

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA HÍBRIDO DE PREVISÃO DE CARGA
ELÉTRICA EM CURTO PRAZO UTILIZANDO
REDES NEURAS ARTIFICIAIS E LÓGICA FUZZY**

por

GEANE BEZERRA DA SILVA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. RONALDO R. B. DE AQUINO, D.Sc., UFPE

Recife, Fevereiro de 2006

© Geane Bezerra da Silva, 2006

Silva, Geane Bezerra da

Sistema híbrido de previsão de carga elétrica em curto prazo utilizando redes neurais artificiais e lógica fuzzy / Geane Bezerra da Silva. – Recife : O Autor, 2006.

xii, 88 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Elétrica, 2006.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica – Processamento de energia. 2. Previsão de carga elétrica – Modelos de previsão. 3. Inteligência artificial – Redes neurais artificiais – Lógica Fuzzy. I. Título.

**621.31
621.317**

**CDU (2.ed.)
CDD (22.ed.)**

**UFPE
BC2006-340**



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
TESE DE MESTRADO ACADÊMICO DE

GEANE BEZERRA DA SILVA

TÍTULO


**“SISTEMA HÍBRIDO DE PREVISÃO DE CARGA ELÉTRICA EM
CURTO PRAZO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS
E LÓGICA FUZZY”**

A comissão examinadora composta pelos professores:
RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEESP/UFPE, MANOEL
AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEESP/UFPE e BENEMAR
ALENCAR DE SOUZA, DEE/UFCG, sob a presidência do primeiro,
consideram a candidata **GEANE BEZERRA DA SILVA**
APROVADA.

Recife, 28 de abril de 2006.



JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Coordenador do PPGE



RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO
Orientador e Membro Titular Interno



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA
Membro Titular Externo



MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR
Membro Titular Interno

*Á Geraldo e Cacilda, meus pais, fontes de
inspiração para realização de todos os
meus projetos de vida.*

*Á Janaina e Janise, minhas irmãs, pessoas
belas e admiráveis.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela sua presença constante em minha vida, por iluminar meus caminhos quando tudo parecia tão difícil.

Agradeço ao meu pai Geraldo pelo amor, compreensão, apoio e ao incentivo para seguir sempre em frente, e por me ensinar que todo ser humano precisa de metas.

Agradeço a minha mãe Cacilda pelo carinho que só as mães são capazes de oferecer, pela paciência, e por compreender que a sala de estudo nunca ficaria arrumada e que meus papéis faziam parte da decoração.

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Ronaldo Aquino pela paciência e dedicação dispensada, verdadeiro mestre sempre presente e disposto a ensinar.

Agradeço a minhas irmãs, Janaina e Janise pelas horas de diversão que ajudaram a tornar o caminho mais suave.

Agradeço a Prof^ª. Aida Ferreira pela amizade, pela disponibilidade a ensinar e transmitir conhecimento de forma clara e objetiva.

Agradeço a Prof^ª. Milde Maria pelas conversas esclarecedoras, a disponibilidade e o incentivo.

Agradeço a CELPE – Companhia Energética de Pernambuco pelos dados fornecidos, sem os quais este trabalho não seria possível.

Agradeço a todos os meus professores do mestrado, ao Prof. Manoel Afonso que sempre acreditou na finalização deste projeto.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de jornada Alex, Otoni, Zecão, Josinaldo e Tibúrcio conhecedores de quão dura é a vida de mestrando, pelo apoio, incentivo e confiança.

Agradeço a Ricardo, amigo que tornou o início do mestrado uma descoberta de novos conceitos.

Agradeço aos todos meus amigos pelo incentivo e por estarem presentes em fases importantes desta jornada.

Outrossim, agradeço a todos que auxiliaram a tornar este projeto possível.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Sistema Híbrido de Previsão de Carga Elétrica em Curto Prazo Utilizando Redes Neurais Artificiais e Lógica Fuzzy

Geane Bezerra da Silva

Abril/2006

Orientador: Prof. RONALDO R. B. DE AQUINO, D.Sc., UFPE

Área de Concentração: Processamento de energia.

