



**Flávia Cristina da Costa Serrão**

**Modelo de Previsão de Carga de Curto Prazo  
Utilizando Redes Neurais e Lógica Fuzzy**

**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  
Março de 2003



**Flávia Cristina da Costa Serrão**

**Modelo de Previsão de Carga de Curto Prazo  
Utilizando Redes Neurais e Lógica Fuzzy**

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.

**Prof. Reinaldo Castro Souza**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Gutemberg Hespanha Brasil**

Departamento de Estatística – UFES

**Prof. João Carlos Aires**

Instituto de Energia – PUC-Rio/Light

**Prof. Tufi Machado Soares**

Departamento de Estatística – UFJF

**Prof. Ney Dumont**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – Puc-Rio

Rio de Janeiro, 21 de março de 2003

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

**Flávia Cristina da Costa Serrão**

Graduou-se em Estatística na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) em 1999.

Ficha Catalográfica

Serrão, Flávia Cristina da Costa

Modelo de previsão de carga de curto prazo utilizando redes neurais e lógica fuzzy / Flávia Cristina da Costa Serrão; orientador: Reinaldo Castro Souza. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[13], 98 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 de carga de curto prazo. 3. Redes neurais. 4. Lógica fuzzy. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Dedico esta dissertação ao meu marido Márcio Lessa, aos meus pais Lacir e Getulio Serrão, a minha avó Eluzia.

## **Agradecimentos**

A Deus por me alimentar todos os dias com sua força.

Ao meu orientador Prof. Reinaldo Castro Souza por acreditar e apostar em mim.

Ao CNPq e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Ao meu marido Márcio Luiz Lessa por todo seu amor, apoio e paciência. Por estar sempre ao meu lado e fazer com que eu acreditasse que era possível.

Aos meus pais Lacir e Getulio por me ensinarem a viver, me dando um amor incondicional e sendo sempre exemplos de dignidade, honestidade e perseverança.

A minha avó Eluzia por seu amor sem limites e suas orações.

Aos meus sobrinhos pelo simples fato de existirem e serem razão de minha vida e as minhas irmãs Márcia e Ana Paula por seu amor, amizade e incentivo.

A todas as pessoas de minha família e amigos pela torcida.

As minhas amigas de todas as horas Cristiane Camacho e Rosane Kirchner por estarem sempre ao meu lado, chorando ou sorrindo, como dizem por aí “...se choramos ou se sorrimos o importante é que emoções nós vivemos...”

Ao pessoal do LEC, aos meninos do NEC, ao Carlinhos, a Ana Paiva e Flávio, ao pessoal da secretaria do DEE Alcina, Ana, Márcia e Danilo, aos meninos da sala 442 em especial Evandro e Isnarde (a culpa é sempre dele!), Luiz Fernando (LF). Agradecer por todo o carinho e atenção dispensados a mim.

A Ana Paula, Lucio, Eliane, Rodrigo, Felipe (Felipão), Kelly, Janaína, Mayte, Luiz Camacho por sua amizade e ajuda sempre na hora certa.

Ao Sr Plutarcho Maravilha Lourenço por suas sugestões e ajuda.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

## **Resumo**

Serrão, Flávia Cristina da Costa; Souza, Reinaldo Castro. Modelo de Previsão de Carga de Curto Prazo Utilizando Redes Neurais e Lógica Fuzzy. Rio de Janeiro, 2003. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver um método de previsão de carga elétrica de curto prazo (previsão horária), através de um sistema híbrido (Redes Neurais e Lógica Fuzzy) utilizando temperaturas máximas e mínimas como variáveis explicativas. Como primeiro passo, foram definidos os perfis homogêneos das curvas de carga diárias através de um classificador utilizando os Mapas Auto Organizáveis (Self-Organizing Maps-SOM). Um previsor será adicionado ao esquema de previsão através da Lógica Fuzzy que associará as variáveis climáticas aos perfis criados pela SOM produzindo as previsões.

O modelo foi aplicado em dados de duas concessionárias de energia elétrica do Brasil usando dados horários coletados durante dois anos.

### **Palavras-chave**

Previsão de carga de curto prazo; Redes Neurais; Lógica Fuzzy.

## **Abstract**

Serrão, Flávia Cristina da Costa; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). A short-term load forecasting model using Neural Network and Fuzzy Logic. Rio de Janeiro, 2003. 111p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents a short-term load forecasting procedure mixing a classifier scheme and a predictive scheme. The classifier is implemented through an artificial neural network using a non-supervised learning procedure (SOM). Concerning the predictive scheme, a fuzzy logic procedure uses climatic variables and their prediction to choose the appropriate profiles created by SOM and then combines them to produce the desired forecast.

