

1

Introdução

1.1

Motivação

O conceito de informação é intimamente ligado ao de incerteza. O aspecto mais fundamental desta ligação é o fato de a incerteza na solução de um problema ser resultado de alguma informação deficiente, que pode ser incompleta, imprecisa, vaga, contraditória e não confiável [KLIR88], [KLIR95]. Assim, em nível empírico, a incerteza está presente em qualquer medida, sendo o resultado de uma combinação de sucessivos erros de medição e de limites de resolução dos instrumentos de medição; em nível cognitivo, a incerteza está associada à informação ambígua inerente à linguagem natural [KLIR98]. Além disso, incerteza é o resultado da aleatoriedade nos dados e no processo que os gera [BERE88].

Infelizmente, sistemas reais são inerentemente ruidosos e não lineares, sendo que qualquer elemento de um sistema pode contribuir com incertezas. Incerteza é uma parte inerente a Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF) usados em aplicações reais. As seguintes fontes de incerteza podem estar presentes em um SIF [MEND00-I], [MEND03-II]:

- Incerteza em relação ao significado das palavras usadas nos antecedentes e conseqüentes de regras lingüísticas: diferentes populações podem exprimir seus pensamentos de forma distinta. Este tipo de incerteza é denominado *fuzziness*;
- Incerteza em relação ao conseqüente de uma regra: os conseqüentes podem ter um histograma de valores associados a eles, especialmente quando o conhecimento é extraído de um grupo de especialistas que não estão totalmente de acordo. Desta forma diferentes conseqüentes podem ser obtidos para uma mesma regra. Esta incerteza é denominada *strife*;

- Incerteza em relação às medidas que ativam o SIF e que são usadas para ajustar os seus parâmetros. Estas medidas podem conter ruído e, portanto, gerar incerteza. Esta incerteza é denominada *nonspecificity*.

Incertezas nos antecedentes e conseqüentes são transformadas em incertezas nas funções de pertinência dos antecedentes e conseqüentes. Os SIF do tipo 2 são capazes de modelar diretamente as incertezas do tipo *fuzziness*, *strife* e *nonspecificity*, assim como minimizar os efeitos destas.

Muitas decisões são tomadas para especificar as funções de pertinência de cada variável, como, por exemplo, fixar o centro das funções de pertinência, os pontos de apoio da função, os pontos base dos triângulos (no caso de funções triangulares) e o quanto as funções se sobrepõem. Todas estas decisões transformam-se em incertezas que os SIF do tipo 2 podem tratar [MEND00-I].

Na aproximação de dados ou de sinais aleatórios, na modelagem de sistemas variantes no tempo de forma desconhecida, na modelagem de processos aleatórios ou em aplicações onde há aleatoriedade, existem também incertezas que um SIF do tipo 2 pode modelar [MEND03-II].

SIF do tipo 2 modelam e tratam incertezas de uma forma totalmente nova, devido ao uso de funções de pertinência do tipo 2. Desta forma, proporcionam uma fundamental e importante direção no mundo dos SIF [MEND00-I], [MEND03-II].

- ***Incertezas e funções de pertinência do tipo 2***

A maioria dos SIF fazem uso de conjuntos fuzzy do tipo 1, que representam incertezas por números no intervalo [0,1]. No caso de uma medida na presença de incertezas, – quando é difícil determinar seu valor exato – faz mais sentido utilizar conjuntos fuzzy (do tipo 1) do que usar conjuntos *crisp*. Os SIF do tipo 1 manejam incertezas associadas a entradas e saídas usando funções de pertinência bidimensionais e precisas (*crisp*), com as quais praticamente todas as incertezas deixam de ser representadas. Portanto os SIF do tipo 1 têm capacidade limitada para **modelar** totalmente incertezas numéricas e lingüísticas **diretamente** [MEND00-I]. Daí a necessidade de um outro tipo de conjunto fuzzy que

tenha capacidade de **modelar diretamente** tais incertezas: conjuntos fuzzy do tipo 2.

Um conjunto fuzzy do tipo 2 é caracterizado por uma função de pertinência fuzzy isto é, o valor de pertinência (ou grau de pertinência) para cada elemento deste conjunto é um conjunto fuzzy em $[0,1]$, e não, como no caso de conjuntos fuzzy do tipo 1, um número no intervalo $[0,1]$ [MEND00-I]. Assim, funções de pertinência de conjuntos fuzzy do tipo 2 possuem três dimensões; essa nova terceira dimensão proporciona um grau de liberdade adicional. Além disso, as funções de pertinência do tipo 2 incluem uma mancha de incerteza, de forma a tornar possível a quantificação e modelagem de incertezas tanto numéricas como lingüísticas [MEND00-I], [MEND02].