Palavras-chave: Redes neurais artificiais, ANFIS, previsão de carga, lógica fuzzy (LF)

Número de Páginas: 88

RESUMO: O presente trabalho apresenta um sistema de previsão de carga horária em curto prazo (sete dias) formado por duas etapas. Na primeira etapa foram escolhidas duas redes neurais artificiais para prever o consumo diário total em um horizonte de sete dias, uma rede para os dias úteis e outra para aos dias não-úteis, o processo de escolha das redes passou por uma análise da estrutura de entrada, da base de dados e do algoritmo de treinamento. Para gerar as melhores redes utilizou-se o método *k-fold crossvalidation*. A segunda etapa é responsável em fornecer o comportamento da curva de carga, ou seja, a distribuição horária do consumo diário, para isso utilizou-se o sistema ANFIS (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*) para gerar um Sistema de Inferência Fuzzy- SIF que fornece um coeficiente que representa a fração do consumo horário em relação ao consumo diário, para inicialização dos modelos optou-se pela comparação entre dois métodos: o método de clusterização subtrativa desenvolvido por Chui S e o método por inspeção onde o SIF é gerado a partir do conhecimento do especialista. Optou-se por estes modelos devido à facilidade de implementação, a capacidade de generalização e resposta rápida. Os resultados obtidos foram comparados com a bibliografia e mostram que o modelo desenvolvido tem alta capacidade de generalização e apresenta baixos valores de MAPE (erro médio percentual), além de utilizar somente dados de carga elétrica como entrada para as redes e para o sistema ANFIS sem a necessidade de dados climáticos.

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Hybrid System of Electric Load Forecast in Short-term Using Artificial Neural Network and Fuzzy Logic

Geane Bezerra da Silva

April /2006

Supervisor: Prof. RONALDO R. B. DE AQUINO, D.Sc., UFPE

Area of Concentration: Energy processing

Keywords: Artificial neural network (ANN), ANFIS, Load forecasting, Fuzzy logic (FL)

Number of Pages: 88.

ABSTRACT: This work tackles the development of a hybrid intelligent system joining an artificial neural network (ANN) based technique and fuzzy logic for short-term load forecasting in the 7 days ahead. The system is composed by two phases. In the first phase were chosen two artificial neural network for short-term load forecasting in the 7 days ahead, a net for the useful and other days for to the holiday days, the process of choice of the nets went by an analysis of the entrance structure, of the base of data and of the training algorithm. To generate the best nets the method k-fold cross-validation it was used. The second stage is responsible in supplying the behavior of the load curve, in other words, the hourly distribution of the daily consumption, for that the system ANFIS was used (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) to generate a Fuzzy Inference System – FIS that supplies a coefficient that represents the fraction of the hourly consumption in relation to the daily consumption, for initialization of the models she opted for the comparison among two methods: the method of subtractive clustering and the method by inspection where FIS is generated starting from the specialist's knowledge. She opted for these models due to the implementation easiness, the generalization capacity and fast answer. The obtained results were compared with the bibliography and they show that the developed model has high generalization capacity and it presents low values of MAPE.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos do Trabalho	3
1.3 Organização da Dissertação.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2 Previsão de Carga Elétrica	5
2.1 Sistema Elétrico Brasileiro	5
2.1.1 Operação do SIN em 2004	6
2.2 O Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro	6
2.2.1 Influência das Normas do Setor Elétrico na Previsão de Carga.....	8
2.3 Objetivo da Previsão de Carga	9
CAPÍTULO 3.....	11
3 Revisão Bibliográfica	11
3.1 Modelos de Previsão de Carga	11
3.1.1 Redes Neurais Artificiais na Previsão de Carga.....	11
3.1.2 Lógica Fuzzy na Previsão de Carga	13
3.1.3 Sistemas Neuro-Fuzzy na Previsão de Carga	13
CAPÍTULO 4.....	16
4 Base Teórica	16
4.1 Redes Neurais Artificiais.....	16
4.1.1 Treinamento das Redes Neurais	18
4.1.2 Gradiente descendente (GD)	18
4.1.3 Algoritmo Resilient Propagation (Rprop)	20
4.1.4 Algoritmo Levenberg-Marquardt	21
4.2 Lógica Fuzzy	23
4.2.1 Sistema de Inferência Mamdani	24
4.2.2 Sistema de Inferência Takagi-Sugeno	25
4.3 Sistema Neuro- Fuzzy - ANFIS.....	26

