

Lacir Jorge Soares

**Ensaio em Previsão de Carga
a curto prazo**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica**



Lacir Jorge Soares

Ensaio em Previsão de Carga a curto prazo

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Reinaldo Castro Souza
Co-Orientador: Marcelo Cunha Medeiros
Co-Orientador: Leonardo Rocha Souza

Rio de Janeiro
Julho de 2003



Lacir Jorge Soares

Ensaio em Previsão de Carga a curto prazo

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Marcelo Cunha Medeiros

Co-Orientador

Departamento de Economia — PUC-Rio

Leonardo Rocha Souza

Co-Orientador

FGV

Mônica Barros

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

João Carlos de Oliveira Aires

UGF

Plutarcho Maravilha Lourenço

CEPEL

Valdério Anselmo Reisen

UFES

Hélio Francisco da Silva

UFJF

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de Julho de 2003

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

Lacir Jorge Soares

Graduou-se em Estatística na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro). Especializou-se em Análise de Sistemas na PUC-Rio. cursou Mestrado e Doutorado na PUC-Rio, sob orientação do Prof. Reinaldo Castro Souza. Possui mais de 25 anos de experiência profissional na área de Tecnologia da Informação e 10 anos no magistério do ensino superior. Trabalha com análise de séries temporais, estatística computacional e métodos quantitativos aplicados às ciências sociais.

Ficha Catalográfica

Soares, Lacir Jorge

Ensaio em Previsão de Carga a curto prazo/ Lacir Jorge Soares; orientador: Reinaldo Castro Souza; co-orientadores: Marcelo Cunha Medeiros, Leonardo Rocha Souza. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

v., 83 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Estatística. 3. Previsão de Séries Temporais. 4. Modelagem Estatística. 5. Previsão de carga. 6. Memória longa generalizada. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Medeiros, Marcelo Cunha. III. Souza, Leonardo Rocha. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. V. Título.

A meus pais (*em memória*) Moacyr e La-Saete pelos consideráveis sacrifícios que fizeram em meu benefício.

Agradecimentos

Registrar os agradecimentos é expor-se ao risco de cometer injustiças por esquecimento. Mas muito mais grave é a omissão absoluta, por isso vou fazê-lo penitenciando-me aos esquecidos.

Esta tese dificilmente ter-se-ia se concretizado se não fosse o apoio de uma instituição: o CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. À esta instituição meu reconhecimento e agradecimento pela bolsa para concretização do curso de doutoramento em engenharia elétrica. Especificamente, agradeço ao Dr. Plutarcho Maravilha Lourenço pelo apoio e estímulo à elaboração desta tese. Ao Departamento de Engenharia Elétrica da PUC – Rio também credito meus agradecimentos.

Desejo expressar um agradecimento especial ao meu amigo-orientador, Professor Reinaldo Castro Souza, pela confiança que me creditou após minha permanência por um longo período fora dos bancos escolares. Ao grande e fiel amigo Professor Marcelo Cunha Medeiros pela vitalidade, jovialidade, seriedade e competência nas várias trocas de idéias sobre os complexos temas tratados na tese, por ter me apontado os caminhos a serem seguidos e acreditado que haveria tempo hábil para a conclusão desta empreitada, manifesto minha gratidão. Ao meu dileto amigo Professor Leonardo Rocha Souza pela contribuição pessoal e científica sem a qual parte deste trabalho não existiria e pelos momentos de tertuliosas prosas edificadoras. Ao amigo Professor Hélio Francisco da Silva pela sabedoria transmitida de forma fraternal e sincera, além da colaboração na revisão redacional da tese, pelo que extendo meus agradecimentos.

Aos muitos colegas do cotidiano que, cada um a sua maneira, me auxiliaram muito: Ana Cristina, Fabiano, Ana Paula, Lúcio, Célia e Oto, meu muito obrigado. Aos amigos e colegas da *D-11*, Fátima, Paulo, Ricardo, Victor, Guilherme, Bianco e Marcelo, meus agradecimentos pela participação em idéias, sugestões e discussões que me fizeram crescer e aprender sobre a vida, pessoal e profissional, e se fizeram presentes ao longo das várias etapas da tese.

Finalmente, quero expressar meus agradecimentos a minha família que, nos últimos anos, foi privada de um convívio qualitativamente melhor, em razão da minha obstinação pela elaboração da tese. À Cristina minha gratidão pelo seu amor constante, sacrifício e apoio diuturno durante toda esta jornada que foi mais longa do que o previsto e por, mesmo nos momentos mais difíceis, ter me reconfortado com seu afeto, carinho e dedicação. A meus filhos Daniel, Diogo, Rodolfo e a pequena Flávia agradeço por usufruir seu convívio. Por último, eu sou grato a Deus pela força, pela saúde e pelas oportunidades que me propiciou durante este período de estudo.

