

Gláucia de Paula Falco

**Técnicas Univariadas Aperfeiçoadas
para a Previsão de Curtíssimo Prazo
a partir de Dados Horários**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Gláucia de Paula Falco

**Técnicas Univariadas Aperfeiçoadas
para a Previsão de Curtíssimo Prazo
a partir de Dados Horários**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título 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
Setembro de 2005



Gláucia de Paula Falco

**Técnicas Univariadas Aperfeiçoadas
para a Previsão de Curtíssimo Prazo
a partir de Dados Horários**

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

Dr. Reinaldo Castro Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. João Carlos de Oliveira Aires
UGF/UFF

Dr. Basílio de Bragança Pereira
UFRJ

Dr. Henrique Steinherz Hippert
UFJF

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

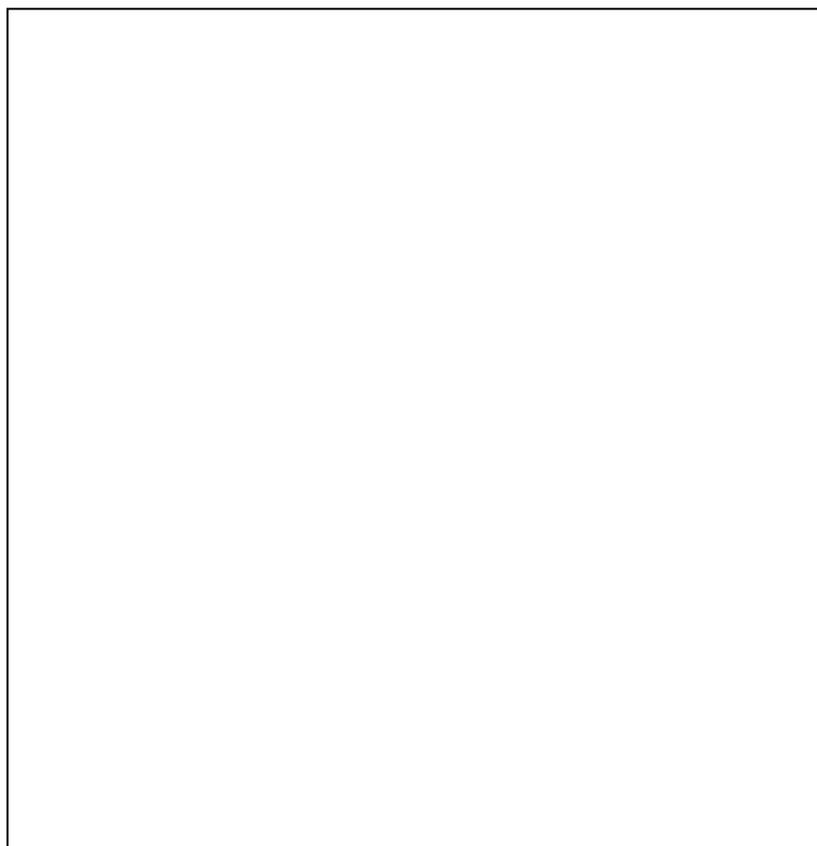
Rio de Janeiro, 16 de setembro de 2005

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

Gláucia de Paula Falco

A autora graduou-se em Economia pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2001. Em 2002 cursou a pós-graduação *latu sensu* oferecida pela UFJF em Métodos Estatísticos Computacionais/ Instituto de Ciências Exatas, no qual alguns professores e ex-alunos do departamento lecionam. Este curso despertou o interesse da autora pela análise estatística motivando o seu ingresso no programa de mestrado oferecido pelo DEE em 2003.

Ficha Catalográfica



Dedico este trabalho a minha família.

Agradecimentos

A Deus por me sustentar nessa caminhada e me permitir chegar até aqui.

Ao meu orientador Reinaldo Castro Souza pelo apoio, parceria e confiança que sempre depositou em mim e que foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Ao meu pai e as minhas irmãs Márcia, Lúcia e Débora.

Aos amigos e colegas que estiveram ao meu lado na fase de elaboração deste estudo pelo apoio e amizade, em especial ao Bruno Dore Rodrigues, Carlos, Marcelo Ganem, Rodrigo, Gabriela e Grizendi.

A amiga Maria Eugênia Bunchaft.

A Capes e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, e ao seu corpo administrativo, pela atenciosa dedicação demonstrada.

