesse acontecido o racionamento, e o consumo real verificado.

O quadro 16 a seguir exibe o consumo projetado agregado anualmente em comparação com o consumo verificado, bem como a diferença percentual entre estes dados de consumo e que poderia ser vista, a princípio, como uma proxy do percentual de energia elétrica economizada.

Quadro 16 - Comparação entre consumo verificado e previsto pelo modelo Box & Jenkins com dados antes do racionamento

Período	Consumo verificado (GWh)	Consumo previsto (GWh)	Percentual "economizado" (%)
Racionamento ⁽¹⁾	196.095	242.534	19,15
2001 ⁽²⁾	151.076	188.119	19,69
2002	289.867	331.918	12,67
2003	300.992	343.528	12,38

Quadro 16 - Comparação entre consumo verificado e previsto pelo modelo Box & Jenkins com dados antes do racionamento (continuação)

Período	Consumo verificado (GWh)	Consumo previsto (GWh)	Percentual “economizado”(%)
2004	317.428	355.130	10,62
2005	335.917	366.722	8,40
2006	347.312	378.311	8,19
2007 ⁽³⁾	274.671	291.028	5,62

Fonte: Elaboração própria. Nota: (1) junho de 2001 a fevereiro de 2002; (2) junho a dezembro de 2001; (3) janeiro a setembro de 2007.

De acordo com as previsões obtidas, pode-se inferir que durante o período do racionamento houve uma economia de cerca de 19%, pois o consumo verificado durante o período foi de 196.095 GWh enquanto que o consumo previsto foi de 242.534 GWh.

Nota-se também que a economia de energia se manteve mesmo após o fim do racionamento. Por exemplo, em 2003 é verificada uma economia de 42.536 GWh, o equivalente a 12,38%. Tal fato poderia ser explicado pela mudança nos hábitos da população.

Entretanto, nota-se que tal economia tem diminuído ao longo do tempo, indicando que o padrão de consumo pós-racionamento está se aproximando do patamar esperado caso este evento não houvesse acontecido.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou enfatizar a importância da energia elétrica para o desenvolvimento das regiões, em especial do Brasil, e da necessidade de previsão do consumo de energia elétrica nos mais diversos horizontes.

A energia elétrica é parte importante da infra-estrutura de qualquer região, visto que serve de insumo para diversos setores da economia e é imprescindível para que a população, em geral, goze de uma melhor qualidade de vida. Além disso, a eletricidade é uma fonte flexível e confiável de energia, além de não emitir poluentes, ao contrário de outras fontes como carvão, petróleo e gás. Entretanto, possui a peculiar característica de não poder ser armazenada e, no caso do Brasil, o setor elétrico necessita de grandes investimentos a longo prazo porque, predominantemente, as fontes de energia do país são hidráulicas. Por isso, este setor demanda de uma grande atenção por parte dos planejadores e formuladores de políticas públicas do país.

O presente estudo procurou também dissertar sobre a evolução do setor elétrico brasileiro, enfatizando as reformas ocorridas em meados dos anos 90 com a privatização das empresas do setor e a criação de instituições que passaram a ter papéis fundamentais no que foi denominado de “novíssimo” modelo institucional do setor elétrico brasileiro. Entre as instituições criadas pode-se destacar a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, responsável, em linhas gerais, por intermediar as relações entre governo, empresas e consumidores; o Operador Nacional do Sistema, ONS, que tem como objetivo coordenar e controlar a operação das

instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional, tendo em vista as características do parque gerador brasileiro onde se exige uma coordenação de operação das usinas hidrelétricas; e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, CCEE, que tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica entre os agentes do Sistema Interligado Nacional, além de efetuar a contabilização e a liquidação financeira das operações realizadas no mercado de curto prazo.

Também foi enfatizado no presente estudo o funcionamento do mercado *spot*, também denominado mercado de curto prazo, que no caso do Brasil possui os preços calculados semanalmente, baseados em um despacho “*ex-ante*”, ou seja, em previsões de consumo e geração de energia feitas pelos agentes do setor. Tal fato justifica a importância do principal objetivo deste estudo que visa obter modelos de previsão para o consumo de energia elétrica no Brasil.

