

Desenvolvimento de uma Abordagem Híbrida Difuso-Probabilística para a Modelagem de Incerteza

Carlos Augusto G. Tibiriçá – Sílvia Modesto Nassar
Departamento de Informática e Estatística
Universidade Federal de Santa Catarina

Novembro 2003

Resumo

As incertezas existentes no mundo real são tratadas pela mente humana de maneira que seja possível alguma tomada de decisão baseada em fatos que não representem uma verdade absoluta. Este raciocínio pode levar a conclusões dúbias ou com diversas alternativas para determinado problema.

Técnicas de Inteligência Computacional, como sistemas especialistas, podem auxiliar as tomadas de decisões implementadas neste tipo de sistema. Dentre as diferentes abordagens encontram-se as Redes Bayesianas que são utilizadas para tratar a incerteza por aleatoriedade (probabilidade) e os Sistemas Especialistas *Fuzzy* os quais tratam a incerteza por imprecisão (possibilidade). No entanto, em alguns domínios, coexistem esses dois tipos de incerteza: a imprecisão e a aleatoriedade. Este artigo apresenta uma abordagem híbrida *fuzzy-probabilística*, para tratar a incerteza em sistemas especialistas.

O hibridismo, acima citado, permite trabalhar com a incerteza do domínio nas entradas de uma Rede Bayesiana, formada por nós dicotômicos ou não dicotômicos. As variáveis com características de imprecisão são fuzzificadas, gerando uma redistribuição do vetor de probabilidades da saída de uma Rede Bayesiana.

Procura-se demonstrar a aplicabilidade da abordagem híbrida, baseado na união da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* e Probabilidade, para o desenvolvimento de sistemas especialistas através da modelagem de incerteza.

1- Introdução.

A área da Inteligência Artificial (IA) é responsável pela pesquisa e desenvolvimento de métodos para modelar as incertezas do mundo real em sistemas computacionais. Técnicas de Inteligência Computacional, como sistemas especialistas, podem auxiliar as tomadas de decisões implementadas neste tipo de sistema. Dentre as diferentes abordagens encontram-se as Redes Bayesianas que são utilizadas para tratar a incerteza por aleatoriedade (probabilidade) um exemplo é o raciocínio médico, onde, podem existir pacientes com dois conjuntos similares de sinais e sintomas e seus diagnósticos serem diferentes[4]. Uma outra proposta são os Sistemas Especialistas *Fuzzy* os quais tratam a incerteza por imprecisão (possibilidade). No entanto em alguns domínios coexistem esses dois tipos de incerteza: a imprecisão e a aleatoriedade. Este artigo apresenta uma abordagem híbrida *fuzzy-probabilística*, para tratar a incerteza em sistemas especialistas.

O hibridismo, acima citado, permite trabalhar com a incerteza do domínio nas entradas de uma Rede Bayesiana, formada por nós dicotômicos ou não. As variáveis com características de imprecisão são fuzzificadas, gerando uma redistribuição do vetor de probabilidades da saída de uma Rede Bayesiana. O artigo possui a seguinte estrutura: primeiro é apresentado uma introdução a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, na seção seguinte são abordadas as Redes Bayesianas. A terceira parte apresenta uma comparação entre as duas abordagens (Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* e Probabilidade). A quarta parte expõe comentários sobre incerteza e hibridismo, a 5ª parte apresenta a abordagem híbrida proposta de maneira detalhada. Na parte 6, comentários sobre os resultados obtidos com a abordagem e comparações com uma rede Bayesiana são apresentados. A conclusão é exposta na seção 7.

2 – Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*.

A lógica *fuzzy* utiliza os conjuntos *fuzzy*, que permitem representar e manipular dados que não são precisos e expressos em variáveis lingüísticas, estas que significam a capacidade de classificar de modo impreciso as variáveis de um problema, em termos de conceitos qualitativos em vez de quantitativos[11] (ex: caro, barato, razoavelmente grande, muito quente). Utilizar variáveis lingüísticas em sistemas inteligentes permite implementar o raciocínio humano em sistemas computacionais.

Um conjunto *fuzzy* é obtido através de uma função de pertinência, que se baseia em um universo dentro de um intervalo de 0 a 1.

A função de pertinência pode ser obtida através de vários métodos, aqui será apresentado o que se baseia no conhecimento do especialista.

O conjunto *fuzzy* A de um universo de discurso X é caracterizado pela função de pertinência

$$\mu(x) : X \rightarrow [0,1]$$

onde, $\mu(x)$ é interpretado como grau de pertinência do elemento x no conjunto *fuzzy* A para cada $x \in X$.