Resumo

Falco, Gláucia de Paula; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Técnicas Univariadas Aperfeiçoadas para a Previsão de Curtíssimo Prazo a Partir de Dados Horários**. Rio de Janeiro, 2005. 139p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O ONS (operador nacional do sistema elétrico brasileiro) vem utilizando o software ANNSTLF produzido pelo EPRI/EUA (Electrical Power Research Institute) para realizar a previsão do consumo de carga horária. Entretanto, as estimativas fornecidas pelo programa estão fundamentadas na metodologia de uma rede neural que, de certo modo, impede ao usuário de extrair uma maior interpretação dos resultados que são fornecidos pela rede. Assim sendo, este trabalho pesquisou os métodos univariados convencionais: Holt-Winters e Box & Jenkins, considerando suas formulações aperfeiçoadas e adaptadas às características próprias do tipo de série em questão. Isto é, assumindo a existência de dois ciclos sazonais: um diário e outro semanal. A vantagem destas técnicas univariadas, em comparação ao ANNSTLF, é principalmente a interpretabilidade das informações obtidas. Dessa forma, esta pesquisa permite também avaliar melhor o desempenho do ANNSTLF.

Palavras-chave

Demanda energética; dados horários; ANNSTLF; modelos univariados aperfeiçoados; Holt-Winters; Box & Jenkins.

Abstract

Falco, Gláucia de Paula; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Univariate Techniques Perfected for the Electric Load Forecast of Short Stated Period from Hourly Data**. Rio de Janeiro, 2005. 139p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The ONS (National Operator of the Brazilian electrical system) has been using the software ANNSTLF produced by EPRI/USA (Electrical Power Research Institute) to carry out the forecast of the hourly load consumption. However, the estimates supplied by the program are based on the methodology of a neural net that, in a way, does not allow the user to extract a better interpretation of the results produced by the net. Therefore, investigates the conventional univariate methods: Holt-Winters and Box & Jenkins, considering its formulations perfected and adapted to the characteristics of the series under study. That is, it assumed the existence of two seasonal cycles: daily and weekly. The advantage of these univariate techniques, in comparison to the ANNSTLF, is mainly the ability to interpret the model estimates. Also, this research also allows a better evaluation the performance of the ANNSTLF.

Keywords

Energy demand; hourly data; ANNSTLF; adapted univariate model; Holt-Winters; Box & Jenkins.

Sumário

1. Introdução	13
2. A modelagem univariada por Holt-Winters	17
2.1 - Considerações iniciais	17
2.2 - A abordagem tradicional dos modelos Holt-Winters	17
2.3 - A modelagem Holt-Winters estendida: modelos com ciclos duplo	26
2.3.1 - Alguns detalhes da análise da modelagem empírica da técnica Holt-Winters estendida aos dados de consumo de carga horária do sudeste brasileiro	32
2.4 - Modelagem Holt-Winters estendida: modelos com tendência amortecida	40
2.5 - Modelagem Holt-Winters estendida: modelos com erros estruturados	45
2.6 - Comentários finais	47
3. A modelagem univariada por Box & Jenkins	49
3.1 - Preliminares da modelagem por Box & Jenkins	49
3.2 - Os modelos Box & Jenkins	52
3.3 - Estimacão paramétrica dos modelos BJ	57
3.3.1 - Metodologia para estimar os parâmetros dos modelos Box & Jenkins	58
3.3.2 - Propriedades dos Estimadores de Máxima Verossimilhança (EMV)	59
3.3.3 - Método condicional	62
3.4 - Critérios de avaliação dos modelos Box & Jenkins	64
3.5 - Modelagem estendida Box & Jenkins incorporando dois ciclos: diário e semanal	67
3.5.1 - Preliminares da modelagem empírica	68
3.6 - Considerações finais	90
4. O software ANNSTLF	91
4.1 - ANNSTLF como método de estimacão	91
4.2 - Aspectos relevantes dos modelos por redes neurais	91
4.2.1 - Modelo simplificado de um neurônio	93
4.2.2 - A modelagem em redes neurais	97
4.3 - ANNSTLF	98
4.4 - A estrutura da rede neural do ANNSTLF	110
4.5 - Considerações finais	110
5. Resultados da modelagem empírica BJ e HW X ANNSTLF	112
5.1 - Informações iniciais	112
5.2 - O banco de dados	112
5.3 - O critério de comparação dos modelos: MAPE	113
5.4 - A Modelagem por Holt-Winters	113
5.4.1 - Modelo HW com duplos ciclos ‘sem’ erros estruturados e ‘sem’ damped	113