O capítulo dois desta dissertação mostrou como foi a evolução do setor de energia elétrica, evidenciando as incertezas inerentes a este setor, bem como a necessidade de se ter um bom planejamento de mercado para subsidiar as operações de compra e venda de energia. Desta forma, este trabalho, ao se dedicar à elaboração de um modelo de previsão do consumo de energia elétrica no médio prazo, fornece informações que podem contribuir para minimizar as incertezas envolvendo este horizonte de planejamento. Este fato é corroborado pelo bom desempenho preditivo dos modelos ajustados.

Quanto à modelagem propriamente dita, optou-se por uma estratégia “*bottom-up*”, ou seja, primeiramente estimou-se um modelo que levasse em consideração apenas o comportamento passado da série de consumo de energia elétrica do país e que poderia fornecer informações importantes para o modelo de regressão dinâmica estimado posteriormente. O modelo de regressão dinâmica, além do comportamento passado da série em estudo, levaria em consideração outras diversas variáveis econômicas como taxa de câmbio, comércio, emprego, juros, preços, produção industrial e renda.

Usando-se a metodologia desenvolvida por Box & Jenkins, foi obtido um modelo SARIMA $(0,1,0) \times (1,0,0)_{12}$, que captou a característica sazonal do consumo de energia elétrica. Também foram realizados testes de sobrefixação, de aderência e de desempenho, concluindo-se que o modelo estimado era satisfatório.

Após a estimação do primeiro modelo, partiu-se para a estimação do modelo de regressão dinâmica que incorpora outras possíveis variáveis causais, aproximando-se mais da realidade. Para este fim, foram definidas 35 possíveis variáveis causais, representando fatores como nível de emprego, consumo, renda, dentre outros. O modelo estimado indicou que o consumo de energia elétrica está relacionado ao nível de atividade econômica do país, representado pela *proxy* produção da indústria geral⁶⁰. Com esta metodologia, também foi possível modelar o impacto do racionamento de energia ocorrido no país entre os meses de junho de 2001 a fevereiro de 2002 com o uso de uma variável *dummy*, verificando-se o resultado esperado que indica que o racionamento reduziu o consumo de eletricidade no país. Este modelo também passou por testes de aderência e desempenho que indicaram um bom ajuste.

Para enriquecer ainda mais a comparação dos modelos, foram feitas análises fora da amostra (*out-of-sample*) que visam verificar se as previsões dos modelos se sustentam com o aumento do horizonte de previsão. Tais análises também ratificaram o bom desempenho dos modelos estimados.

É importante observar que o modelo de regressão dinâmica estimado possibilita a elaboração de cenários em relação à oscilação do nível de atividade econômica (representada no modelo pelo índice de produção da industrial geral) bem como também em relação à perspectiva ou não da ocorrência de racionamento.

Adotando-se, por exemplo, um cenário otimista para o crescimento do nível de atividade econômica e considerando-se a não ocorrência de racionamento, o modelo de regressão dinâmica projetou um consumo de energia elétrica para o ano de 2008 da ordem de 373.940 GWh (crescimento de 1,34% em relação ao ano de 2007⁶¹). Entretanto, imaginando a existência de racionamento no segundo semestre de 2008 para este mesmo cenário, o valor do consumo cai para 357.129 GWh (variação de -3,22% em relação ao ano de 2007). É importante observar que o modelo causal estimado possibilita aos gestores este tipo de análise que tem o caráter apenas de subsidiar às decisões dos analistas do setor.

⁶⁰ Este resultado, por exemplo, pode ser corroborado por uma série de trabalhos que relacionam o consumo de energia com o Produto Interno Bruto (PIB). Entretanto, normalmente estes trabalhos são desenvolvidos sobre bases de dados anuais. Schmidt e Lima (2004), por exemplo, verificaram que a variável PIB, utilizada como *proxy* de renda, é a que mais interfere no consumo de energia elétrica.

⁶¹ Considerando-se os dados reais de janeiro a setembro e as previsões nos meses de outubro, novembro e dezembro, num total de 369.013 GWh.

A metodologia Box & Jenkins também possibilitou análises quanto aos impactos sobre o padrão de consumo de energia no Brasil trazidos pelo racionamento. Verificou-se que o patamar de consumo de energia elétrica no país diminuiu, mesmo após o fim do racionamento. Entretanto, há indícios de que o consumo esteja chegando ao nível esperado caso o racionamento não houvesse acontecido. Como consequência, o risco de racionamento vem aumentando com o passar dos anos e, de acordo com uma pesquisa do Instituto Acende Brasil, existe um risco de 6% da necessidade de racionamento para o ano de 2009 e de 8,5% para o ano de 2010.