Resumo

Soares, Lacir Jorge; Souza, Reinaldo Castro; Medeiros, Marcelo Cunha; Souza, Leonardo Rocha. **Ensaio em Previsão de Carga a curto prazo**. Rio de Janeiro, 2003. 83p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A previsão de carga é considerada uma poderosa ferramenta no controle e planejamento de sistemas elétricos. Um grande número de pesquisadores têm sugerido, recentemente, diversas técnicas para previsão de carga a curto prazo. Este trabalho estuda a aplicabilidade de modelos lineares. O trabalho pretende ser uma base para uma aplicação real de previsão. Os modelos foram desenvolvidos e testados com dados reais de carga de uma empresa de eletricidade situada na região do sudeste brasileiro. Todos os modelos são propostos para dados seccionais, isto é, a série de carga de cada hora é estudada separadamente como uma série única. Esta abordagem evita a modelagem de padrões intra-dia (perfil da carga) complexos apresentados pela série de carga, que variam durante os dias da semana e nas estações. Três modelos são estudados. O primeiro é um modelo *SARIMA* ajustado por variáveis binárias denominado *DASARIMA*, adotado como modelo de referência; o segundo é um modelo em duas etapas que considera a existência de componentes determinísticos para modelar a tendência, a sazonalidade e os efeitos do calendário, denominado modelo autorregressivo sazonal em dois níveis - *TLGAR* e o último é um modelo de memória longa generalizada ajustado por variáveis binárias - *DAGLM*.

Os resultados dos ensaios mostraram que os modelos horários são bem apropriados para uma aplicação de previsão. Os erros de previsão, das duas últimas abordagens, são menores que os do modelo de referência, *DASARIMA*. O trabalho sugere que este tipo de modelos horários devem ser testados mais completamente a fim de fornecer uma opinião final sobre sua aplicabilidade.

Palavras-chave

Séries temporais; Modelos lineares; Memória Longa Generalizada; Previsão de Carga; Racionamento.

Abstract

Soares, Lacir Jorge; Souza, Reinaldo Castro; Medeiros, Marcelo Cunha; Souza, Leonardo Rocha. **Essays on Short-term Load Forecasting**. Rio de Janeiro, 2003. 83p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Load forecasting has been considered a powerful tool in managing and planning power systems. Several techniques have been recently suggested for short-term load forecasting by a large number of researchers. This work studies the applicability of linear models in the area is intended to be a basis for a real forecasting application.

The models were developed and tested on the real load data of a utility company located in the southeast of Brazil. All models are proposed for sectional data, that is, each hour's load is studied separately as a single series. This approach avoids modeling the intricate intra-day pattern (load profile) displayed by the load, which varies throughout days of the week and seasons. Three models are studied, the first one a *Dummy-Adjusted Seasonal Integrated Autoregressive Moving Average model - DASARIMA*, acting as a benchmark, the second a two-step modeling that makes use of deterministic components to model trend, seasonality and calendar effects, called *Two-Level Seasonal Autoregressive model - TLSAR*; and the last one a *Dummy-Adjusted Generalized Long Memory model - DAGLM*.

The test results showed that the hourly models are well suitable for a forecasting application. The forecasting errors of the last two approaches were smaller than those of the *DASARIMA* benchmark. The work suggests that this kind of hourly models should be implemented in a thorough on-line testing in order to provide a final opinion on its applicability.

Keywords

Time-Series; Linear Models; Generalized Long Memory; Rationing.

Conteúdo

Introdução	11
1 Introdução	12
1.1 Histórico	12
1.2 Proposta do trabalho	13
1.3 Estrutura do trabalho	14
2 A Base de Dados	16
2.1 Análise Preliminar	16
2.2 Fatores que afetam a carga	18
2.3 Propriedades da curva de carga	20
3 A Modelagem em dois níveis	23
3.1 Introdução	23
3.2 O Modelo linear em dois níveis	24
3.3 Modelo de Referência	28
3.4 O Experimento	29
3.5 Resumo	36
4 A Modelagem usando Memória Longa	40
4.1 Definição	40
4.2 Resultados da previsão	49
4.3 Resumo	62
5 Conclusão	65
A Tabelas	68
A.1 Modelo <i>SARIMA</i> ajustado por variáveis binárias (<i>DASARIMA</i>)	68
A.2 Modelo Auto-regressivo Sazonal em dois níveis (<i>TLGAR</i>)	71
A.3 Modelo de Memória Longa Generalizada ajustado por variáveis binárias (<i>DAGLM</i>)	75
Bibliografia	78