5.4.2 - Modelagem HW com duplos ciclos e damped e ‘sem’ erros estruturados	119
5.4.3 - Modelagem Holt-Winters com duplos ciclos e ‘com’ erros estruturados	120
5.5 - Resultados da modelagem empírica por Box & Jenkins	121
5.5.1 - Para 01 passo-à-frente BJ	121
5.5.2 - Para 24 passos-à-frente BJ	126
5.6 - As previsões do ANNSTLF e as previsões por Holt-Winters e Box & Jenkins	126
5.7 - Detalhes adicionais da modelagem HW por dias da semana, horas e feriados	130
5.8 - Considerações finais	132
6. Conclusão	134
Referências Bibliográficas	138

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Fatores iniciais do ciclo 1	37
Tabela 2.2 - Fatores iniciais do ciclo 2	38
Tabela 2.3 - Simulação do impacto do fator de correção no modelo HW	42
Tabela 3.1 - Teste de igualdade da variância entre os grupos da série original	69
Tabela 3.2 - Teste de igualdade entre as médias	70
Tabela 3.3 - Teste de Raiz unitária (ADF) para a série de dados original	77
Tabela 3.4 - Teste de igualdade da variância para a série diferenciada	77
Tabela 3.5 - Teste de igualdade entre as médias para a série diferenciada	78
Tabela 3.6 - Teste de Raiz unitária (ADF) para a série de dados diferenciada	80
Tabela 3.7 - Rôs finais estimados para a FAC	81
Tabela 4.1 - Características do Sistema Elétrico Brasileiro - 98% mercado interno em 2004	99
Tabela 4.2 - Recursos disponíveis em 2004	99
Tabela 4.3 - Evolução do Sistema Elétrico Brasileiro	99
Tabela 4.4 - Participação percentual das categorias de consumo	101
Tabela 4.5 - Pesos ótimos relativos às respectivas estações	103
Tabela 4.6 - MAPE ANNSTLF para as regiões norte e nordeste	106
Tabela 4.7 - MAPE ANNSTLF para as regiões sul e sudeste	106
Tabela 5.1 - Banco de séries de dados	112
Tabela 5.2 - Valores ótimos dos hiperparâmetros e parâmetros HW duplo ciclos	114
Tabela 5.3 - Fatores do ciclo 1 em $t = 7296$	114
Tabela 5.4 - Fatores do ciclo 2 em $t = 7296$	115
Tabela 5.5 - Valores ótimos dos hiperparâmetros e parâmetros HW duplo ciclos considerando o modelo com erros estruturados da forma AR (1)	120
Tabela 5.6 - MAPE <i>in-sample</i> X MAPE <i>out-of-sample</i> (01 passo-à-frente)	124
Tabela 5.7 - MAPE <i>in-sample</i> X MAPE <i>out-of-sample</i> (01 e 24 passos-à-frente)	126
Tabela 5.8 - Comparações do MAPE do ANNSTLF X BJ X HW	127
Tabela 5.9 - MAPE ANNSTLF para o sudeste em 2003 e 2004	128
Tabela 5.10 - MAPE ANNSTLF para o sul em 2003 e 2004	128
Tabela 5.11 - MAPE ANNSTLF para o norte em 2003 e 2004	128
Tabela 5.12 - MAPE ANNSTLF para o nordeste em 2003 e 2004	129
Tabela 5.13 - MAPE_previsões 2003 com discriminação de data e dias	131
Tabela 5.14 - MAPE horário	131