Atenta-se, porém, que os modelos estimados possuem algumas carências. Ambos são modelos lineares e, portanto, não possuem a capacidade de modelar possíveis comportamentos não-lineares intrínsecos ao mundo real. Uma sugestão para um possível trabalho futuro seria o uso de alguma metodologia que suprisse tal carência. Em alguns estudos, por exemplo, verificou-se que o uso de redes neurais artificiais⁶², metodologia capaz de inferir relações não-lineares complexas, melhora o desempenho preditivo dos modelos.

Outra sugestão seria a utilização de variáveis climáticas como temperatura e umidade do ar com o objetivo de explicar o consumo de energia elétrica, pois, é bem sabido que tais variáveis interferem no consumo de energia. Além disso, a desagregação do consumo de energia para os setores residencial, comercial e industrial, dentre outros, poderia trazer resultados diferentes dado que se estaria captando as particularidades de cada setor. Ressalta-se, também, que a metodologia aplicada nesse estudo pode ser empregada para a previsão de qualquer outra série temporal de interesse.

É importante atentar para o fato da grande diversidade de trabalhos nesta mesma linha, ou seja, de elaboração de modelos de previsão de consumo de energia. Entretanto, estes trabalhos diferem entre si por diversos fatores como, por exemplo, a própria metodologia de estimação empregada, o horizonte de previsão, as variáveis consideradas, o tipo de série de energia, dentre outros fatores.

A bibliografia consultada⁶³ indica, por exemplo, aplicações para previsões de curtíssimo (previsão horária), curto (previsões diárias), médio (previsões mensais) e

⁶² Ver Zanini (2000) e Souza *et al* (2001).

⁶³ Ver Hippert *et al* (2005), Farinas *et al* (2004), Rizzo (2001), Souza *et al* (2001), Macrini (2000), Sobral (1999), Lourenço (1998), Lee *et al* (1992), Hsu e Yang (1991).

longo prazo (previsões anuais). Dentro de cada horizonte deste, pode ser encontrada a aplicação das mais diversas técnicas como, por exemplo, técnicas de inteligência artificial (como redes neurais, lógica *fuzzy*, dentre outras) para o curtíssimo e curto prazo; diversos modelos clássicos de séries de tempo (como Box & Jenkins, Amortecimento Exponencial, Estruturais, Regressão, dentre outros) para previsões de médio prazo; e modelos de cenarização para previsões de longo prazo (como técnicas de cenário Delphi). Podem ainda ser encontrados trabalhos com abordagem híbrida, utilizando-se, por exemplo, de modelos clássicos de séries de tempo associados a modelos de inteligência computacional. Por fim, existem ainda modelos estimados por classe, ou seja, específicos para o consumo de energia no setor industrial, comercial, residencial dentre outros.

Neste sentido, acredita-se, portanto, que o presente estudo contribuiu para ampliar este “estado da arte” da estimação de modelos, podendo assim auxiliar os planejadores e formuladores de políticas públicas já que, além de um estudo sobre o histórico do setor elétrico e das reformas sofridas por este, foram sugeridos dois modelos de previsão do consumo mensal de energia elétrica para o país: um autoprojetivo, onde a metodologia Box & Jenkins foi utilizada e que leva em consideração apenas os valores passados da série em estudo; e um que procura relacionar o consumo de energia elétrica com outras variáveis econômicas, o modelo de regressão dinâmica, que ainda possibilita a formulação de cenários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T. A.; LOBÃO, W. J. A. **Elasticidade renda e preço da demanda residencial de energia elétrica no Brasil**. Texto para discussão nº 489. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Rio de Janeiro, 1997.

ARAÚJO, M. A. G. **Previsão de demanda de energia elétrica por meio de redes neurais artificiais**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Administração. Porto Alegre, 2005.

AUDY, J. L. N.; BRODBECK, A. F. **Sistemas de informação: planejamento e alinhamento estratégico nas organizações**. Bookman. Porto Alegre, 2003.

BAHIENSE, D. A. **Reestruturação e descentralização do setor elétrico brasileiro : o novo modelo institucional**. Conjuntura & Planejamento, Salvador: SEI, n. 91, p. 18-23, dez. 2001.