Lista de Figuras

2.1	carga horária média	16
2.2	carga horária do período de 01/01/1996 a 31/12/1996	17
2.3	função de autocorrelação da série mostrada na figura ??	18
2.4	carga média diária de 1990 a 2001	19
2.5	curva de carga do período de 07/04/1997 a 20/04/1997 - primeiro dia segunda-feira	21
2.6	curva de carga de quatro quartas-feiras nas diferentes estações	22
3.1	perfil das harmônicas da carga regular.	30
3.2	autocorrelações das componentes irregulares	32
3.3	autocorrelações parciais das componentes irregulares	33
3.4	carga real (escuro), componente determinística(claro)	34
3.5	MAPE médio (1999 – 2000) - <i>TLSAR</i> (escuro) e <i>DASARIMA</i> (claro)	35
3.6	MAPE médio 1999 - <i>TLSAR</i> (escuro) e <i>DASARIMA</i> (claro)	38
3.7	MAPE médio 2000 - <i>TLSAR</i> (escuro) e <i>DASARIMA</i> (claro)	39
3.8	carga real (ponto), prevista <i>DASARIMA</i> (linha) e <i>TLSAR</i> (tracejado), 1 passo à frente.	39
4.1	função de autocorrelação, após a remoção da tendência e dos efeitos de calendário, até a defasagem de ordem 1000. Observe a semelhança com uma senóide amortecida	46
4.2	periodograma normal (pontos) e suavizado (linha), após a remoção da tendência e dos efeitos de calendário (dias da semana e feriados).	47
4.3	MAPE médio (1999 – 2000) - <i>DAGLM</i> (escuro), <i>DASARIMA</i> (claro)	50
4.4	MAPE médio 1999 – <i>DAGLM</i> (escuro), <i>DASARIMA</i> (claro)	54
4.5	MAPE médio 2000 - <i>DAGLM</i> (escuro), <i>DASARIMA</i> (claro)	55
4.6	curva de carga diária das 4 estações do ano - real (ponto), <i>DASARIMA</i> (linha), <i>DAGLM</i> (tracejado)	55
4.7	curva de carga de 09 a 15/05/1999 - real (ponto), <i>DASARIMA</i> (linha), <i>DAGLM</i> (tracejado)	56
4.8	curva de carga de 05 a 18/04/1999 - real (ponto), <i>DASARIMA</i> (linha), <i>DAGLM</i> (tracejado)	57
4.9	curva de carga de 15/09/2000 a 14/10/2000 - real(ponto), <i>DASARIMA</i> (linha), <i>DAGLM</i> (tracejado)	58
4.10	Carga diária dos anos 2000 e 2001	59
4.11	erro de previsão 1 passo à frente no período de 21 de março de 2001 a 7 de setembro de 2001.	62
4.12	evolução do parâmetro $d1$ (relativo à memória longa sazonal) durante o ano de 2001 (escalas diferentes)	63

Lista de Tabelas

3.1	Classificação dos tipos de dias para efeito de previsão	26
3.2	Classificação dos tipos de dias para o modelo <i>DASARIMA</i>	27
3.3	Parâmetros significativos dos modelos <i>DASARIMA</i>	29
3.4	Parâmetros estimados do modelo <i>TLSAR</i>	31
3.5	MAPE - (1999 – 2000) dos modelos <i>TLSAR</i> e <i>DASARIMA</i>	36
3.6	MAPE - ano 1999 dos modelos <i>TLSAR</i> e <i>DASARIMA</i>	37
3.7	MAPE - ano 2000 dos modelos <i>TLSAR</i> e <i>DASARIMA</i>	38
4.1	Parâmetros estimados do modelo <i>DAGLM</i>	48
4.2	MAPE - total (1999 – 2000) dos modelos <i>DAGLM</i> e <i>DASARIMA</i>	51
4.3	MAPE – ano 1999 dos modelos <i>DAGLM</i> e <i>DASARIMA</i>	52
4.4	MAPE – ano 2000 dos modelos <i>DAGLM</i> e <i>DASARIMA</i>	53
4.5	MAPE de datas selecionadas dos modelos <i>DAGLM</i> e <i>DASARIMA</i>	53
4.6	MAPE dos anos de 2000 (antes do racionamento), 2001 (incluindo o racionamento no final) e 2002* (incluindo o racionamento no início).	60
A.1	MAPE total - <i>DASARIMA</i>	69
A.2	MAPE por mês modelo <i>DASARIMA</i>	70
A.3	MAPE por dia da semana - modelo <i>DASARIMA</i>	70
A.4	MAPE total - <i>TLSAR</i>	72
A.5	MAPE por mês modelo <i>TLSAR</i>	73
A.6	MAPE por dia da semana - modelo <i>TLSAR</i>	73
A.7	MAPE por tipo de dia - modelo <i>TLSAR</i>	74
A.8	MAPE modelo <i>DAGLM</i>	76
A.9	MAPE por mês - modelo <i>DAGLM</i>	77
A.10	MAPE por dia da semana - modelo <i>DAGLM</i>	77

“Se fazer fosse tão fácil como saber o que é conveniente fazer, as capelas seriam igrejas e as cabanas dos pobres seriam palácios.”

William Sheakspeare