Lista de gráficos

Gráfico 2.1 - Ciclo diário em dias úteis	28
Gráfico 2.2 - Ciclo diário em fins de semana	28
Gráfico 2.3 - Ciclo semanal	29
Gráfico 2.4 - Demanda de carga entre 01/01/03 a 31/10/03	29
Gráfico 2.5 - Tendência com amortecimento e tendência sem a constante de Amortecimento	41
Gráfico 3.1- Série de demanda horária_sudeste (1-10/2003)	68
Gráfico 3.1- Série de demanda horária_sudeste (1-10/2003)	69
Gráfico 3.2 - Série de demanda horária_sudeste (2 semanas/2003)	69
Gráfico 3.3 - Média dos grupos da série original	71
Gráfico 3.4 - FAC dos 23 primeiros <i>lags</i> da série original	72
Gráfico 3.5 - FAC dos <i>lags</i> sazonais do ciclo1 (24 - 480 = 20 <i>lags</i>)	72
Gráfico 3.6 - FAC dos <i>lags</i> sazonais do ciclo1 (168-5880 = 35 <i>lags</i>)	73
Gráfico 3.7 - FAC de 23 <i>lags</i> da série após diferença sazonal 1 e 2	73
Gráfico 3.8 - FAC dos <i>lags</i> sazonais do ciclo1 (24-480 = 20 <i>lags</i>) após diferença sazonal 1 e 2	74
Gráfico 3.9 - FAC dos <i>lags</i> sazonais do ciclo2 (168-5880 = 35 <i>lags</i>) após diferença sazonal 1 e 2	74
Gráfico 3.10 - FAC de 23 <i>lags</i> da série após diferença simples e sazonal 1 e 2	75
Gráfico 3.11 - FAC dos <i>lags</i> sazonais do ciclo1 (24-480 = 20 <i>lags</i>) após diferença simples e sazonal 1 e 2	75
Gráfico 3.12 - FAC dos <i>lags</i> sazonais do ciclo2 (168-5880 = 35 <i>lags</i>) após diferença simples e sazonal 1 e 2	76
Gráfico 3.13 - Médias dos grupos da série diferenciada	79
Gráfico 3.14 - Normalidade da série em estudo	79
Gráfico 3.15 - FACP dos 23 <i>lags</i> simples	82
Gráfico 3.16 - FACP dos <i>lags</i> sazonais do ciclo 1 (24-480 = 20 <i>lags</i> sazonais 1)	82
Gráfico 3.17 - FACP dos <i>lags</i> sazonais do ciclo 2 (168-3360 = 20 <i>lags</i> sazonais 2)	83
Gráfico 3.18 - Correlograma dos resíduos do modelo. (0,1,0)*(1,1,1) ₂₄ *(2,1,1) ₁₆₈	88
Gráfico 4.1 - Esquema de uma rede <i>Feedforward</i>	92
Gráfico 4.2 - Vista interna do k-ésimo neurônio	94
Gráfico 4.3 - Função sigmóide	95
Gráfico 4.4 - Função tangente hiperbólica e função linear	96
Gráfico 4.5 - Efeito de saturação	96
Gráfico 4.6 - Região sudeste (verificado <i>X</i> previsto ANNSTLF)	107
Gráfico 4.7 - Região sul (verificado <i>X</i> previsto ANNSTLF)	107
Gráfico 4.8 - Performance das segundas-feiras na região sudeste	108
Gráfico 4.9 - Performance das segundas-feiras na região sudeste (continuação)	108
Gráfico 4.10 - Segunda-feira de carnaval em 2003 no sudeste	109

Gráfico 4.11 - segunda-feira de carnaval em 2004 no sudeste.	109
Gráfico 5.1 - Ajuste do modelo HW com duplos ciclos <i>in-sample</i>	117
Gráfico 5.2 - Dados previstos X dados reais <i>out-of-sample</i> (01 passo) (horas 1 até 168 = 1 semana)	118
Gráfico 5.3 - Dados previstos X dados reais <i>out-of-sample</i> (01 passo) (horas 169 até 336 = uma semana)	118
Gráfico 5.4 - Dados previstos X dados reais <i>out-of-sample</i> (24 passos) (horas 1 até 100)	119
Gráfico 5.5- Ajuste <i>in-sample</i> do modelo BJ com dois ciclos (horas 1 até 168)	122
Gráfico 5.6 - Ajuste <i>in-sample</i> do modelo BJ com dois ciclos (horas 169 até 336)	123
Gráfico 5.7 - Valor previsto X valor real BJ (<i>out-of-sample</i> 168 horas) 01 passo-à-frente	123
Gráfico 5.8 - Valor previsto X valor real BJ (<i>out-of-sample</i> 48 dados) 01 passo-à-frente	124
Gráfico 5.9 - Valores reais X valores previstos BJ (24 passos à frente) <i>out- of-sample</i>	125