



**Schaiane Nogueira Ouverney Barroso**

**Modelo HPA para a modelagem de dados de alta  
frequência: aplicação à previsão horária de carga elétrica**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza



**Schaiane Nogueira Ouverney Barroso**

**Modelo HPA para a Modelagem de Dados de  
Alta Frequência: Aplicação à Previsão Horária  
de Carga Elétrica.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título 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. José Francisco Moreira Pessanha**

UERJ

**Prof. Ricardo Tanscheit**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de agosto de 2010.

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

### **Schaiane Nogueira Ouverney Barroso**

Graduou-se em Estatística pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas ENCE/IBGE em 2008 com a monografia intitulada "Uma comparação do Modelo Box & Jenkins sugerido pela ANEEL com a Modelagem Estrutural na previsão do Consumo Residencial de Energia Elétrica".

#### Ficha Catalográfica

Barroso, Schaiane Nogueira Ouverney

Modelo HPA para a modelagem de dados de alta frequência: aplicação à previsão horária de carga elétrica / Schaiane Nogueira Ouverney Barroso; orientador: Reinaldo Castro Souza – 2010.

89 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. HPA. 3. ARIMA. 4. Dados de alta frequência. 5. Previsão de carga. 6. Séries temporais. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*Para o meu avô,  
Laurindo Aldeno Nogueira Peixoto,  
por simplesmente acreditar.*

## Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que me deu a vida e por ser meu alicerce sempre.

Obrigada, também, à minha família pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos. Agradeço pelas boas energias, pelo incentivo e amor que me dedicaram.

Aos meus pais, Wanderley e Nilcéia, que foram compreensivos e confiaram em mim quando eu decidi correr atrás dos meus sonhos. Em especial à minha mãe, que sempre foi meu exemplo de mulher e de ser humano por seu caráter e força.

À minha irmã, Rayssa, que me fez ir mais longe para mostrar que nada é impossível e que sempre vale à pena tentar.

Ao meu marido, Giovane, que me apoiou sempre com carinho, amor e atenção, e que participou diretamente desse trabalho revisando, pacientemente, os textos e me orientando em toda a programação. Sem ele eu não teria conseguido. Formamos uma dupla e tanto, na vida e no trabalho.

Ao meu orientador, Professor Reinaldo, que me sugeriu o tema, me guiou e me apoiou em todo o processo de desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Hasan Al-Madfai, desenvolvedor da metodologia abordada, pela solicitude em tirar dúvidas por e-mail e pelos papers e apresentações cedidas.

À CAPES e à PUC-Rio pela oportunidade e apoio financeiro imprescindível à obtenção deste título.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio pela dedicação. Em especial, agradeço à Ana Paiva pelo carinho e atenção.

Aos funcionários das bibliotecas da PUC, em especial à Mônica de Oliveira da BS/CTC pela atenção e eficiência em me ajudar com inúmeras solicitações de livros e artigos.

Aos membros da banca por aceitar o convite e pelas contribuições valiosas.

Aos queridos amigos da PUC-Rio: Fernando Luiz Cyrino de Oliveira, Paulo Roberto Bastos Maia, Alexandre José dos Santos e Ilitch Vitali Gomes da Silva pelas dicas, idéias, conversas constantes e amizade.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram, torceram por mim e me apoiaram para vencer mais esta etapa.

## Resumo

Barroso, Schaiane Nogueira Ouverney; Souza, Reinaldo Castro. **Modelo HPA para a modelagem de dados de alta frequência: aplicação à previsão horária de carga elétrica.** Rio de Janeiro, 2010. 89p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A previsão de curto prazo, que envolve dados de alta frequência, é essencial para a confiabilidade e eficiência da operação do setor elétrico, fazendo com que a alocação da carga seja feita de forma eficiente, além de indicar possíveis distorções nos próximos períodos (dias, horas, ou frações de hora). A fim de garantir a operação energética, diversas abordagens têm sido empregadas com vistas à previsão de carga de energia a curto prazo. Dentre elas, pode-se citar os modelos híbridos de Séries Temporais, Lógica Fuzzy e Redes Neurais e o Método Holt-Winters com múltiplos ciclos que é a principal ferramenta utilizada atualmente. O HPA (*Hierarchical Profiling Approach*) é um modelo que decompõe a variabilidade dos dados de séries temporais em três componentes: determinística, estocástica e ruído. A metodologia é capaz de tratar observações únicas, periódicas e aperiódicas, e ao mesmo tempo, serve como uma técnica de pré-branqueamento. Este trabalho tem por objetivo implementar o HPA e aplicá-lo a dados de carga de energia elétrica de 15 em 15 minutos para um estado da região Sudeste do Brasil. Também serão analisadas as previsões de curto prazo geradas pelo modelo para a série considerada, visto que a habilidade preditiva do HPA ainda é desconhecida para séries brasileiras. As previsões forneceram Coeficiente U de Theil igual a 0,36 e um Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE, *Mean Absolute Percentage Error*) de 5,46%, o qual é bem inferior ao valor fornecido pelo Modelo Ingênuo usado para comparação (15,08%).

## Palavras-chave

HPA, Hierarchical Profiling Approach; ARIMA; dados de alta frequência; previsão de carga; Séries Temporais.

