



Roxana Jiménez Contreras

**Modelos Neuro-Fuzzy
Hierárquicos BSP do Tipo 2**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientadores:

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco

Dr. Ricardo Tanscheit

Rio de Janeiro
Abril de 2007



Roxana Jiménez Contreras

**Modelos Neuro-Fuzzy
Hierárquicos BSP do Tipo 2**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco
Orientadora
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Ricardo Tanscheit
Orientador
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Flávio Joaquim de Souza
UERJ

Dra. Myriam Regattieri De Biase da Silva Delgado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Dr. Alexandre Gonçalves Evsukoff
COPPE – UFRJ

Dra. Karla Tereza Figueiredo Leite
UERJ

Dr. Juan Guillermo Lazo Lazo
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de Abril de 2007

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

Roxana Jiménez Contreras

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco – Perú em 1999. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro em 2002, tendo como área de concentração: Métodos de Apoio a Decisão e como linha de pesquisa Inteligência Computacional.

Ficha Catalográfica

Jiménez Contreras, Roxana

Modelos neuro-fuzzy hierárquicos BSP do tipo 2 / Roxana Jiménez Contreras ; orientadores: Marley Maria Bernardes Rebutzi Vellasco, Ricardo Tanscheit. – 2007.

182 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Sistemas de inferência fuzzy do tipo 2. 3. Conjuntos fuzzy do tipo 2 intervalares. 4. Funções de pertinência superior e inferior. 5. Modelos neuro-fuzzy hierárquicos. 6. Incertezas. I. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebutzi. II. Tanscheit, Ricardo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Em memória do meu querido filho

CONSTERNAÇÃO

*É quando a desgraça ameaça vir de longe
é quando esta sorte inevitável nos atinge*

*é quando meu respirar para, trás uma visão gris de espanto
é quando seu coração sem latido quebra meu olhar nefasto*

*é quando o diagnóstico abre feridas acelerado
é quando a memória registra o inesperado*

*é quando sem respostas a razão se embala entre velas tristes
é quando a dor invisível mostra-se invencível nestas noites*

*é quando toda suplica religiosa volta sem esperança
é quando a fé afunda na profunda lembrança.*

*É quando penando nas águas escuras acordo na rede da dor
é quando diante de mim o inferno abre portas de cor*

*é quando a mente entra logo na loucura inacreditável
é quando o corpo não suporta o peso da dor acumulável*

*é quando as lágrimas de Rox elevam gritos e orações ao ouvido
é quando escorrego falido com o tempo vital enfraquecido*

*é quando a esperança torna-se a contrariedade desafinada
é quando o desalento nos leva pedir de romaria pela perda*

*é quando o pensamento em aflito agoniza sem fim
é quando não há nuvens no céu e morre uma parte de mim.*

*É quando um dia chegou e preencheu nosso copo que escolheu
é quando outro dia foi embora levando todo de nós ao céu*

*é quando se dispõe de semanas para mudar vidas e ações
é quando se vem disposto a morar por sempre nos corações*

*é quando impossível de sepultar encontra-se no ar
é quando impossível de esquecer é parte do meu pensar*

*é quando neste último adeus ando desencaminhado e só
é quando nesta noite a céu aberto eu confesso:*

*é quando o desalento, os latidos, as nuvens,...meu respirar
é quando ferem, matam e sepultam inalterável sem parar.*

R.P.S.D.

Agradecimentos

A Deus por ter me guiado nesta jornada.

À Prof. Dra. Marley Maria B. R. Vellasco e ao Prof. Dr. Ricardo Tanscheit, orientadores desta tese, pelo apoio, carinho, incentivo e confiança depositada, com que pude contar em todos os momentos durante a realização deste trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Prof. Dr. Flávio Joaquim de Souza pelos modelos neuro-fuzzy hierárquicos concebidos em sua tese de doutorado, sem os quais esta tese não teria existido.

Aos professores, pesquisadores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A meus pais Ronald e Rosa e a meu irmão Efrain por estarem sempre presentes ao meu lado me apoiando, incentivando e me dando carinho em todos os momentos.

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

A tia Juana por todo o carinho e apoio nos momentos de dificuldade.

Ao Rafael pelo carinho, amor, apoio e, principalmente, pela paciência ao longo da elaboração desta tese.