The model is applied to two utilities in Brazil using hourly observations collected during two calendar years and the results obtained, in terms of mean absolute percentage error (MAPE) through the period analyzed, are presented.

## **Keywords**

Short-term load forecasting; Neural networks; Logic Fuzzy

## Sumário

1 Introdução	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivo	16
1.3. Organização do texto	18
2 As concessionárias	20
2.1. ENERSUL.	20
2.2. ESCELSA	21
3 Mercado de Energia Elétrica	22
4 Curvas de carga	25
4.1. Variáveis meteorológicas para previsão de carga	26
4.2. Modelagem da relação Carga x Temperatura	28
5 Inteligência Computacional	31
5.1. Lógica Fuzzy	32
5.1.1. Introdução	32
5.1.2. Conceitos básicos	33
5.1.3. Conjuntos fuzzy (nebulosos)	34
5.1.4. Operações entre conjuntos fuzzy	37
5.1.5. Sistema Fuzzy	37
5.2. Redes Neurais	42
5.2.1. Aprendizado Supervisionado	47
5.2.2. Aprendizado Não Supervisionado	48
6 Modelo Proposto	51
6.1. Introdução	51
6.2. Os dados disponíveis	51
6.3. O modelo	53

7 Aplicação do modelo com dados reais	58
7.1. Análises dos resultados	60
8 Conclusões e trabalhos futuros	68
8.1. Descrição do algoritmo	70
9 Referências bibliográficas	73
Anexo 1	76
Anexo 2	81
Anexo 3	85

## Lista de figuras

Figura 1 - Área de concessão da ENERSUL	20
Figura 2 - Área de concessão da ESCELSA	21
Figura 3 - Curvas de carga dos dias 01 e 08/10/2002	26
Figura 4 - Curvas de carga dos dias 16 e 23/10/2002	27
Figura 5 - Cargas x Temperatura horárias dos EUA	28
Figura 6 - Carga de pico e temperatura máximas Tóquio	29
Figura 7 - Carga x Temperatura horária ENERSUL	29
Figura 8 - Diagrama de dispersão ENERSUL	30
Figura 9 - Sistema Fuzzy	33
Figura 10 - Conjuntos fuzzy	36
Figura 11 - Saída sistema inferência Mandani	38
Figura 12 - Saída sistema inferência Takagi-Sugeno	39
Figura 13 - Saída sistema inferência Tsukamoto	40
Figura 14 - Neurônio biológico e artificial	43
Figura 15 - Rede neural direta	45
Figura 16 - Modelo básico de um neurônio	46
Figura 17 - Procedimento treinamento supervisionado	47
Figura 18 - Procedimento treinamento não supervisionado	49
Figura 19 - Rede de Kohonen	50
Figura 20 - Cargas média diárias de 2002 ESCELSA	52
Figura 21 - Cargas médias diárias de 2002 ENERSUL	52
Figura 22 - Esquema do procedimento proposto	54
Figura 23 - Conjuntos Fuzzy para temperatura mínima	59
Figura 24 - Conjuntos Fuzzy para temperatura máxima	59
Figura 25 - Saída do sistema para o dia 15/02/2001	60
Figura 26 - Saída do sistema para o dia 03/10/2001	60
Figura 27 - Evolução da carga média horária dos últimos quatro anos do mês de outubro.	64
Figura 28 - Evolução da carga média horária dos últimos quatro anos do mês de outubro.	65

Figura 29 - Carga média A2 outubro de 2002	65
Figura 30 - Carga média A2 novembro de 2002	66
Figura 31 - Gráfico de frequência com as quantidades mínimas de carga A2 outubro de 2002	66
Figura 32 - Gráfico de frequência com as quantidades mínimas de carga A2 novembro de 2002	67
Figura 33 – Exemplo de formulação das regras fuzzy	71
Figura 34 – Primeira ilustração para exemplo do Algoritmo da SOM.	81
Figura 35– Segunda ilustração para exemplo do Algoritmo da SOM.	82
Figura 36 – Terceira ilustração para exemplo do Algoritmo da SOM.	83
Figura 37 - Quarta ilustração para exemplo do Algoritmo da SOM.	84

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens da Lógica Fuzzy	41
Tabela 2 – classes (neurônios)	58
Tabela 3 – tabelas com estatísticas de erros do modelo	62
Tabela 4 – MAPE	63
Tabela 5 - MAPEP	63
Tabela 6 – MAPEF	63
Tabela 7 – Tabela para formulação das regras fuzzy	72

*“Little people discuss other people.  
Medium people discuss events.  
Big people discuss ideas.”*

R. E. Kalman, 1962