O valor zero (0) é usado para representar a total não pertinência, o valor um (1) é usado para representar a completa pertinência e os valores entre estes são usados para representar os graus intermediários de pertinência.

A forma como o conjunto *fuzzy* é representado pode ser vista por:

$$A = \{Y_1 / X_1 + Y_2 / X_2 + \dots + Y_n / X_n\}, \text{ onde}$$

Y_i representa o grau de pertinência e X_i representa o conjunto *fuzzy*. Para exemplificar é mostrado um conjunto *fuzzy* para um valor quente.

$$A = \{0 / 10^\circ + 0.3 / 16^\circ + 0.5 / 22^\circ + 0.8 / 26^\circ + 1 / 33^\circ\}$$

O exemplo mostra que se uma temperatura apresentar 26° ela não pertence ao conjunto de temperatura quente com grau 1, onde este grau representa a pertinência total de um elemento dentro de um conjunto *fuzzy* e sim grau de pertinência 0.8 dentro do conjunto.

Essa teoria é, também utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas *fuzzy* que auxiliam na obtenção de respostas baseados em domínios que apresentem informação com características imprecisas ou vagas.

3 – Redes Bayesianas.

A Rede Bayesiana é a forma de representação de um sistema baseado em conhecimento através de estruturas gráficas e é formalizada pela teoria da probabilidade, também conhecida como Redes Causais ou Redes de Probabilidades.

Uma Rede Bayesiana é construída pela aquisição de conhecimento de um modelo qualitativo do domínio de interesse, geralmente de um especialista, representando portanto o seu conhecimento genérico. Sendo essa rede composta por duas partes, uma qualitativa e outra quantitativa.

As Redes Bayesianas são grafos acíclicos direcionados onde os *nós* representam as variáveis com medida de incerteza associada, e os *arcos* representam a existência causal direta entre os *nós* conectados (parte qualitativa): a força dessa influencia é quantificada por probabilidades condicionais [8]. A parte qualitativa de uma rede bayesiana está associada a um grupo de funções que representam valores numéricos, os quais compõem a parte quantitativa.

Em uma Rede Bayesiana, mesmo que dois *nós* não estejam diretamente ligados, ainda existirá uma dependência entre eles, ou seja, quando uma nova evidência é apresentada na Rede, ocorre uma redistribuição das probabilidades em todos os *nós*.

A base de conhecimento de uma RedeBayesiana é formada por probabilidades, baseadas no conhecimento de um ou vários especialistas, e os cálculos utilizados para gerar a saída são baseados no Teorema de Bayes. A quantidade de especialistas envolvidos no processo de aquisição do conhecimento é uma questão complexa, dado que, se a base for formada apenas na experiência de um especialista, pode ficar incompleta ou não satisfazer aos demais especialistas que utilizarem o sistema. Entretanto, diversos especialistas envolvidos no processo de formação da base de conhecimento pode, não apenas, permanecer com os problemas anteriores como também aumentar ainda mais a complexidade deste processo que é, um dos mais complexos no desenvolvimento de qualquer sistema inteligente que apresente uma base de conhecimento.

Essa abordagem é utilizada para auxiliar no desenvolvimento de sistemas inteligentes capacitados para gerar possíveis soluções a diversos tipos de problemas, como por exemplo, diagnósticos médicos.

4 - Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* e Teoria da Probabilidade.

A busca por uma maneira de tratar a incerteza é muito antiga e a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* e a Teoria da Probabilidade, possuem abordagens diferentes com o objetivo de alcançar um resultado mais aproximado do que se entende por exato. Existem alguns enganos que podem ocorrer quando se refere a estas duas teorias: um deles é que embora exista distinção entre conjuntos *fuzzy* e medidas de probabilidade, algumas pontes relacionando-as vem sendo propostas e poderiam reconciliar pontos de vista opostos[2]. Uma outra visão do relacionamento entre conjuntos *fuzzy* e probabilidade é apresentada em [5] onde diz que, os primeiros autores de artigos abordando métodos *fuzzy*, buscando caminhos para justificar seus trabalhos, colocam prematuramente em xeque a utilização de probabilidade para os seus problemas.

A incerteza quando trabalhada pela probabilidade é tomada como um evento aleatório, o que não ocorre quando se está manipulando a incerteza por uma visão de conjuntos difusos (*fuzzy*), que é referente a imprecisão. Esta diferença influencia todo o contexto de qualquer abordagem em que se esteja trabalhando.