BARROS, M.; SOUZA, R.C. **Regressão Dinâmica**. Núcleo de Estatística Computacional. PUCRio, 1995 .

BENITEZ, R. M. **A infra-estrutura, sua relação com a produtividade total dos fatores e seu reflexo sobre o produto regional**. Planejamento e políticas públicas. nº 19, Junho, 1999.

BORN, P.H.S ; ALMEIDA, A. A. **Mudanças estruturais no setor elétrico - formação e regulação de preços**. Revista CIER, v. 26, p. 01-08, 1998.

BOX, G. E. P., JENKINS, G. M. **Time Series Analysis, Forecasting and Control**. San Francisco, Holden-Day, 1994.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional. 2005**. Disponível em : <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 05 de abril de 2007.

_____. **Balanço Energético Nacional. 2006**. Disponível em : <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 05 de abril de 2007.

BURATINI, R. **Estado, capitais privados e concorrência no setor elétrico brasileiro: da constituição do modelo estatal à crise do modelo competitivo**. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas, 2004.

CARLSSON C.; TURBAN, E. DSS: directions for the next decade. Amsterdam, **Decision Support Systems**, v.33, n.2, p. 105-110, 2002.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, informações técnicas obtidas por meio de seu site: <http://www.ccee.org.br> . Acesso em: 10 de setembro de 2007.

COCHRANE, D.; ORCUTT, G.H.. **Application of Least Squares Regression to Relationships Containing Autocorrelated Error Terms**. Journal of the American Statistical Association, 44, p. 32-61, 1949.

COOPERS & LYBRAND. **Etapa IV - Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro – Relatório Consolidado Etapa IV-1**, Vol. I: Sumário Executivo, junho de 1997.

CORVALÃO, E. D. **Previsão da arrecadação do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços em Santa Catarina: aplicação da abordagem geral para específico em modelos dinâmicos**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Faculdade de Engenharia de Produção. Florianópolis, 2002.

DUDEWICZ, E.J.; MISHRA, S. N. **Modern Mathematical Statistics**. Wiley, 1988.

ELETROBRÁS. **Plano Decenal de Expansão 2003 / 2012**. CGPS. Rio de Janeiro. Brasil.2003.

_____ **Plano Decenal de Expansão 2006 / 2015**. CGPS. Rio de Janeiro. Brasil.2006.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Monitoramento, acompanhamento e análise do mercado de energia – Boletins mensais**. Disponíveis no site: <http://www.epe.gov.br>.

FARINAS, Mayte Suarez ; SOUSA, Rodrigo Lage de ; SOUZA, R. C. . A Methodology to Filter Time Series: Application to minute-by-minute Electric Load Series. **Pesquisa Operacional**, v. 24, n. 3, p. 355-371, 2004.

FELICIANO, R. (Coord.) **Panorama da memória da eletricidade no Brasil**. Rio de Janeiro:Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 1988.

GILBERT, C. L. Professor Hendry's econometric methodology. **Oxford Bulletin of Economics and Statistics**, v. 48, 283-307., 1986

GOEDEL, A. **Estimativa de conjugado de carga aplicado em eixo de motores de indução trifásicos através de redes neurais artificiais**. 2003. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. Bauru, 2003.

GOODRICH, R. L. **Applied Statistical Forecasting**. Belmont, Business Forecast Systems, 1989.

GOODRICH, R.L.; STELLWAGEN, E.A.. **Forecast Pro for Windows**. Business Forecast Systems, 1999.

HAMILTON, J. D. **Time Series**. Princeton, 1994.

HAYKIN, S. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. New Jersey, Prentice Hall, 2a Edição, 1999.

HIPPERT, Henrique S ; BUNN, Derek W ; SOUZA, R. C. . Large Neural Networks for Electricity Load Forecasting: Are they overfitted?. **International Journal Of Forecasting**, Estados Unidos - Elsevier B. V, v. 21, n. 3, p. 425-434, 2005.

HSU, Y., YANG, C., Design of Artificial Neural Networks for Short-Term Load Forecasting. Part I: Self-Organising Feature Maps for Day Type Identification, **IEE Proc., Generation, Transmission and Distribution**, vol. 138, no 5, sep. 1991, pp. 407-413.

LANDI, M. **Energia Elétrica e Políticas Públicas : a experiência do setor elétrico brasileiro no período de 1934 a 2005**. Tese (Doutorado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2006.