Aos amigos do ICA, por seu contínuo apoio e colaboração.

Resumo

Jiménez, Roxana Contreras; Vellasco, Marley Maria Bernar0des Rebuzzi; Tanscheit, Ricardo. **Modelos Neuro-Fuzzy Hierárquicos BSP do Tipo 2**. Rio de Janeiro, 2007. 182 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem por objetivo criar um novo sistema de inferência fuzzy intervalar do tipo 2 para tratamento de incertezas com aprendizado automático e que proporcione um intervalo de confiança para as suas saídas defuzzificadas através do cálculo dos conjuntos tipo-reduzidos correspondentes. Para viabilizar este objetivo, este novo modelo combina os paradigmas de modelagem dos sistemas de inferência fuzzy do tipo 2 e redes neurais com técnicas de particionamento recursivo BSP. Este modelo possui principalmente a capacidade de modelar e manipular a maioria dos tipos de incertezas existentes em situações reais, minimizando os efeitos destas para produzir um melhor desempenho. Além disso, tem a capacidade autônoma de criar e expandir automaticamente a sua própria estrutura, de reduzir a limitação quanto ao número de entradas e de extrair regras de conhecimento a partir de um conjunto de dados. Este novo modelo fornece um intervalo de confiança, que se constitui em uma informação importante para aplicações reais. Neste contexto, este modelo supera as limitações dos sistemas de inferência fuzzy do tipo 2 – complexidade computacional, reduzido número de entradas permissíveis e forma limitada, ou inexistente, de criarem a sua própria estrutura e regras – e dos sistemas de inferência fuzzy do tipo 1 – adaptação incompleta a incertezas e não fornecimento de um intervalo de confiança para a saída. Os sistemas de inferência fuzzy do tipo 1 também apresentam limitações quanto ao reduzido número de entradas permissíveis, mas o uso de particionamentos recursivos, já explorado com excelentes resultados [SOUZ99], reduz significativamente estas limitações. O trabalho constitui-se fundamentalmente em quatro partes: um estudo sobre os diferentes sistemas de inferência fuzzy do tipo 2 existentes, análise dos sistemas neuro-fuzzy hierárquicos que usam conjuntos fuzzy do tipo 1, modelagem e implementação do novo modelo neuro-fuzzy hierárquico BSP do tipo 2 e estudo de casos. O novo modelo, denominado modelo neuro-fuzzy hierárquico BSP do tipo 2 (NFHB-T2),

foi definido a partir do estudo das características desejáveis e das limitações dos sistemas de inferência fuzzy do tipo 2 e do tipo 1 e dos sistemas neuro-fuzzy hierárquicos que usam conjuntos fuzzy do tipo 1 existentes. Desta forma, o NFHB-T2 é modelado e implementado com os atributos de interpretabilidade e autonomia, a partir da concepção de sistemas de inferência fuzzy do tipo 2, de redes neurais e do particionamento recursivo BSP. O modelo desenvolvido é avaliado em diversas bases de dados *benchmark* e aplicações reais de previsão e aproximação de funções. São feitas comparações com outros modelos. Os resultados encontrados mostram que o modelo NFHB-T2 fornece, em previsão e aproximação de funções, resultados próximos e em vários casos superiores aos melhores resultados proporcionados pelos modelos utilizados para comparação. Em termos de tempo computacional, o seu desempenho também é muito bom. Em previsão e aproximação de funções, os intervalos de confiança obtidos para as saídas defuzzificadas mostram-se sempre coerentes e oferecem maior credibilidade na maioria dos casos quando comparados a intervalos de confiança obtidos por métodos tradicionais usando as saídas previstas pelos outros modelos e pelo próprio NFHB-T2 .

Palavras - chave

Sistemas de Inferência Fuzzy do Tipo 2, Conjuntos Fuzzy do Tipo 2 Intervalares, Funções de Pertinência Superior e Inferior, Modelos Neuro-Fuzzy Hierárquicos, Incertezas.