Um SIF do tipo 1 usa funções de pertinência precisas que **capturam a incerteza das palavras**. Assim, ao se fazer uso de funções de pertinência do tipo 1, todas as incertezas a respeito das palavras desaparecem. Os SIF do tipo 2 tratam incertezas relacionadas ao significado das palavras **modelando e manejando essas incertezas**. Embora uma função de pertinência do tipo 2 possa também ser totalmente precisa, ela inclui a mancha de incerteza, que permite que as incertezas sejam tratadas de uma forma totalmente nova.

- ***Importância da nova direção que os SIF do tipo 2 proporcionam***

Na teoria de probabilidades é importante distinguir a média e o desvio padrão. A saída de um SIF do tipo 1 pode ser considerada semelhante à média de uma função de densidade de probabilidade. Da mesma forma que a variância provê uma medida de dispersão em relação à média e é usada para capturar incerteza probabilística no desenvolvimento de modelos estatísticos, em um SIF com qualquer tipo de incertezas é necessária também alguma medida de dispersão para capturar mais informação relativa a estas incertezas. Um SIF do tipo 2 provê esta medida de dispersão fundamental para o desenvolvimento de sistemas que consideram incertezas lingüísticas e numéricas. Esta medida de dispersão constitui a nova direção para os SIF [MEND03-II], [MEND03-III],

[MEND03-IV]. Assim, devido às incertezas nas funções de pertinência (no caso de SIF do tipo 2 Mamdani e TSK) e nos valores dos parâmetros consequentes (no caso de SIF do tipo 2 TSK), um SIF do tipo 2 pode ser visto como uma versão “*perturbada*” de um SIF do tipo 1.

O conjunto fuzzy do tipo 1 de saída de um SIF do tipo 2, chamado conjunto *tipo-reduzido*, é uma representação das incertezas na saída *crisp* devido às “*perturbações*”. Desta forma, a saída tipo-reduzida pode ser interpretada como uma medida de dispersão da saída defuzzificada e pode ser relacionada a um intervalo de confiança lingüístico, aportando, assim, mais informação do que uma saída pontual – da mesma forma que um intervalo de confiança provê um intervalo de incerteza para um sistema probabilístico [MEND03-II], [MEND03-III].

As incertezas que ocorrem num SIF do tipo 2 – que são transformadas em incertezas nas funções de pertinência e, eventualmente, nos valores dos parâmetros consequentes – estarão representadas no conjunto tipo-reduzido. Isto se constitui em um dos interesses no uso de SIF do tipo 2, já que os do tipo 1 não se revelaram totalmente apropriados para a construção de modelos de tomada de decisões humanas em uma serie de aplicações [PWT2], [MEND03-II], [MEND03-III].

SIF do tipo 2 são descritos por um maior número de parâmetros e, portanto, têm mais graus de liberdade que SIF do tipo 1. Esta idéia sugere que os primeiros têm potencial para obter melhor desempenho do que os últimos, desde que os parâmetros sejam corretamente ajustados. Na atualidade, não existe prova matemática que garante que isto aconteça sempre, entretanto tem sido mostrado que os SIF do tipo 2 apresentaram melhor desempenho que os do tipo 1 em diversas aplicações [MEND03-III], [PWT2].

- ***Aplicações dos SIF do tipo 2***

Os SIF do tipo 2 podem ser usados em aplicações nas quais exista incerteza. Podem ser usados em circunstâncias nas quais existe incerteza na determinação do grau de pertinência exato, como, por exemplo, em casos de dados corrompidos por ruído. Além disso, são uma alternativa

viável quando não existe uma alta confiança num modelo probabilístico ou quando é difícil determinar o modelo probabilístico adequado para uma aplicação - devido a complexidades tais como não linearidade, não estacionariedade ou variância no tempo. SIF do tipo 2 são também aplicáveis e têm mostrado um melhor desempenho que SIF do tipo 1 nas seguintes situações específicas [MEND00-I]:

- o sistema de geração de dados é conhecido como variante no tempo, mas a descrição matemática da variabilidade no tempo é desconhecida.
- a dimensão do ruído é não estacionária e a descrição matemática da não-estacionariedade é desconhecida.
- as características são descritas por atributos estatísticos que são não-estacionários e a descrição matemática da não-estacionariedade é desconhecida.
- o conhecimento extraído de um grupo de especialistas usando questionários inclui palavras incertas.
- os termos lingüísticos usados têm um domínio não mensurável [MEND03-V].