LEE, K. Y., CHA, Y. T. & Park, J. H., “Short-Term Load Forecasting Using an Artificial Neural Network”, **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 7, no 1, feb. 1992, pp. 124-132.

LIMA, J. L. **Estado e Energia no Brasil. O setor elétrico no Brasil: das origens à criação da Eletrobrás (1890 – 1962)**, IPE/USP, São Paulo, 1984.

_____ **Políticas de governo e desenvolvimento do setor de energia elétrica: do Código de águas à crise dos anos 80 (1934-1984)**. Memória da Eletricidade, Rio de Janeiro, 1995.

LORENZO, H. C. **O Setor elétrico Brasileiro: Passado e Futuro**. Perspectivas (São Paulo), São Paulo, v. 24-25, p. 147-170, 2003.

LOURENÇO, P.M., **Um Modelo de Previsão de Curto Prazo de Carga Elétrica Combinando Métodos Estatísticos e Inteligência Computacional**, PUC - Tese de Doutorado, junho, 1998.

MACRINI, J. L. R.. **Modelo de Previsão de Carga Utilizando Redes Neurais: Otimização Camada a Camada**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2000.

MATTOS, L. B. de; LIMA J. E. de. **Demanda residencial de energia elétrica em Minas Gerais: 1970-2002**. Nova Economia. Belo Horizonte, set/dez, 2005.

MEDEIROS, R. A. de. **O capital privado na reestruturação do setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro., 1993. Dissertação de Mestrado em Engenharia Nuclear. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993.

MYRDAL, Gunnar. **Teoria econômica e regiões sub-desenvolvidas**. Rio de Janeiro: Ed. Saga, 1957.

ORSELLI, A. C. **O setor elétrico estatal e a crise financeira dos anos 80: o caso da CPFL**. Monografia de Graduação, Departamento de Economia, FCL-UNESP, Araraquara, 1989.

PEDREIRA, C.E. **Redes Neurais**. (Notas de aula). PUC-Rio, 2000.

PEREIRA, J. S. **Petróleo, energia elétrica, siderurgia: a luta pela emancipação**. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1975.

PERROUX, François. **O conceito do pólo de desenvolvimento**. In: SCHWARTZMAN, J. (org.). Economia regional: textos escolhidos. Belo Horizonte: CEDEPLAR, p. 145 – 156, 1977.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometria – modelos e previsões**. tradução de: Econometric models and economic forecasts, 4th ed. Rio de Janeiro. Elsevier Editora Ltda, 2004.

PIRES, J. C. L. **Desafios da reestruturação do setor elétrico brasileiro**. Texto para discussão 76 – BNDES – Rio de Janeiro, 2000.

PIRES, J. C. L., PICCINNI, M. S. **A regulação dos setores de infra-estrutura no Brasil**. In: Giambiagi, F. M., M. M. (org). A Economia Brasileira nos anos 90. Rio de Janeiro: BNDES, 1999)

REIS, L. B. dos; SILVEIRA, S. **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo : Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

RIBEIRO, R. A.; RODRIGUES, A. J.; ZARATÉ, P. Decision support systems: current research. Amsterdam, **European Journal of Operational Research**, n.145, p.231, 2003.

RIZZO, G. M.. **Previsão de Carga de Curtíssimo prazo no Novo Cenário Elétrico Brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2001.

RUAS, Gabriel I. S.; BRAGATTO, Ticiano A. C.; LAMAR, Marcus V. ; AOKI, Alexandre R. ; ROCCO, S. M. **Previsão de Demanda de Energia Elétrica Utilizando Redes Neurais Artificiais e Support Vector Regression**. In: VI Encontro Nacional de Inteligência Artificial, 2007, Rio de Janeiro. Anais do XXVII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 2007. v. 1. p. 1262-1271.

SAES, F. A. M. **A grande empresa de serviços públicos na economia cafeeira**. São Paulo. Hucitec, 1986.

SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. M. **A demanda por energia elétrica no Brasil**. Revista Brasileira de Economia. Rio de Janeiro, jan/mar, 2004.

SCHWARTZMAN, J. **A teoria da base de exportação e o desenvolvimento regional**. In: HADDAD, P. R. (ed.). Desequilíbrios regionais e descentralização industrial. Rio de Janeiro: IPEA/IPLAN, p. 37-94, (Monografia n.16.), 1975.