Abstract

Jiménez, Roxana Contreras; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Advisor); Tanscheit, Ricardo (Advisor). **Type-2 Hierarchical Neuro-Fuzzy BSP Model**. Rio de Janeiro, 2007. 182 p. DSc Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this thesis is to create a new type-2 fuzzy inference system for the treatment of uncertainties with automatic learning and that provides an interval of confidence for its defuzzified output through the calculation of corresponding type-reduced sets. In order to attain this objective, this new model combines the paradigms of the modelling of the type-2 fuzzy inference systems and neural networks with techniques of recursive BSP partitioning. This model mainly has the capacity to model and to manipulate most of the types of existing uncertainties in real situations, diminishing the effects of these to produce a better performance. In addition, it has the independent capacity to create and to expand its own structure automatically, to reduce the limitation referred to the number of inputs and to extract rules of knowledge from a data set. This new model provides a confidence interval, that constitutes an important information for real applications. In this context, this model surpasses the limitations of the type-2 fuzzy inference systems - complexity computational, small number of inputs allowed and limited form, or nonexistent, to create its own structure and rules - and of the type-1 fuzzy inference systems - incomplete adaptation to uncertainties and not to give an interval of confidence for the output. The type-1 fuzzy inference systems also present limitations with regard to the small number of inputs allowed, but the use of recursive partitioning, already explored with excellent results [SOUZ99], reduce significantly these limitations. This work constitutes fundamentally of four parts: a study on the different existing type-2 fuzzy inference systems, analysis of the hierarchical neuro-fuzzy systems that use type-1 fuzzy sets, modelling and implementation of the new type-2 hierarchical neuro-fuzzy BSP model and study of cases. The new model, denominated type-2 hierarchical neuro-fuzzy BSP model (T2-HNFB) was defined from the study of the desirable characteristics and the limitations of the type-2 and type-1 fuzzy

inference systems and the existing hierarchical neuro-fuzzy systems that use type-1 fuzzy sets. Of this form, the T2-HNFB model is modelling and implemented with the attributes of interpretability and autonomy, from the conception of type-2 fuzzy inference systems, neural networks and recursive BSP partitioning. The developed model is evaluated in different *benchmark* databases and real applications of forecast and approximation of functions. Comparisons with other models are done. The results obtained show that T2-HNFB model provides, in forecast and approximation of functions, next results and in several cases superior to the best results provided by the models used for comparison. In terms of computational time, its performance also is very good. In forecast and approximation of functions, the intervals of confidence obtained for the defuzzified outputs are always coherent and offer greater credibility in most of cases when compared with intervals of confidence obtained through traditional methods using the forecast outputs by the other models and the own T2-HNFB model.

Keywords

Type-2 Fuzzy Logic Systems, Interval Type-2 Fuzzy Sets, Lower and Upper Membership Functions, Hierarchical Neuro-Fuzzy Models, Uncertainties.

SUMÁRIO

CAPITULO 1. Introdução.....	22
1.1. Motivação	22
1.2. Objetivos.....	29
1.3. Descrição do Trabalho e Contribuições	29
1.4. Organização da Proposta de Tese	30
CAPITULO 2. Sistemas de Inferência Fuzzy do Tipo 2	32
2.1. Introdução.....	32
2.2. Fundamentos de Conjuntos Fuzzy do Tipo 2	32
2.2.1. Definição de Conjuntos Fuzzy do Tipo 2	34
2.2.2. Principais Definições associadas a Conjuntos Fuzzy do Tipo 2	34
2.2.2.1. Corte Vertical de uma Função de Pertinência do Tipo 2	35
2.2.2.2. Função de Pertinência Secundária e Grau Secundário.....	35
2.2.2.3. Pertinência Primária de x	36
2.2.2.4. Funções de Pertinência Intervalares do Tipo 2	36
2.2.2.5. Mancha de Incerteza	38
2.2.2.6. Função de Pertinência Primária	39
2.2.2.7. Tipos de Conjuntos Fuzzy do Tipo 2 e FOU.....	39
2.2.2.8. Funções de Pertinência Superior e Inferior	41
2.2.2.9. Representação em termos das Funções de Pertinência Superior e inferior.....	42
2.3. Principais Sistemas de Inferência Fuzzy do Tipo 2	42
2.3.2. Sistemas de Inferência Fuzzy do Tipo 2 Mamdani com Entradas Singleton.....	43
2.3.1.1. Componentes dos Sistemas de Inferência Fuzzy do Tipo 2 Mamdani com Entradas Singleton.....	43
2.3.1.2. Sistemas de Inferência Fuzzy Intervalares do Tipo 2 Mamdani com Entradas Singleton.....	48

