



Douglas Alexander Alves de Farias

**Previsão da Carga de Energia Diária em
Patamares Combinando Técnicas Estatísticas e
de Inteligência Computacional**

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
Setembro de 2008



Douglas Alexander Alves de Farias

**Previsão da Carga de Energia Diária em
Patamares Combinando Técnicas Estatísticas e
de Inteligência Computacional**

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

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco
Departamento de Economia – PUC-Rio

Dr. Plutarcho Maravilha Lourenço
CEPEL

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 8 de setembro de 2008

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

Douglas Alexander Alves de Farias

Graduado como Bacharel em Matemática pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2002, e Bacharel em Informática, também pela UERJ, em 2002

Ficha Catalográfica

Farias, Douglas Alexander Alves de

Previsão da carga de energia diária em patamares combinando técnicas estatísticas e de inteligência computacional / Douglas Alexander Alves de Faria ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2008.

114 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Carga de energia agregada em intervalos temporais dentro de um mesmo dia. 3. Modelo híbrido. 4. Patamar de carga. 5. Leve, médio e pesado. 6. Temperatura. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Este trabalho é dedicado ao meu pai,
Washington Carlos Alves de Farias,
falecido durante a elaboração deste trabalho,
pela orientação de vida, apoio incondicional,
carinho e amor.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Reinaldo Castro Souza, pelo apoio e confiança.

À PUC e ao ONS pelo incentivo proporcionado.

A todos os professores pelos seus ensinamentos.

Um agradecimento muito especial ao Plutarcho, pela simplicidade, coerência e serenidade, que foram de grande valor no final deste trabalho.

Ao Evandro Mendes por ter me ajudado, incentivado e apoiado.

À Fausto Menezes pelo apoio e confiança.

Aos demais colegas de trabalho pelo apoio, confiança e dedicação.

A minha mãe Marlene e meus irmãos Jefferson e Ericka, por todo amor, carinho e dedicação.

À minha esposa Ana Paula, pela compreensão, amor, carinho e ajuda nos momentos mais difíceis.

A todos os amigos que sempre me apoiaram.

Resumo

Farias, Douglas Alexander Alves de; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Previsão de Carga de Energia Diária em Patamares Combinando Técnicas Estatísticas e de Inteligência Computacional**. Rio de Janeiro, 2008. 114p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta um estudo sobre o comportamento da carga de energia agregada em intervalos temporais dentro de um mesmo dia. Esse tipo de agregação já vem sendo utilizado no setor elétrico brasileiro, sob a forma de três patamares de carga, denominados leve, média e pesada. No entanto, tais patamares são sempre obtidos indiretamente, a partir da agregação da carga horária, não tendo sido encontrado, até a publicação dessa dissertação, nenhum tratamento de forma direta dos mesmos. O trabalho desenvolvido na dissertação descreve matematicamente o cálculo dos três patamares de carga e faz uma análise das séries dessas variáveis, verificando suas características próprias, relações entre si e a influência de variáveis exógenas. Apresenta, também, a modelagem de alguns métodos de previsão para essas séries, empregando técnicas tanto estatísticas quanto de inteligência computacional e propõe um modelo híbrido de previsão, combinando regressão dinâmica, classificador de padrões, lógica nebulosa e um método para combinar os padrões. No modelo proposto, a regressão dinâmica é empregada na previsão da carga diária global, usada para adequar os perfis, descritos de forma normalizada, aos níveis reais das séries. Os perfis são obtidos a partir de um classificador de padrões baseado na técnica *subtractive clustering*. A combinação dos perfis, que compõem a previsão dos patamares para o horizonte desejado, é feita por um sistema de lógica nebulosa, que usa a temperatura como variável de entrada, tratando de forma intrínseca relações não lineares entre essas variáveis, e um método que trata a saída do sistema nebuloso de forma empírica.

Palavras-chave

Carga de energia agregada em intervalos temporais dentro de um mesmo dia, modelo híbrido, lógica nebulosa, patamar de carga, leve, médio e pesado, temperatura.

Abstract

Farias, Douglas Alexander Alves de; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Daily Electricity Forecasting in Load Levels, Combining Statistical and Computational Intelligence Tools**. Rio de Janeiro, 2008. 114p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents a study of electricity load aggregated in time intervals into the same day. This type of aggregation has been used by the Brazilian's electrical sector in the form of three load levels called low, middle and high. However, these load levels were always indirectly achieved from the hourly load aggregation, and it was not found any direct treatment of them as a series up to this publication. The work developed in this dissertation describes mathematically the calculation of the three levels of load and makes an analysis of the series formed by these variables checking their own characteristics, the relationship among themselves and the influence of exogenous variables. It also shows the modeling of some forecast methods for such series employing techniques of both statistics in computational intelligence, introduces the level profile concept and proposes a hybrid model of forecasting, formed by dynamic regression, pattern classification and fuzzy logic, to predict the load level pattern. In the proposed model, the dynamic regression is used in the forecasting of the daily global load that is used to match the resulting pattern, described in a normalized way to the actual load values. The profiles are obtained from a classifier based on the subtractive clustering technique. The combination of the profiles that compose the level pattern forecast to the desired horizon is carried out by a fuzzy logic system that uses the temperature as input variable intrinsically treating non-linear relationships between load level and temperature variables.