SOBRAL, A.P.. **Modelo de Previsão Horária de Carga Elétrica para Light**. PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, 1999.

SOUZA, R. C., CAMARGO, M. E. **Análise e Previsão de Séries Temporais : Os Modelos ARIMA**. SEDIGRAF, 1996.

SOUZA, R. C. ; PEDREIRA, C. E. ; HIPPERT, Henrique Steinherz . Neural Networks for Short-Term Load Forecasting: A Review and Evaluation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Estados Unidos, v. 16, n. 1, p. 44-55, 2001.

VARIAN, H.R. **Microeconomia: Princípios Básicos**. Campus, 1997.

ZANINI, A. **Redes neurais e regressão dinâmica: um modelo híbrido para previsão de curto prazo da demanda de gasolina automotiva no Brasil**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

Anexo 1

Procedimentos e alguns dos testes usados para a estimação do modelo de regressão dinâmica

Passo 1- Estimação do modelo apenas com uma constante.

Forecast Model for ENERGIA with log transform
Regression(1 regressors, 0 lagged errors)

Term	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Significance
_CONST	10.058391	0.011500	874.623845	1.000000

Within-Sample Statistics

Sample size 189	Number of parameters 1
Mean 10.06	Standard deviation 0.1581
R-square 0	Adjusted R-square 0
Durbin-Watson 0.02771	** Ljung-Box(18)=2266 P=1
Forecast error 0.1581	BIC 3733
MAPE 0.1343	RMSE 3669
MAD 3078	

Variable specification test battery

CAMB_X1	Chi Square(1)=97.32	Percentile=1.0000 **
EMP_X1	57.53	1.0000 **
PROD_X6	126.25	1.0000 **
PROD_X9	4.37	0.9635 *
SR_X1	13.77	0.9998 **

Dynamics test battery

ENERGIA[- 1]	Chi Square(1)=180.86	Percentile=1.0000 **
ENERGIA[- 2]	175.60	1.0000 **
ENERGIA[- 3]	171.15	1.0000 **
_AUTO[- 1]	180.86	1.0000 **
_AUTO[- 2]	175.60	1.0000 **

Passo 2: Optou-se pelo teste de causalidade, inserindo-se, assim, a variável PROD_X6 ao modelo.

Forecast Model for ENERGIA with log transform
Regression(2 regressors, 0 lagged errors)

Term	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Significance
_CONST	6.004860	0.205727	29.188552	1.000000
Log(PROD_X6)	0.890857	0.045190	19.713550	1.000000

Within-Sample Statistics

Sample size 189	Number of parameters 2
Mean 10.06	Standard deviation 0.1581
R-square 0.6751	Adjusted R-square 0.6734
Durbin-Watson 0.494	** Ljung-Box(18)=590.1 P=1
Forecast error 0.09035	BIC 2158
MAPE 0.07125	RMSE 2042
MAD 1628	

Variable specification test battery

CAMB_X2	Chi Square(1)=31.52	Percentile=1.0000 **
CV_X5	79.45	1.0000 **
EMP_X1	97.59	1.0000 **
PRECOS_X6	6.45	0.9889 *
PROD_X1	14.32	0.9998 **

Dynamics test battery

ENERGIA[- 1]	Chi Square(1)=170.36	Percentile=1.0000 **
ENERGIA[- 2]	157.59	1.0000 **
ENERGIA[-12]	108.83	1.0000 **
_AUTO[- 1]	105.94	1.0000 **
_AUTO[-12]	94.39	1.0000 **

Passo 3: Neste momento, optou-se pelo teste de dinâmica, incluindo-se a variável energia defasada em um período no modelo.

Forecast Model for ENERGIA with log transform
Regression(3 regressors, 0 lagged errors)

Term	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Significance
_CONST	0.333781	0.135279	2.467357	0.986389
Log(PROD_X6)	0.073386	0.021996	3.336283	0.999151
Log(ENERGIA[-1])	0.933900	0.020128	46.398594	1.000000

Within-Sample Statistics

Sample size 188	Number of parameters 3
Mean 10.06	Standard deviation 0.1572
R-square 0.9739	Adjusted R-square 0.9737
Durbin-Watson 2.117	** Ljung-Box(18)=68.4 P=1
Forecast error 0.02552	BIC 617.3
MAPE 0.0179	RMSE 581.7
MAD 412.9	