2.3.2. Sistemas de Inferência Fuzzy do Tipo 2 TSK.....	54
2.3.2.1. Sistemas de Inferência Fuzzy Intervalares do Tipo 2 TSK.....	56
2.3.3. Ajuste de Parâmetros e Redução de Regras dos Sistemas de Inferência Fuzzy Intervalares do Tipo 2.....	58
2.4. Conclusão.....	61
CAPITULO 3. Modelo Neuro-Fuzzy Hierárquicos BSP do Tipo 2	62
3.1. Introdução	62
3.2. Particionamento BSP	63
3.3. Célula Básica Neuro-Fuzzy BSP do Tipo 2.....	65
3.4. Arquitetura NFHB-T2.....	73
3.5. Algoritmo de Aprendizado	79
3.6. Estratégias e Métodos de Seleção de Entradas no Modelo NFHB-T2.....	87
3.7. Conclusão	89
CAPITULO 4. Estudo de casos.....	90
4.1. Descrição.....	90
4.2. Aproximação de funções: Velocidade da Onda do Pulso de Sangue....	91
4.3. Previsão de Séries Temporais.....	95
4.3.1. Previsão de Séries Caótica Mackey-Glass.....	95
4.3.2. Previsão de Séries Temporais de Negócios	98
4.3.3. Previsão de Séries Temporais que seguem um Processo Estocástico: Movimento Geométrico Browniano.....	105
4.3.4. Previsão de Séries Temporais de Retornos	109
4.3.5. Previsão de Séries Temporais em Sistemas Dinâmicos: Santa Fe	113
4.3.6. Previsão de Séries Temporais de Carga Elétrica: Eletropaulo	115
4.4. Comparação do Modelo NFHB-T2 com outros modelos	116
4.5. Conclusão.....	127
CAPITULO 5. Conclusões e trabalhos futuros	128
5.1. Conclusões	128
5.2. Trabalhos futuros.....	130
CAPITULO 6. Referências Bibliográficas	131

APÊNDICE	A - Cálculo da Saída do Modelo NFHB-T2	142
APÊNDICE	B - Ajuste de Parâmetros e Equações de Gradient Descent para a Célula NFHB-T2.....	150
APÊNDICE	C - Cálculo do Conjunto Tipo-reduzido para a Celula Básica NFB-T2	175
APÊNDICE	D - Calculo do Conjunto Tipo-reduzido para SIF Intervalares do tipo 2 Mamdani com entradas singleton	178

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Função de pertinência do tipo 1	33
Figura 2.2 – Função de pertinência do tipo 1 da Figura 2.1 com nebulosidade	33
Figura 2.3 – Função de pertinência do tipo 2 e FOU	33
Figura 2.4 – Corte vertical para a função de pertinência do tipo 2, em $x' = 2$	36
Figura 2.5.a – Representação de um conjunto fuzzy do tipo 2 gaussiano. O domínio do grau de pertinência correspondente a $x=4$ é também mostrado	37
Figura 2.5.b – Função de pertinência secundária gaussiana em $x=4$	37
Figura 2.6 – Função de pertinência intervalar do tipo 2, mancha de incerteza (FOU) e suas funções de pertinência secundárias em x_1 e x_2	37
Figura 2.7 – Mancha de incerteza FOU	38
Figura 2.8 – Diferentes tipos de FOUs	38
Figura 2.9 – Função de pertinência primária	39
Figura 2.10 – FOU Associado à função de pertinência primária da Figura 2.9	39
Figura 2.11 – FOU para a função de pertinência primária gaussiana com incerteza na média	40
Figura 2.12 – FOU para função de pertinência primária gaussiana com incerteza no desvio padrão	41
Figura 2.13 – Funções de pertinência superior e inferior do conjunto fuzzy do tipo 2	41
Figura 2.14 – Sistemas genéricos de inferência fuzzy do tipo 2	43
Figura 2.15.a – Descrição das operações entre as entradas e os antecedentes para um SIF intervalar do tipo 2 Mamdani com entradas singleton usando o mínimo como t -norm	50