## Abstract

Barroso, Schaiane Nogueira Ouverney; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **HPA model for modeling high frequency data: application to forecast hourly electric load.** Rio de Janeiro, 2010. 89p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Short-term forecast, which involves high frequency data, is essential for a reliable and efficient electricity sector operation, enabling an efficient power load allocation and indicating possible distortions in the coming periods (days, hours, or hour fractions). To ensure the operation efficiency, several approaches have been employed in order to forecast the short-term load. Among them, one can mention the hybrid models of Time Series, Fuzzy Logic and Neural Networks and Holt-Winters Method with multiple cycles, which is the main tool used today. The HPA (Hierarchical Profiling Approach) model decomposes the variability of time series data into three components: deterministic, stochastic and noise. The model is capable of modeling single, periodic and aperiodic observations, and at the same time function as a pre-whitening technique. This work aims to implement the HPA and to apply it in 15 in 15 minutes load data of a Brazil's southeastern state, since the predictive ability of the HPA is still not known for the Brazilian series. The short-term forecasts estimated for the series considered are analyzed and provided a Theil-U Coefficient equal to 0.36 and a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 5.46%, which is smaller than the value given by the Naive Model (15.08%).

## Keywords

HPA; Hierarchical Profiling Approach; ARIMA; high frequency data; load forecasting; Time Series.



## Sumário

1 Introdução	14
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1. Séries Temporais	17
2.2. Processo Estocástico	20
2.3. Previsão de Séries Temporais	21
2.4. Método Ingênuo (Naíve)	23
2.5. Metodologia de Box & Jenkins	24
2.5.1. Processo de modelagem dos modelos ARIMA	27
2.5.2. Testes de adequação do modelo	30
2.6. Regressão Harmônica	31
2.6.1. Regressão Harmônica com Tendência Polinomial	36
2.6.2. Periodograma	37
2.6.3. Teste de Fisher	38
2.7. Ajuste polinomial de curvas	40
3 Modelo Proposto	42
4 Aplicação do Modelo	48
4.1. Perfil de Nível 1 – Padrões para os dias da semana	52
4.2. Perfil de Nível 2 – Tratamento de feriados	59
4.3. Perfil de Nível 3 – Identificação e modelagem do padrão sazonal	70
4.4 Criação da Função Determinística	74
4.5 Modelagem da Componente Estocástica	76
5 Resultados	80
6 Conclusões	83
6.1. Sugestões	84
7 Referências Bibliográficas	86

**Lista de tabelas**

Tabela 4.1 Lista de feriados fixos	62
Tabela 4.2 Lista de feriados móveis	62

## Lista de figuras

Figura 2.1 Mecanismo de geração de uma série temporal	25
Figura 2.2 Análise de uma série temporal	25
Figura 4.1 Série de demanda de energia em todo o histórico	49
Figura 4.2 Demanda de energia a cada quinze minutos de um ano	49
Figura 4.3 Demanda de energia a cada quinze minutos de um trimestre	50
Figura 4.4 Demanda de energia a cada quinze minutos de um mês	50
Figura 4.5 Demanda de energia a cada quinze minutos de uma semana	51
Figura 4.6 Demanda de energia a cada quinze minutos de um dia	51
Figura 4.7 Padrão médio observado e polinômio estimado para o perfil de domingo	54
Figura 4.8 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil de segunda-feira	54
Figura 4.9 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil médio de terça, quarta e quinta-feira	55
Figura 4.10 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil de sexta-feira	56
Figura 4.11 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil de sábado	56
Figura 4.12 Série obtida no nível 1	57
Figura 4.13 Série residual proveniente do ajuste de nível 1	58
Figura 4.14 Demanda de carga elétrica em uma semana que ocorreu um feriado	60
Figura 4.15 Demanda em uma semana de feriado comum, uma semana de ocorrência de Natal e em uma semana onde não houve feriado	61
Figura 4.16 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil de domingo de feriado	63
Figura 4.17 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil dos feriados às segundas-feiras	64
Figura 4.18 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil dos feriados às terças-feiras	65
Figura 4.19 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil dos feriados	

às quartas-feiras	65
Figura 4.20 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil dos feriados às quintas-feiras	66
Figura 4.21 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil dos feriados às sextas-feiras	67
Figura 4.22 Padrão observado e polinômio estimado para o perfil dos feriados aos sábados	68
Figura 4.23 Série de polinômios para os feriados obtida no nível 2	69
Figura 4.24 Série de resíduos obtida após o ajuste dos níveis 1 e 2	70
Figura 4.25 Periodograma da série de demanda de carga de energia elétrica	71
Figura 4.26 Ajuste da série resultantes dos níveis 1 e 2	73
Figura 4.27 Série de resíduos obtidos após o ajuste	74
Figura 4.28 Histograma dos dados	77
Figura 4.29 Normal Q-Q Plot dos dados de demanda de carga elétrica	77
Figura 4.30 FAC e FACP da série de demanda de carga elétrica	78
Figura 5.31 Comparação entre as previsões geradas pelo HPA e pelo Método Ingênuo	81

*“Entre pedras  
cresceu minha poesia.  
Minha vida...  
Quebrando pedras  
e plantando flores.”  
(Cora Coralina)*