



**Gheisa Roberta Telles Esteves**

**Modelos de Previsão de  
Carga de Curto Prazo**

**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



**Gheisa Roberta Telles Esteves**

**Modelos de Previsão de  
Carga de Curto Prazo**

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. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Reinaldo Castro Souza**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Monica Barros**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Jão Carlos de Oliveira Aires**

IEPUC - RIO

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de abril de 2003

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

## **Gheisa Roberta Telles Esteves**

Graduou-se em Economia na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) em 1996 com a monografia intitulada “Análise do Consumo de Energia Elétrica em Niterói” em 1999. Afastou-se da atividade profissional, para efetuar seus estudos de mestrado na área de Métodos de Apoio a Decisão da Engenharia Elétrica no ano 2001.

### Ficha Catalográfica

Esteves, Gheisa Roberta Telles

Modelos de previsão de carga de curto prazo / Gheisa Roberta Telles Esteves; orientador: Reinaldo Castro Souza. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[11], 96 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. Previsão. 3. Séries temporais. 4. Curto prazo. 5. Múltiplos ciclos. 6. Amortecimento direto. 7. Modelos de previsão. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

**`A minha família**

## **Agradecimentos**

A Deus por ter me permitido existir e ter me guiado nesta jornada.

A CNPQ, pelo apoio financeiro.

Ao Prof. Dr. Reinaldo Castro Souza, orientador desta tese, pelo apoio, carinho, incentivo e confiança depositada, com que pude contar em todos os momentos durante a realização deste trabalho.

A meus pais e meus irmãos por estarem sempre do meu lado me apoiando, incentivando e me dando carinho.

A meus tios, familiares e amigos estarem sempre estimulando, ajudando e me dando carinho.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Elétrica, com quem pude contar durante toda a tese e que sempre se mostraram prontos a me ajudar em todos os momentos.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## Resumo

Esteves, Gheisa Roberta Telles; Souza, Reinaldo Castro. **Modelos de Previsão de Carga de Curto Prazo**. Rio de Janeiro, 2003. 107 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Aplicação de duas metodologias, para prever e modelar o comportamento de uma serie temporal de carga de energia elétrica, a serie histórica de carga elétrica horária de uma das concessionárias de energia elétrica do sudeste brasileiro, a ESCELSA.

Foram aplicadas as metodologias de amortecimento direto, e uma metodologia recente, o método de Holt-Winters com múltiplos ciclos. Ambas as metodologias são utilizadas para fazer previsão horária de carga de energia elétrica, portanto, é feita, previsão 24 passos a frente.

## Palavras-chave

Previsão, Series Temporais, Curto Prazo, Múltiplos Ciclos, Amortecimento Direto, Modelos de Previsão

## Abstract

Esteves, Gheisa Roberta Telles; Souza, Reinaldo Castro(Advisor). **Short Term Load Forecasting Models**. Rio de Janeiro, 2003. 107 p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Application of two different methodologies, in order to model and forecast the behavior of time series of hourly electrical loads generated by ESCELSA.

Was applied to the time series studied the methodology of the direct smoothing, and also a recent methodology, the Holt-Winters with multiple seasonalities. In both of them it has been done the hourly forecast (24 hours load forecasting).

## Keywords

Forecasting, Time Series, Short Term, Multiple Seasonalities, Direct Smoothing, Forecasting Methods.

## Sumário

1. Introdução	17
1.1. Motivação	12
1.2. Objetivos e Descrição do Trabalho	14
1.3. Organização da Tese	16
2. Modelos de Previsão – Conceitos Básicos	54
2.1. Series Temporais	18
2.1.1. Análise no Domínio do Tempo	19
2.1.2. Análise no Domínio da Frequência	19
2.1.3. Comportamentos Cíclicos e Sazonalidade	20
2.1.4. Previsão de Series Temporais	20
2.2. Modelos de Previsão	20
2.2.1. Modelo de Amortecimento Exponencial	21
2.2.2. Modelos Box&Jenkins	25
2.2.2.1. Teste de Adequação do Modelo	28
2.2.2.2. Extensão do Modelo Box&Jenkins	29
2.2.3. Modelo de Espaço Estado e Filtro de Kalman	30
2.2.3.1. Modelo de Espaço Estado	30
2.2.3.2. Filtro de Kalman	33
2.2.4. Modelos Bayesianos de Previsão	35
2.2.4.1. Teorema de Bayes	37
2.2.4.2. Informação a Priori	38
2.2.4.3. Previsão k Passos a Frente	39
2.2.4.4. Componentes do Modelo Linear Dinâmico	40
2.2.4.5. Fatores de Desconto	41
2.2.5. Modelo de Decomposição de Gupta	42
2.2.5.1. Componente Carga-Clima	44
2.2.6. Redes Neurais	48
2.2.7. Lógica Nebulosa	51
3. Modelo de Amortecimento Direto	65