Variable specification test battery

CAMB_X1	Chi Square(1)=0.54	Percentile=0.5385
JUROS_X2	2.41	0.8794
PROD_X11	0.19	0.3388
PRECOS_X4	0.84	0.6418
RACIONAMENTO	8.62	0.9967 **

Dynamics test battery

ENERGIA[- 2]	Chi Square(1)=0.45	Percentile=0.4958
ENERGIA[-12]	6.96	0.9916 **
ENERGIA[-24]	2.95	0.9141
_AUTO[- 1]	0.84	0.6409
_AUTO[-12]	21.13	1.0000 **

PASSO 4: O teste de causalidade indica a inclusão da variável racionamento no modelo.

Forecast Model for ENERGIA with log transform
Regression(4 regressors, 0 lagged errors)

Term	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Significance
_CONST	0.388713	0.133687	2.907638	0.996359
Log(PROD_X6)	0.082801	0.021760	3.805206	0.999858
RACIONAMENTO	-0.026003	0.008649	-3.006438	0.997357
Log(ENERGIA[-1])	0.924299	0.019961	46.304625	1.000000

Within-Sample Statistics

Sample size 188	Number of parameters 4
Mean 10.06	Standard deviation 0.1572
R-square 0.9752	Adjusted R-square 0.9748
Durbin-Watson 2.179	** Ljung-Box(18)=72.02 P=1
Forecast error 0.02499	BIC 611.1
MAPE 0.01821	RMSE 563.4
MAD 418.6	

Variable specification test battery

CAMB_X2	Chi Square(1)=2.34	Percentile=0.8739
CV_X1	18.35	1.0000 **
SR_X2	0.03	0.1382
PRECOS_X5	0.01	0.0628
PROD_X13	0.30	0.4151

Dynamics test battery

ENERGIA[- 2]	Chi Square(1)=1.62	Percentile=0.7976
ENERGIA[-12]	43.79	1.0000 **
ENERGIA[-24]	18.68	1.0000 **
_AUTO[- 2]	0.04	0.1610
_AUTO[-12]	24.92	1.0000 **

Passo 5: Inclui-se o erro auto-regressivo em t -12 com o objetivo de modelar a sazonalidade, como indica o teste de dinâmica.

Forecast Model for ENERGIA with log transform
Regression(4 regressors, 1 lagged errors)

Term	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Significance
_CONST	0.872590	0.233097	3.743463	0.999818
Log(PROD_X6)	0.120121	0.029658	4.050181	0.999949
RACIONAMENTO	-0.033540	0.007873	-4.260169	0.999979
Log(ENERGIA[-1])	0.859538	0.029761	28.881285	1.000000
_AUTO[-12]	0.450516	0.072284	6.232623	1.000000

Within-Sample Statistics

Sample size 176	Number of parameters 5
Mean 10.08	Standard deviation 0.1444
R-square 0.9748	Adjusted R-square 0.9742
Durbin-Watson 2.069	Ljung-Box(18)=23.43 P=0.8255
Forecast error 0.02319	BIC 586.1
MAPE 0.0169	RMSE 525.1
MAD 394.9	

Observação: Tendo em vista a coerência do modelo com a teoria econômica, a significância dos parâmetros e a indicação pelo teste de Ljung-Box de ausência de correlação dos erros, selecionou-se este modelo como sendo o final.

