



Luiz Felipe Moreira do Amaral

**Modelos lineares e não lineares na modelagem do preço
spot de energia elétrica do Brasil**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro

Abril de 2003



Luiz Felipe Moreira do Amaral

**Modelos lineares e não lineares na modelagem do preço
spot de energia elétrica do Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof^a. Mônica Barros

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Eduardo Campos

ENCE

Prof. Ney Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – Puc-Rio

Rio de Janeiro, 09 de abril de 2003

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

Luiz Felipe Moreira do Amaral

Graduou-se em Economia na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora) em 2000.

Ficha Catalográfica

Amaral, Luiz Felipe Moreira do

Modelos lineares e não lineares na modelagem do preço *spot* de energia elétrica do Brasil / Luiz Felipe Moreira do Amaral; orientador: Reinaldo Castro Souza. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[11], 69 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Séries temporais. 3. Regressão dinâmica. 4. Star. 5. Multiplicador de Lagrange. 6. Filtro de Kalman suavizado. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais: Luiz Augusto e Arlete. Se não fosse pelo incentivo, cobrança e apoio de vocês, não teria chegado onde estou atualmente. Mas ainda pretendo ir muito além! Muito obrigado!

Agradeço também ao meu orientador, Reinaldo Castro Souza, pelas oportunidades e idéias ao longo da criação do trabalho.

Agradeço a banca examinadora: Prof^ª. Mônica Barros e Prof. Eduardo Campos.

A essas pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu terminasse essa tese: Rafael, Ana Cláudia, Maria Cecília, Carolina, Zanini, Rodrigo, Adrian, André, Mayte, Guto, Leo's, Cris, Flavinha, Márcio, Eliane, Carlos, Christian, Ricardo, Pedro Paulo, Beatriz, Tia Isa e me desculpem se eu esqueci de alguém!

Por último, agradeço a CAPES e a PUC pelo apoio financeiro.

Resumo

Amaral, Luiz Felipe Moreira do; Souza, Reinaldo Castro. Modelos lineares e não lineares na modelagem do preço *spot* de energia elétrica do Brasil. Rio de Janeiro, 2003. 80p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação, estratégias de modelagem são apresentadas envolvendo modelos de séries temporais lineares e não lineares para modelar a série do preço *spot* no mercado elétrico brasileiro. Foram usados, dentre os lineares, os modelos ARIMA(p,d,q) proposto por Box, Jenkins e Reinsel (1994) e os modelos de regressão dinâmica. Dentre os não lineares, o modelo escolhido foi o *STAR* desenvolvido, inicialmente, por Chan e Tong (1986) e, posteriormente, por Teräsvirta (1994). Para este modelo, testes do tipo Multiplicador de Lagrange foram usados para testar linearidade, bem como para avaliar os modelos estimados. Além disso, foi também utilizada uma proposta para os valores iniciais do algoritmo de otimização, desenvolvido por Franses e Dijk (2000). Estimativas do filtro de Kalman suavizado foram usadas para substituir os valores da série de preço durante o racionamento de energia ocorrido no Brasil.

Palavras-chave

Séries temporais, Regressão Dinâmica, ARIMA(p,d,q), Modelo STAR, Multiplicador de Lagrange, Filtro de Kalman Suavizado.

Abstract

Amaral, Luiz Felipe Moreira do; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). Using Linear and non-linear approaches to model the Brazilian electricity spot price series. Rio de Janeiro, 2003. 80p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation, modeling strategies are presented involving linear and non-linear time series models to model the spot price of Brazil's electrical energy market. It has been used, among the linear models, the modeling approach of Box, Jenkins and Reinsel (1994) i.e., $ARIMA(p,d,q)$ models, and dynamic regression. Among the non-linear ones, the chosen model was the *STAR* developed, initially, by Chan and Tong (1986) and, later, by Teräsvirta (1994). For this model, the Lagrange Multipliers test, to measure the degree of non linearity of the series, as well as to evaluate the estimated model was used. Moreover, it was also used a proposal for the initial values of the optimization algorithm, developed by Franses and Dijk (2000). The smoothed Kalman filter estimates were used in order to provide values for the spot price series during the energy shortage period.

Keywords

Time series, Dynamic Regression, $ARIMA(p,d,q)$, *STAR* model, Lagrange Multiplier, Smoothed Kalman Filter.

Sumário

1	Introdução	12
2	O Preço Spot de Energia Elétrica do Brasil	15
2.1.	O modelo NEWAVE	16
2.1.1.	Modelagem das componentes do sistema	17
2.1.2.	Modelo de energias afluentes	18
2.1.3.	Cálculo da política de operação	20
3	Modelos lineares para séries temporais – $ARIMA(p,d,q)$	24
3.1.	Modelos lineares de séries temporais	25
3.2.	Estacionariedade	26
3.3.	Estratégia de especificação	27
3.4.	Identificação da ordem do modelo (p, d, q)	27
3.5.	Estimação	27
3.6.	Ferramentas de Avaliação	29
3.7.	Modelos SARIMA	30
4	Modelos de Regressão Dinâmica	31
4.1.	Estrutura dos modelos	32
4.2.	Modelos de Regressão Cochrane e Orcutt Generalizados	32
4.3.	Estratégia de modelagem para modelos de Regressão Dinâmica	34
4.4.	Testes estatísticos utilizados nos modelos de Regressão Dinâmica	35
5	Modelos não lineares para séries temporais – $STAR(p)$	37
5.1.	Especificação, teste de linearidade, estimação dos parâmetros e validação para modelos $LSTAR$	41
5.1.1.	Estacionariedade	41
5.1.2.	Especificação	41
5.1.3.	Teste de linearidade	42
5.1.4.	Estimação dos parâmetros	44