Recentemente, conjuntos fuzzy do tipo 2 foram usados em SIF para modelar informação com incerteza. Encontram-se na literatura várias publicações que explicam como conjuntos fuzzy do tipo 2 modelam e minimizam os efeitos de incertezas em SIF e outros que enfatizam a implementação de SIF do tipo 2 [KARN98-I], [KARN98-II], [KARN99-I], [LIAN99], [LIAN00-I], [MEND04], [JOHN98-I], [MEND02], [UNCU03]. Outros propõem métodos de projeto de SIF do tipo 2 usando algoritmos genéticos [PARK01] e redes neurais [WANG03], [WANG04]. Algumas publicações apresentam extensões de algoritmos tradicionais, como k-vizinhos mais próximos, clusterização c-means, Perceptron, ANFIS, fazendo uso de conjuntos fuzzy do tipo 2 [JOHN98-II], [JOHN99], [RHEE01], [RHEE02], [RHEE03].

Os SIF do tipo 2 têm sido utilizados em aplicações em processamento de sinais [MEND99], [PHOK04-I] e na eliminação de

interferência em canais de comunicação [LIAN00-II], [LIAN00-IV], [LIAN00-V], no desenvolvimento de um sistema especialista para solucionar o problema da avaliação do Umbilical Acid-Base (UAB) [OZEN03], no diagnóstico de enfermidades [INNO01-I], [INNO01-II], [INNO02] e no pré-processamento de imagens radiográficas [JOHN98-III].

Na indústria, SIF do tipo 2 foram usados para o controle e monitoramento de plantas dinâmicas não lineares [MELI02], [MELI03], [CAST04], [MELI04], assim como no controle da admissão na conexão em ATM Networks [LIAN00-III], no controle de incertezas não lineares de sistemas [LEE04], [SEPU05], e no controle de robôs [FIGU05], [PHOK04-I], [PHOK04-II]. Em [LIAN01] é apresentado um novo método para modelagem e classificação do tráfego de MPEG VBR vídeo. Em [MEND00-II], um SIF do tipo 2 é aplicado na previsão da série temporal Mackey-Glass Chaotic com ruído uniforme. Existem também aplicações de SIF do tipo 2 em reconhecimento de padrões [ZENG06], na previsão de séries temporais [KARN99-II], [LIN06], no pré-processamento da linguagem natural, na recuperação de informação [BOUC03], no cômputo de palavras [MEND01], [MEND03-I], na extração de conhecimento proveniente de questionários [MEND00-I], na aproximação de funções, na tomada de decisões, no manejo de base de dados relacionais e na programação de transportes [MEND03-V]. Em todas as aplicações acima, os resultados de simulação mostraram que os SIF do tipo 2 apresentam melhor desempenho do que modelos do tipo 1.

Potenciais aplicações de SIF do tipo 2 residem em áreas onde existe muita incerteza e o tratamento desta incerteza é de grande relevância para o problema, como, por exemplo, em controle, diagnóstico médico e na previsão e tomada de decisões em aplicações financeiras.

- ***Limitações dos SIF do tipo 2 e dos SIF do tipo 1***

Os SIF do tipo 2 apresentam o problema do crescimento exponencial de regras com o número de variáveis envolvidas [BROW95]. Para superar este problema uma estratégia é o uso de sistemas

hierárquicos. Entretanto muitos dos SIF do tipo 2 já elaborados apresentam limitações quanto ao reduzido número de entradas permissíveis e quanto à forma de criarem a sua própria estrutura e regras.

Os SIF do tipo 1 também apresentam as limitações acima, mas o uso de particionamentos recursivos, já explorado com excelentes resultados em [SOUZ99], [SOUZ02], as reduz significativamente. Entretanto estes SIF do tipo 1 apresentam limitações quanto à capacidade de uma modelagem completa e de adaptação a incertezas. Além disso, não proporcionam um intervalo de confiança para a sua saída, já que fazem uso de funções de pertinência bidimensionais e precisas.

Em geral, os SIF do tipo 2 são complexos computacionalmente [MEND00-I]. De forma a simplificar esta complexidade computacional usam-se conjuntos fuzzy intervalares do tipo 2, permitindo que as funções de pertinência secundárias possam distribuir uniformemente a incerteza nas pertinências primárias

Pelo exposto acima surge a necessidade de se criar um novo sistema de inferência fuzzy intervalar do tipo 2 para o 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, o modelo proposto combina os paradigmas de modelagem dos SIF do tipo 2, os algoritmos de aprendizado supervisionado de redes neurais e o particionamento recursivo BSP já explorado com excelentes resultados [SOUZ99]. Desta forma, este novo 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. Além disso, fornece um intervalo de confiança, extremamente útil em aplicações reais e que atesta a credibilidade dos resultados.