Anexo 2

Gráficos relativos ao modelo estimado na seção 4.5

Gráfico da função de autocorrelação

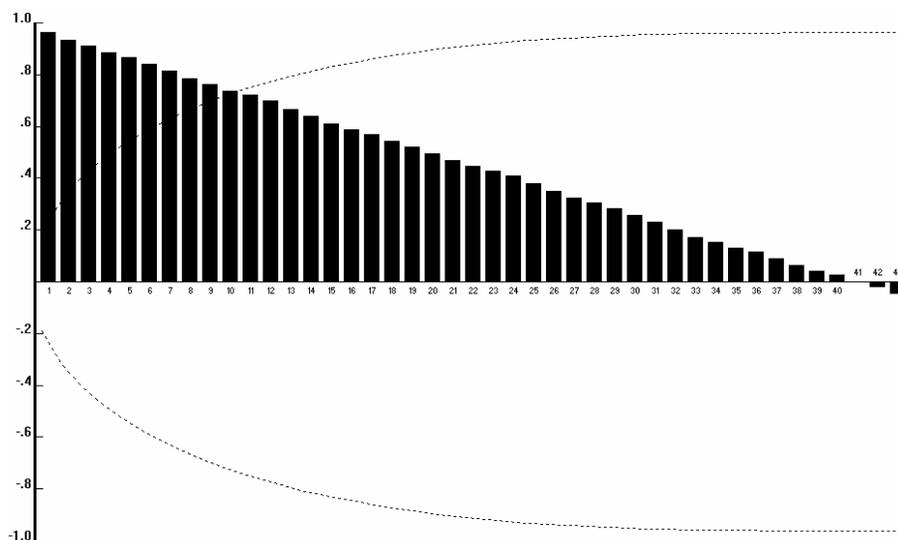


Gráfico da função de autocorrelação após a 1ª diferença

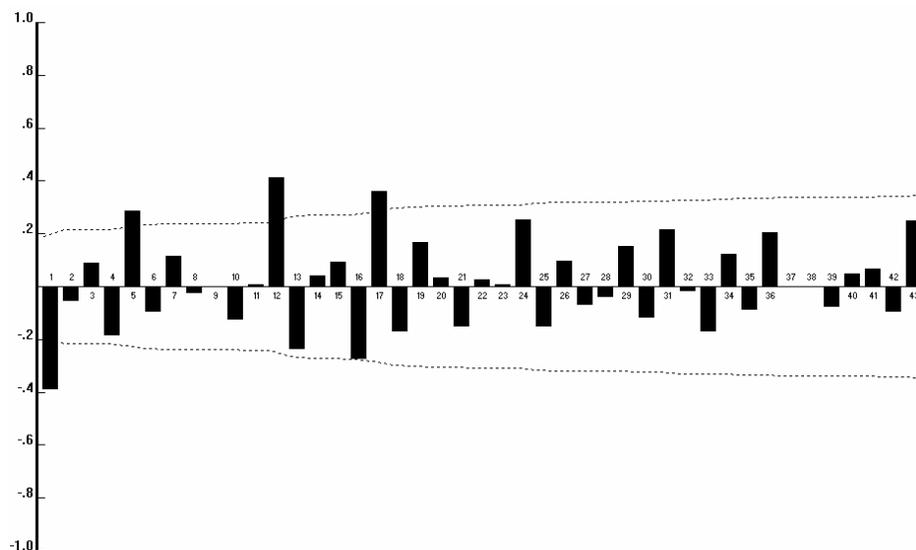


Gráfico da função de autocorrelação parcial após a 1ª diferença

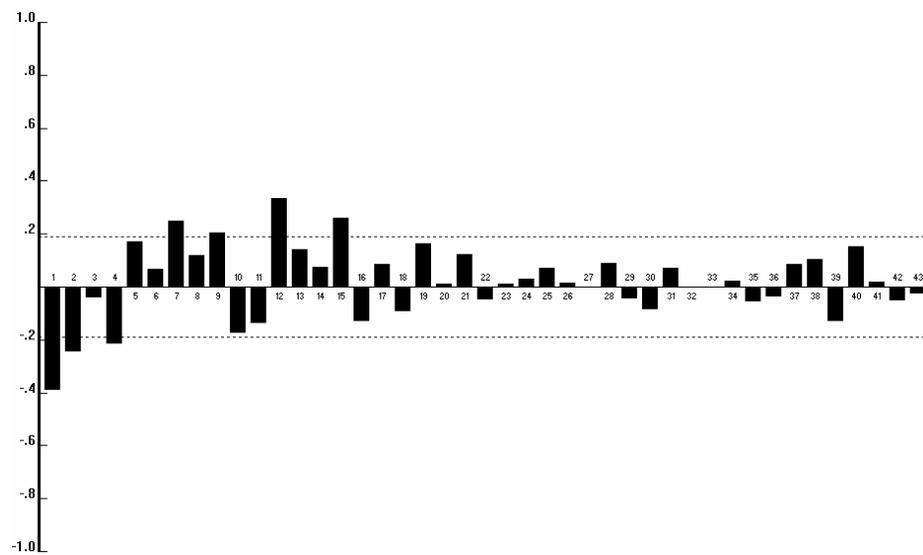


Gráfico da função de autocorrelação dos Erros