5.1.5. Ferramentas de Avaliação	46
5.1.5.1. Constância dos parâmetros	46
5.1.5.2. Independência serial	47
5.1.5.3. Homocedasticidade	47
5.1.6. Previsões utilizando o modelo <i>LSTAR</i>	48
6 Aplicação de modelos de série temporal para o CMO	50
6.1. <i>Spline</i> cúbico suavizado	52
6.2. Testando estacionariedade – testes de raiz unitária	53
6.3. Modelo $ARIMA(p, d, q)$	54
6.4. Regressão Dinâmica	58
6.5. Modelo $LSTAR(p)$	61
6.6. Comparação entre os modelos	71
7 Conclusão	73
8 Referências Bibliográficas	74

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultado dos testes de raiz unitária ADF(1) e PP(5)	54
Tabela 2 - Estatísticas do modelo estimado ARIMA(0,1,1) para o LSCMO	56
Tabela 3 – Estatísticas do modelo ARIMA(1,1,1) para o LSCMO	57
Tabela 4 – Estatísticas do modelo ARIMA(0,1,2) para o LSCMO	57
Tabela 5 – Estatísticas para a regressão dinâmica estimada para D_LSCMO	59
Tabela 6 – Valor p do teste de linearidade para as séries SCMO, LSCMO, D_LSCMO	62
Tabela 8 - Estatísticas para o LSTAR(1) estimado para LSCMO	63
Tabela 9 – Valores-p das ferramentas (testes) de avaliação do modelo <i>LSTAR</i>	64
Tabela 10 – Estatísticas para o LSTAR(3) estimado para o LSCMO	65
Tabela 11 – Valores-p das ferramentas (testes) de avaliação do modelo <i>LSTAR</i>	66
Tabela 13 - Valores-p das ferramentas de avaliação do modelo <i>LSTAR(3)</i> - LSCMO	68
Tabela 14 - Estatísticas para o <i>LSTAR(3)</i> com variável explicativa –D_LSCMO	70
Tabela 15 - Valores-p das ferramentas de avaliação do modelo <i>LSTAR(3)</i> – D_LSCMO	70

Lista de figuras

Figura 1 – Entradas e saídas do NEWAVE	16
Figura 2 – Resumo do primeiro módulo do NEWAVE	19
Figura 3 – Resumo do módulo de energias afluentes	21
Figura 4 – Conseqüências operativas de uma decisão em sistemas hidrotérmicos	21
Figura 5- FCI e FCF com a decisão ótima do consumo da água	22
Figura 6 – Resumo do cálculo da política de operação	23
Figura 7 – Função Logística para diferentes valores do γ	40
Figura 8 – Custo Marginal de Operação	50
Figura 9 – Logaritmo natural do CMO	50
Figura 10 – Energia Armazenada – em %	51
Figura 11 – Energia Natural Afluente em % da MLT (Média de Longo Prazo)	52
Figura 12 – Série do CMO e após a aplicação do <i>spline</i> cúbico suavizado (SCMO)	53
Figura 13 - Série do LCMO e após a aplicação do <i>spline</i> cúbico suavizado (LSCMO)	53
Figura 14 – Função de autocorrelação (FAC) da série do LSCMO	54
Figura 15 – FAC da série do LSCMO após uma diferenciação	55
Figura 16 – FACP da série do LSCMO após uma diferenciação	55
Figura 17 – FAC dos resíduos do modelo ARIMA(0,1,1)	56
Figura 18 – Estatísticas descritivas, histograma e Jarque Bera dos resíduos	57
Figura 19 – ARIMA – Previsões, intervalos de confiança e a série do LSCMO	58
Figura 20 – FAC dos resíduos para o modelo de regressão dinâmica	60
Figura 21 – RD – Previsões, int. de confiança e a série diferenciada LSCMO	61
Figura 22 – Espalhamento da função de transição versus variável de transição; Valores observados e previstos do LSCMO utilizando o <i>LSTAR</i> (1)	64
Figura 23 – Gráfico dos resíduos e da $F(x_t, \gamma, c)$ com o LSCMO	65
Figura 24 - Espalhamento da função de transição versus variável de transição; Valores observados e previstos do LSCMO utilizando o <i>LSTAR</i> (3) – ENAMLT	66
Figura 25 - Espalhamento da função de transição versus variável de transição; Valores observados e previstos do LSCMO utilizando o <i>LSTAR</i> (3) – EARM	67

Figura 26 – Gráfico dos resíduos e_t e da $F(x_t, \gamma, c)$ com o LSCMO utilizando o $LSTAR(3) - ENAMLT$	67
Figura 27 - Gráfico dos resíduos e_t e da $F(x_t, \gamma, c)$ com o LSCMO utilizando o $LSTAR(3) - EARM$	67
Figura 28 - Espalhamento da função de transição versus variável de transição; Valores observados e previstos do LSCMO utilizando o $LSTAR(3) - EARM(-1) - ENAMLT(-1)$	69
Figura 29 - - Gráfico dos resíduos e_t e da $F(x_t, \gamma, c)$ com o LSCMO utilizando o $LSTAR(3) - ENAMLT(-1)$ e $EARM$	69
Figura 30 - Espalhamento da função de transição versus variável de transição; Valores observados e previstos do LSCMO utilizando o D_LSCMO	71