4.3.1	Aprendizado no modelo ANFIS	30
4.3.2	Sistema de Inferência Inicial	32
4.3.3	Método de Inicialização por inspeção	32
4.3.4	Método de Inicialização por Clusterização Subtrativa	33
CAPÍTULO 5.....		35
5	Modelagem do Sistema Híbrido de Previsão.....	35
5.1	Introdução.....	35
5.2	Análise da Curva de Carga	36
5.3	Base de dados para treinamento das Redes Neurais.....	39
5.3.1	Seleção de Características	40
5.3.2	Pré-Processamento dos dados.....	40
5.3.3	Transformação dos dados	41
5.4	Criação das Bases de Dados	43
5.4.1	Base de Dados do Tipo 1	43
5.4.2	Base de dados Tipo 2.....	44
5.4.3	Base de dados Tipo 3.....	44
5.4.4	Base de dados Tipo 4.....	45
5.4.5	Avaliação dos Resultados.....	45
5.5	Descrição do Modelo de Previsão do Consumo Diário.....	47
5.5.1	Preparação dos Dados.....	47
5.5.2	Processo de Treinamento e escolha das melhores Redes	50
5.6	Sistema ANFIS para Previsão Horária	57
5.6.1	Análise das Curvas de Carga em relação ao Consumo Diário	57
5.6.2	Estrutura e Treinamento do Sistema ANFIS	60
5.6.3	Sistema com SIF inicial por Inspeção	62
5.6.4	Sistema com SIF inicial por Clusterização Subtrativa	66
CAPÍTULO 6.....		70
6	Simulação do Sistema Proposto	70
6.1	Introdução.....	70
6.2	PREVER.....	70
6.3	Previsão de Carga Utilizando o Modelo Proposto.....	73
6.3.1	Previsão Consumo Diário.....	73
6.3.2	Previsão Consumo Diário dias úteis.....	74
6.3.3	Previsão Consumo Diário dias não-úteis.....	75
6.3.4	Previsão do Consumo Horário.....	77
CAPÍTULO 7.....		82
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	82
7.1	Conclusões.....	82
7.2	Trabalhos Futuros	83
8	Referências Bibliográficas	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1 Neurônio Biológico	16
Figura 4-2 Neurônio Artificial.....	17
Figura 4-3 Funções de ativação não-linear.....	17
Figura 4-4 Rede Neural Múltiplas Camadas - <i>MLP</i>	18
Figura 4-5 Diagrama de um Sistema Fuzzy	23
Figura 4-6 Sistema de inferência do tipo Takagi-Sugeno	27
Figura 4-7 Sistema ANFIS equivalente.....	28
Figura 5-1 Diagrama do Sistema Híbrido de Previsão.....	36
Figura 5-2 Curvas de carga diárias referentes à semana de 08/08/2004 a 14/08/2004	37
Figura 5-3 Patamar de carga diária referentes à semana de 08/08/2004 a 14/08/2004	37
Figura 5-4 Curvas de carga diárias referentes à semana de 01/01/2004 a 08/01/2004 comparadas com o feriado da Confraternização Universal	38
Figura 5-5 Curvas de carga diárias referentes à semana de 21/04/2004 a 28/04/2004 comparadas com o feriado de Tiradentes	38
Figura 5-6 Consumo dos anos de 2000 a 2004	41
Figura 5-7 Rede Neural para a Previsão do Consumo Diário dos Dias Úteis.....	56
Figura 5-8 Rede Neural para a Previsão do Consumo Diário dos Dias Não-Úteis.....	56
Figura 5-9 Curvas de carga percentual dos domingos de Agosto de 2004	58
Figura 5-10 Curvas de carga percentual das quintas-feiras de Maio de 2004.....	59
Figura 5-11 Comparação entre as curvas de carga percentual para o feriado de 24 de junho dos anos de 2003 e 2004.....	59
Figura 5-12 Comparação entre as curvas de carga percentual para o feriado de 24 de junho com o sábado e o domingo anterior ao feriado.....	60
Figura 5-13 Sistema de Inferência para a previsão do multiplicador.....	62

Figura 5-14 Série dos coeficientes para os dias da semana do ano	63
Figura 5-15 Sistema ANFIS para Previsão dos Coeficientes	64
Figura 5-16 Funções de pertinência da entrada 1 para a hora 8 antes do treinamento.....	65
Figura 5-17 Funções de pertinência da entrada 1 para a hora 8 depois do treinamento....	65
Figura 5-18 Estrutura do sistema ANFIS de Previsão dos Coeficientes da Hora 8	67
Figura 5-19 Funções de pertinência da entrada 1 antes do treinamento.....	68
Figura 5-20 Funções de pertinência da entrada 1 depois do treinamento	68
Figura 6-1 Diagrama do PREVER para a previsão no horizonte de 7 dias.....	73
Figura 6-2 Comparação da Curva de Carga do dia 01/01/2005 realizada com a prevista pelos modelos	80
Figura 6-3 Comparação da Curva de Carga do dia 01/01/2005 realizada com a prevista pelos modelos	81