Figura 2.15.b – Descrição das operações nos conseqüentes (conjuntos ativados)	50
Figura 2.15.c – Descrição do conjunto combinado de saída para os dois conjuntos de saída ativados da Figura 2.15.b	50
Figura 2.16.a – Descrição das operações entre as entradas e os antecedentes para um SIF intervalar do tipo 2 Mamdani com entradas singleton usando o produto como <i>t-norm</i>	51
Figura 2.16.b – Descrição das operações nos conseqüentes (conjuntos ativados)	51
Figura 2.16.c – Descrição do conjunto combinado de saída para os dois conjuntos de saída ativados da Figura 2.16.b	51
Figura 3.1.a – Particionamento BSP	64
Figura 3.1.b – Árvore BSP referente ao particionamento BSP	64
Figura 3.2 – Perfil das funções de pertinência sigmóides do tipo 2 da célula NFB-T2	65
Figura 3.3 – Célula Neuro-Fuzzy BSP do tipo 2	66
Figura 3.4 – Célula simplificada NFB-T2	66
Figura 3.5 – Representação da Célula NFB-T2 sob o formato de rede neuro-fuzzy	67
Figura 3.6 – Detalhe da representação da célula NFB-T2 sob o formato de rede neuro-fuzzy	68
Figura 3.7 – Exemplo de uma arquitetura do modelo NFHB-T2	73
Figura 3.8.a – Particionamento do espaço de entrada do sistema NFHB-T2 descrito na Figura 3.7	74
Figura 3.8.b – árvore representativa do particionamento BSP mostrado na Figura 3.8.a	74
Figura 3.9 – Opção 1 para o modo de definição dos parâmetros b_1' , e b_2'	78
Figura 3.10 – Opção 2 para o modo de definição dos parâmetros b_1' , e b_2'	79
Figura 3.11 – Algoritmo de aprendizado do modelo NFHB-T2	80
Figura 3.12 – Vertente 1 de decomposição BSP-T2	86
Figura 3.13 – Vertente 2 de decomposição BSP-T2	86
Figura 4.1 – Velocidade da Onda do Pulso de Sangue (VOP)	91

Figura 4.2 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste para a base de dados Médicos	94
Figura 4.3.a – Série Mackey-Glass com ruído aditivo uniforme de SNR =6.2 %	95
Figura 4.3.b – Série Mackey-Glass com ruído aditivo uniforme de SNR =18.6 %	95
Figura 4.4 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados Mackey-Glass com ruído de SNR=6.2 %	97
Figura 4.5 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados Mackey-Glass com ruído de SNR=18.6 %	97
Figura 4.6.a – Série temporal de Negócios 1	98
Figura 4.6.b – Série temporal de Negócios 2	98
Figura 4.6.c – Série temporal de Negócios 3	98
Figura 4.6.d – Série temporal de Negócios 4	98
Figura 4.6.e – Série temporal de Negócios 5	99
Figura 4.6.f – Série temporal de Negócios 6	99
Figura 4.7 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série temporal de Negócios 1	103
Figura 4.8 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série temporal de Negócios 2	103
Figura 4.9 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série temporal de Negócios 3	104
Figura 4.10 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série temporal de Negócios 4	104
Figura 4.11 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série temporal de Negócios 5	104
Figura 4.12 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de	

validação e teste da base de dados para a série temporal de Negócios 6	105
Figura 4.13.a – Série MGB 1	106
Figura 4.13.b – Série MGB 2	106
Figura 4.13.c – Série MGB 3	106
Figura 4.14 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série que segue um MGB 1	108
Figura 4.15 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série que segue um MGB 2	109
Figura 4.16 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série que segue um MGB 3	109
Figura 4.17.a – Série temporal de retornos Brahma ON	110
Figura 4.17.b – Série temporal de retornos Bemge ON	110
Figura 4.18 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série de retornos Brahma ON	112
Figura 4.19 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados para a série de retornos Bemge ON	113
Figura 4.20 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados Santa Fe	114
Figura 4.21 – Saídas do modelo NFHB-T2 para o conjunto de validação e teste da base de dados Eletropaulo	116
Figura 4.22 – Saídas do modelo NFHB-T2, do modelo NFHB com conjuntos fuzzy do tipo 1, saída desejada e média da saída desejada para o conjunto teste da base de dados Brahma ON	121
Figura 4.23 – Saídas do modelo NFHB-T2, do modelo NFHB com conjuntos fuzzy do tipo 1, saída desejada e média da saída desejada para o conjunto de teste da base de dados Bemge ON	121
Figura 4.24 – Intervalo de confiança obtido automaticamente pelo modelo NFHB-T2 para o conjunto de teste da base de dados	