Keywords

Electricity load aggregated in time intervals into the same day, hybrid model, fuzzy logic, load levels called low, middle and high, temperature.

Sumário

1. Introdução.....	13
1.1. Histórico do SEB.....	13
1.2. Operação do SEB.....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.4. Organização da Dissertação.....	19
2. Patamar de Carga de Energia.....	20
2.1. Definição.....	20
2.2. Cálculo de Patamares.....	23
2.3. Séries.....	24
3. Metodologias Analisadas.....	28
3.1. Séries Temporais.....	28
3.1.1. Conceitos Importantes.....	29
3.2. Métricas de Avaliação dos Modelos.....	29
3.3. Método de Amortecimento Exponencial.....	30
3.4. Modelos Box & Jenkins.....	32
3.4.1. Modelos Auto-Regressivos (Ar).....	32
3.4.2. Modelos Médias-Móveis (Ma).....	33
3.4.3. Modelos Arma.....	34
3.4.4. Modelos Sarima.....	34
3.5. Modelos de Regressão Dinâmica.....	35
3.5.1. Estrutura dos Modelos.....	35
3.5.2. Estratégia de Modelagem.....	36
3.6. Rede Neural.....	38
3.7. Lógica Nebulosa.....	42
4. Aplicação das Metodologias Analisadas.....	45
4.1. Dados de Entrada.....	45
4.2. Resultados das Metodologias Analisadas.....	47
4.2.1. Modelos Estatísticos.....	48
4.2.2. Modelo de Rede Neural.....	50
4.2.3. Conclusão dos Resultados Obtidos.....	52
5. Modelo Proposto.....	54
5.1. Definição dos Perfis de Patamares de Carga.....	55
5.2. Cálculo dos Fatores de Combinação.....	59
5.3. Combinação dos Perfis.....	62
5.4. Previsão da Carga Global.....	63
5.5. Aplicação do Modelo Proposto.....	64
6. Conclusão.....	71
6.1. Trabalhos Futuros.....	72
Referências Bibliográficas.....	74

Anexo I – Modelos Estatísticos para o Patamar de Carga Leve.....	77
Anexo II – Modelos Estatísticos para o Patamar de Carga Media	82
Anexo III – Modelos Estatísticos para o Patamar de Carga Pesada.....	87
Anexo IV – Modelos Estatísticos para a Carga Global.....	92
Anexo V – Perfis Selecionados para os dias Típicos no Modelo Híbrido	97
Anexo VI – Desempenho da Seleção de Padrões do Modelo Híbrido em Relação ao Modelo Naive	99
Anexo VII – Conjuntos e Regras do Sistema Nebuloso dentro do Modelo Híbrido Aplicado aos dias Típicos.....	101

Lista de figuras

Figura 1 - Cadeia de Modelos.....	18
Figura 2 - Curva de Carga Diária e Tipos de Agregação da Carga.....	21
Figura 3 - Curva de Carga.....	22
Figura 4 - Patamares de Carga.....	22
Figura 5 - Patamares de Carga Leve, Média e Pesada (01/01/2003 até 31/12/2005).....	25
Figura 6 - Temperaturas Mínima, Máxima e Média (01/01/2003 até 31/12/2005).....	26
Figura 7 - Geração de uma série temporal.....	32
Figura 8 - Fluxograma sobre a Construção de um Modelo de Regressão Dinâmica.....	37
Figura 9 - Representação de um Neurônio Biológico.....	38
Figura 10 - Representação de um Neurônio Artificial.....	39
Figura 11 - Gráfico da Função de Ativação Sigmoidal.....	40
Figura 12 - Arquitetura de uma Rede Neural Artificial.....	41
Figura 13 - Diagrama de um Sistema Nebuloso.....	43
Figura 14 - Exemplo de Conjunto Nebuloso.....	43
Figura 15 - Estrutura de Composição das Regras de Inferência.....	44
Figura 16 - Perfis Selecionados - Mais Frios.....	58
Figura 17 - Perfis Selecionados - Mais Quentes.....	58
Figura 18 - Conjuntos Fuzzy - Temperatura Máxima - Dias Úteis.....	60
Figura 19 - Conjuntos Fuzzy - Temperatura Mínima - Dias Úteis.....	61
Figura 20 - Estrutura do Modelo Nebuloso Proposto.....	61
Figura 21 - Superfície Gerada pela Inferência Nebulosa Dias Úteis - Períodos mais Quentes do Ano.....	62
Figura 22 - Perfis Selecionados e Média dos Perfis Selecionados.....	65
Figura 23 - MAPE da Combinação de Perfis do Modelo Proposto (1-Leve, 2-Média, 3-Pesada) e do Modelo Naive (4-Leve, 5-Média, 6-Pesada).....	66
Figura 24 - Patamar de Carga Leve (CL) - Amortecimento Exponencial.....	78
Figura 25 - Patamar de Carga Leve (CL) - Box-Jenkins.....	79
Figura 26 - Patamar de Carga Leve (CL) - Regressão Dinâmica.....	81
Figura 27 - Patamar de Carga Média (CM) - Amortecimento Exponencial.....	83
Figura 28 - Patamar de Carga Média (CM) - Box-Jenkins.....	84
Figura 29 - Patamar de Carga Média (CM) - Regressão Dinâmica.....	86
Figura 30 - Patamar de Carga Pesada (CP) - Amortecimento Exponencial.....	88
Figura 31 - Patamar de Carga Pesada (CP) - Box-Jenkins.....	89
Figura 32 - Patamar de Carga Pesada (CP) - Regressão Dinâmica.....	91
Figura 33 - Carga Global (CT) - Amortecimento Exponencial.....	93
Figura 34 - Carga Global (CT) - Box-Jenkins.....	94
Figura 35 - Carga Global (CT) - Regressão Dinâmica.....	96
Figura 36 - Método Subtractive Clustering - Perfis de Dias Mais Frios do Ano.....	97
Figura 37 - Método Subtractive Clustering - Perfis de Dias Mais Quentes do Ano.....	98
Figura 38 - Comparação do Método de Seleção de Perfis do Modelo Híbrido X Seleção NAIVE - Dias Mais Frios do Ano.....	99
Figura 39 - Comparação do Método de Seleção de Perfis do Modelo Híbrido X Seleção NAIVE - Dias Mais Quentes do Ano.....	100
Figura 40 - Conjuntos Fuzzy - Temperaturas Máxima e Mínima - Domingos/Feriados.....	101