3.1. Introdução	55
3.2. Determinação das Matrizes	57
3.2.1. Matriz de Transição	58
3.2.2. Matriz h	59
3.2.3. Matriz G	59
3.3. Adequação do Modelo	61
3.4. Análise Espectral e Periodograma de Schuster	62
4. Modelo Proposto – Holt-Winters com Múltiplos Ciclos	77
4.1. Introdução	66
4.2. Holt-Winters Padrão	67
4.2.1. Holt-Winters Aditivo	68
4.2.2. Holt-Winters Multiplicativo	70
4.3. Holt-Winters com Múltiplos Ciclos	72
5. Aplicação dos Modelos e Resultados	102
5.1. Análise da Série da ESCELSA	80
5.1.1. Análise Espectral e Periodograma	82
5.2. Modelagem via Amortecimento Direto	84
5.2.1. Modelagem via Amortecimento Direto – Uso de Análise Espectral	84
5.2.2. Modelagem via Amortecimento Direto – Uso de Picos Definidos nos Períodos 24 e 168	88
5.3. Modelagem via Holt-Winters com Múltiplos Ciclos	81
5.4. Comparação dos Erros de Previsão	88
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	104
6.1. Conclusões	103
6.2. Trabalhos Futuros	104
7. Referências Bibliográficas	107

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Processo Previsor de Box&Jenkins	25
Figura 2.2 – Rede Feedforwad	49
Figura 2.3 – Sistema de Lógica Nebulosa	52
Figura 2.4 – Previsão de Series Temporais na Lógica Nebulosa	53
Figura 5.1 – Área de Concessão da ESCELSA	78
Figura 5.2a – Serie de Demanda de Carga de Energia Elétrica da ESCELSA com Outliers	80
Figura 5.2b – Serie de Demanda de Carga de Energia Elétrica da ESCELSA sem Outliers	80
Figura 5.3 – Demanda Horária para uma Quinzena	81
Figura 5.4 – Função de Autocorrelação e de Autocorrelação Parcial da Serie	82
Figura 5.5 – Periodograma da Serie – ESCELSA	83
Figura 5.6a – Previsão do Primeiro Dia : 29/06/2001 (Sexta)	90
Figura 5.6b – Previsão do Segundo Dia : 30/06/2001 (Sábado)	90
Figura 5.6c – Previsão do Terceiro Dia : 01/07/2001 (Domingo)	91
Figura 5.6d – Previsão do Quarto Dia : 02/07/2001 (Segunda)	91
Figura 5.6e – Previsão do Quinto Dia : 03/07/2001 (Quarta)	92
Figura 5.6f – Previsão do Sexto Dia : 04/07/2001 (Quinta)	92
Figura 5.6g – Previsão do Sétimo Dia : 05/07/2001 (Sexta)	93
Figura 5.7 – Gráfico da Previsão Offsample	93
Figura 5.8a – Previsão do Primeiro Dia : 29/06/2001 (Sexta)	97
Figura 5.8b – Previsão do Segundo Dia : 30/06/2001 (Sábado)	97
Figura 5.8c – Previsão do Terceiro Dia : 01/07/2001 (Domingo)	98
Figura 5.8d – Previsão do Quarto Dia : 02/07/2001 (Segunda)	98
Figura 5.8e – Previsão do Quinto Dia : 03/07/2001 (Quarta)	99
Figura 5.8f – Previsão do Sexto Dia : 04/07/2001 (Quinta)	99
Figura 5.8g – Previsão do Sétimo Dia : 05/07/2001 (Sexta)	100
Figura 5.9 – Gráfico da Previsão Offsample	100

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Somas Infinitas	50
Tabela 5.1 – Números da Concessão no Estado do Espírito Santo	79
Tabela 5.2 – Pícos Significativos	
83	
Tabela 5.3 – Fatores Iniciais do Ciclo Diário	95
Tabela 5.3 – Fatores Iniciais do Ciclo Semanal	95
Tabela 5.3 – Erros Percentuais Absolutos Médios Diários	101