1.2

Objetivos

Em função das limitações já expostas dos SIF do tipo 2 e do tipo 1 existentes, o principal objetivo deste trabalho é criar e desenvolver um modelo híbrido neuro-fuzzy intervalar do tipo 2 que integre os paradigmas de aprendizado das Redes Neurais, e a interpretabilidade dos SIF do tipo 1, com a capacidade de modelar incertezas dos SIF do tipo 2. Além disso, o SIF do tipo 2 tem a capacidade autônoma de:

- Modelar e tratar a maioria dos tipos de incertezas existentes em situações reais, minimizando os efeitos destas, com o objetivo de produzir um desempenho melhor do que o apresentado por sistemas equivalentes do tipo 1. O modelo proposto nesta tese trata de incertezas do tipo *fuzziness* e *strife*.
- Gerar automaticamente a sua própria estrutura e, desta forma, criar e expandir automaticamente o particionamento do espaço de entrada, sem o conhecimento prévio do número de regras;
- Extrair conhecimento a partir de um conjunto de dados, produzindo resultados lingüisticamente interpretáveis, sob o formato de regras fuzzy do tipo 2;
- Reduzir a limitação quanto ao número de entradas possíveis de serem tratadas pelo modelo;
- Fornecer intervalos de confiança nas saídas, proporcionando, desta forma, informação mais rica do que a contida em saídas pontuais.

1.3

Descrição do Trabalho e Contribuições

Como resultado desta proposta, foi criado o novo modelo neuro-fuzzy intervalar do tipo 2, denominado Modelo Neuro-Fuzzy Hierárquico BSP do Tipo 2 (NFHB-T2).

O modelo neuro-fuzzy intervalar do tipo 2 proposto neste trabalho combina os paradigmas de modelagem dos SIF do tipo 2, os algoritmos de

aprendizado supervisionado das redes neurais, com as técnicas de particionamento recursivo BSP.

Em resumo, as principais contribuições deste trabalho são:

- *Criação do Modelo Neuro-Fuzzy Hierárquico NFHB-T2* com atributos de interpretabilidade e autonomia.

O modelo NFHB-T2 foi definido a partir da concepção de um SIF do tipo 2 e do particionamento recursivo BSP utilizado principalmente na área de manipulação e compressão de imagens. Para este modelo foram definidos a célula básica, a estrutura de interconexão das células, os antecedentes, os consequentes e o algoritmo de aprendizado.

- *Obtenção de intervalos de confiança* para as saídas defuzzificadas deste novo modelo.

- *Desenvolvimento de uma ambiente de testes* para o modelo NFHB-T2. Foi criado um ambiente computacional para desenvolvimento e testes, em linguagem Delphi 5, permitindo, desta forma, a realização de experimentos com o objetivo de demonstrar a potencialidade e aplicabilidade do modelo.

- *Análise comparativa do desempenho do modelo NFHB-T2.*

O modelo proposto foi avaliado em várias aplicações *benchmark* e reais. Estas aplicações possuem complexidades diferentes, as quais permitem comparar o desempenho do modelo proposto com modelos que usam conjuntos fuzzy do tipo 1 e com outros.

1.4

Organização da Proposta de Tese

Esta tese está dividida em seis capítulos adicionais, descritos a seguir.

O capítulo 2 faz uma introdução a conjuntos fuzzy do tipo 2 e às funções de pertinência do tipo 2; são também definidas importantes terminologias relacionadas a funções de pertinência do tipo 2 e, em seguida, são apresentados os principais sistemas de inferência fuzzy do tipo 2: *SIF do tipo 2 Mamdani com*

entradas Singleton e *SIF do tipo 2 TSK com entradas Singleton*, descrevendo-se suas diferentes arquiteturas.

No capítulo 3 é apresentado em detalhes o novo Modelo Neuro-Fuzzy Hierárquico BSP do tipo 2 (NFHB-T2), descrevendo-se seus principais componentes: célula básica, arquitetura hierárquica, as regras hierárquicas associadas e o algoritmo de aprendizado. Além disso, são descritas as estratégias e o método de seleção de características para as entradas das células BSP-T2 utilizadas por este modelo.

No capítulo 4 são apresentados os estudos de casos, onde diversas bases de dados *benchmark* e aplicações reais em diferentes áreas são utilizadas para avaliar o modelo NFHB-T2 na tarefa de aproximação de funções e previsão. Além disso, são apresentadas as comparações de desempenho entre o modelo NFHB-T2 e outros modelos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e são também sugeridas propostas para trabalhos futuros.

Finalmente, nos Apêndices A, B, C e D são apresentados o cálculo da saída do modelo NFHB-T2, as equações de *Gradient Descent* para o ajuste dos parâmetros dos antecedentes e dos consequentes, o cálculo do conjunto tipo-reduzido para a célula básica NFB-T2, o cálculo do conjunto tipo-reduzido para SIF intervalares do tipo 2 Mamdani com entradas singleton, e o cálculo da saída do modelo NFHB-T2 com entradas não singleton do tipo 2, respectivamente.