Figura 41 - Conjuntos Fuzzy - Temperaturas Máxima e Mínima – Segundas-feiras.	101
Figura 42 - Conjuntos Fuzzy - Temperaturas Máxima e Mínima – Sábados.....	102
Figura 43 - Conjuntos Fuzzy - Temperaturas Máxima e Mínima – Domingos/Feriados.....	102
Figura 44 - Conjuntos Fuzzy - Temperaturas Máxima e Mínima – Segundas-feiras.	102
Figura 45 - Conjuntos Fuzzy - Temperaturas Máxima e Mínima – Sábados.....	102
Figura 46 - Superfície Gerado pela Inferência Nebulosa - Dias Úteis.....	111
Figura 47 - Superfície Gerado pela Inferência Nebulosa - Domingos/Feriados.	111
Figura 48 - Superfície Gerado pela Inferência Nebulosa - Segundas-feiras.	112
Figura 49 - Superfície Gerado pela Inferência Nebulosa - Sábados.....	112
Figura 50 - Gerado pela Inferência Nebulosa - Dias Úteis.	113
Figura 51 - Gerado pela Inferência Nebulosa - Domingos/Feriados.....	113
Figura 52 - Gerado pela Inferência Nebulosa - Segundas-feiras.....	114
Figura 53 - Gerado pela Inferência Nebulosa - Sábados.	114

Lista de tabelas

Tabela 1 - Resumo das principais mudanças do SEB nos últimos anos.....	15
Tabela 2 - Intervalos dos Patamares	20
Tabela 3 - Patamares de Carga e Variáveis Associadas	45
Tabela 4 - Principais Correlações Identificadas	46
Tabela 5 – Avaliação dos Modelos Estatísticos	50
Tabela 6 – Avaliação do Modelo de Rede Neural (1 – sem domingos).....	51
Tabela 7 – Avaliação do Modelo de Rede Neural (2 – domingos)	53
Tabela 8 – Comparação dos Modelos – Regressão Dinâmica X Rede Neural.....	53
Tabela 9 - Parâmetros do Modelo de Regressão Dinâmica para a Carga Global (CT)	64
Tabela 10 - Período Utilizado na Avaliação.....	65
Tabela 11 - Desempenhos de Modelagem e Testes.....	67
Tabela 12 - Estatística - Dia Útil	67
Tabela 13 - Estatística - Sábado	68
Tabela 14 - Estatística – Domingo e Feriado	68
Tabela 15 - Estatística – Segunda-feira	69
Tabela 16 - Desempenho com -10% nas Temperaturas – Dia Util.	70
Tabela 17 - Desempenho com +20% nas Temperaturas – Dia Util.	70
Tabela 18 - Banco de Regras para Domingos e Feriados.....	103
Tabela 19 - Banco de Regras para Segunda-feira.....	104
Tabela 20 - Banco de Regras para Dias Úteis.	105
Tabela 21 - Banco de Regras para Sábado.	106
Tabela 22 - Banco de Regras para Domingo.....	107
Tabela 23 - Banco de Regras para Segunda-feira.....	108
Tabela 24 - Banco de Regras para Dia Útil.....	109
Tabela 25 - Banco de Regras para Sábado.	110