Médicos	124
Figura 4.25 – Intervalo de confiança obtido estatisticamente com a saída prevista pelo modelo NFHB-T2 para o conjunto de teste da base de dados Médicos	124
Figura 4.26 – Intervalo de confiança obtido estatisticamente com a saída prevista pelo modelo NFHB que usa conjuntos fuzzy do tipo 1 para o conjunto de teste da base de dados Médicos	124
Figura 4.27 – Intervalo de confiança obtido automaticamente pelo modelo NFHB-T2 para o conjunto de teste da base de dados MGB – Série 1	125
Figura 4.28 – Intervalo de confiança obtido estatisticamente com a saída prevista pelo modelo NFHB-T2 para o conjunto de teste da base de dados MGB – Série 1	125
Figura 4.29 – Intervalo de confiança obtido estatisticamente com a saída prevista pelo modelo NFHB que usa conjuntos fuzzy do tipo 1 para o conjunto de teste da base de dados MGB – Série 1	125
Figura 4.30 – Intervalo de confiança obtido automaticamente pelo modelo NFHB-T2 para o conjunto de teste da base de dados MGB – Série 2	126
Figura 4.31 – Intervalo de confiança obtido estatisticamente com a saída prevista pelo modelo NFHB-T2 para o conjunto de teste da base de dados MGB – Série 2	126
Figura 4.32 – Intervalo de confiança obtido estatisticamente com a saída prevista pelo modelo NFHB que usa conjuntos fuzzy do tipo 1 para o conjunto de teste da base de dados MGB – Série 2	126
Figura A.1 – Exemplo de uma arquitetura do modelo NFHB-T2	142
Figura B.1 – Detalhe de um modelo NFHB-T2 mostrando a saída da célula k	154
Figura D.1. a – Funções de pertinência para os conjuntos antecedentes	181
Figura D.1. b – FOU dos conjuntos conseqüentes 1 e 7	181
Figura D.2.a – Centróides dos três conjuntos conseqüentes Ativados pelas três regras ativadas e seus correspondentes graus de ativação	182

Figura D.2.b – Conjunto de saída do processo de tipo-redução
centro de conjuntos e saída crisp correspondente

182

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Variáveis clínicas medidas	92
Tabela 4.2 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para a aproximação da VOP da base de dados Médicos	93
Tabela 4.3 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da base de dados Mackey-Glass com ruído de SNR=6.2% e SNR=18.6%	96
Tabela 4.4 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de Negócios 1	100
Tabela 4.5 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de Negócios 2	100
Tabela 4.6 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de Negócios 3	100
Tabela 4.7 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de Negócios 4	101
Tabela 4.8 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de Negócios 5	101
Tabela 4.9 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de Negócios 6	101
Tabela 4.10 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série que segue um MGB 1	107
Tabela 4.11 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série que segue um MGB 2	107
Tabela 4.12 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de que segue um MGB 3	107
Tabela 4.13 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de retornos Brahma ON	111
Tabela 4.14 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da série de retornos Bemge ON	111
Tabela 4.15 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para	

previsão da base de dados Santa Fe	114
Tabela 4.16 – Resultados obtidos com o modelo NFHB-T2 para previsão da base de dados Eletropaulo	115
Tabela 4.17 – Comparação do desempenho entre o Modelo NFHB-T2 e outros modelos para o caso de aproximação e previsão um passo à frente	118
Tabela 4.18 – Comparação do desempenho entre o Modelo NFHB-T2 e outros modelos para o caso de previsão um passo à frente da base de dados de Retornos	119
Tabela 4.19 – Comparação do desempenho entre o Modelo NFHB-T2 e outros modelos para o caso de previsão dez passos à frente da base de dados de Santa Fe e Eletropaulo	122
Tabela 4.20 – Comparação do desempenho entre o Modelo NFHB-T2 e outros modelos para o caso de previsão seis passos à frente da base de dados Retornos	122