Por exemplo, diante de três copos com água límpida e inodora e outro copo com um veneno que apresenta as mesmas características externas da água, oferece-se certa quantidade de dinheiro para algumas pessoas e, pode ser, que alguma que esteja necessitando aceite escolher entre um dos copos, dado que existe 75% de probabilidade que ela ganhe (evento aleatório). Agora o veneno é distribuído nos copos, ou seja, a aleatoriedade acabou. Então, cada copo apresenta um grau de pertinência ao conjunto dos “copos envenenados” (evento *fuzzy*). A questão é: se a oferta for feita através do evento *fuzzy*, alguém ainda aceitaria escolher algum copo para beber? A incerteza por aleatoriedade acabou no momento em que o veneno foi distribuído nos copos, entretanto continuou existindo no evento *fuzzy* dado que, mesmo sabendo que existe veneno no copo a quantidade é desconhecida.

O raciocínio difuso é mais comum no cotidiano das pessoas do que elas mesmas possam perceber. Um exemplo disto é apresentado em [6] onde mostra que, raramente as pessoas apostam em loterias em números seqüenciais, mesmo sabendo que a probabilidade é a mesma para qualquer combinação, ou seja, as pessoas têm a sensação de que números seqüenciais são menos prováveis e não se sentem confortáveis em jogá-los. Este exemplo indica que as pessoas não são *meramente* estatísticas e sim, *também* estatísticas.

Ao combinar-se a Teoria dos Conjuntos *fuzzy* e probabilidades, o resultado pode ser uma maneira eficaz para resolver problemas que apresentem características tanto aleatórias quanto imprecisas, como por exemplo, no desenvolvimento de uma Rede *Fuzzy*-Bayesiana de diagnóstico.

5 – Incerteza e Híbridismo.

As incertezas existentes no mundo real necessitam de um certo tratamento para que sejam aplicadas no desenvolvimento de sistemas computacionais inteligentes. A incerteza pode estar nos dados, na informação e no conhecimento. A incerteza nos *dados* ou material bruto, é representada no âmbito da falta de procedência destes; na *informação*, que é qualquer dado estruturado de tal maneira que tenha um significado contextual[3]. O *conhecimento* é a informação estruturada em um nível mais elevado, mais condensado. É a representação concisa de experiência prévia [3]. Exemplificando estas definições pode-se entender que, feito um questionamento a respeito da temperatura, tem-se: a temperatura é 10° C (DADO), se a temperatura é menor que 20° C então ESTÁ FRIO (INFORMAÇÃO) e no frio é necessário manter o corpo aquecido para evitar resfriado (CONHECIMENTO). Um ponto que deve ser levado em consideração é a veracidade dos dados, dado que precisão, pode não representar certeza, por exemplo, uma função $f(x)$ qualquer gera um resultado com várias casas decimais (1.658795842), bastante preciso, entretanto, pode não ser o resultado correto. O tratamento da incerteza é feito através de teorias como probabilidades ou conjuntos *fuzzy*, por exemplo.

Sistemas Especialistas Probabilísticos, Sistemas Especialistas *Fuzzy*, Redes Neurais, Raciocínio Baseado em Casos são exemplos de aplicações de técnicas de Inteligência Computacional para auxiliar a resolução de problemas complexos. Cada uma das técnicas acima citadas, apresentam características próprias para solucionar problemas. Entretanto, a incerteza relativa a um determinado domínio de aplicação, necessita de um tratamento mais complexo e integrado. A necessidade do tratamento de grandes quantidades de informações e as incertezas inerentes aos sistemas complexos leva à fusão de metodologias, como métodos simbólicos e conexionistas, representada pelos Sistemas Híbridos[7]. Existem pelo menos dois motivos principais para utilizar sistemas híbridos para solucionar problemas: o primeiro é o fato de que algumas exigências para a solução de um problema não sejam possíveis de serem encontradas através de apenas um método; e o outro é que existem modelos para solucionar problemas de IA que não podem ser implementados utilizando apenas um método[3].

Uma rede Bayesiana, por exemplo, é utilizada para auxiliar no desenvolvimento de sistemas especialistas probabilísticos. Gera resultados satisfatórios quando o domínio apresenta características aleatórias. Entretanto, quando a aplicação é composta por incertezas representadas por eventos imprecisos, vagos ou por um problema que não esteja bem definido, por exemplo, um diagnóstico médico, é necessário manipular essa incerteza de maneira diferente, visando alcançar resultados que melhor representem o raciocínio do especialista.

Híbridismos como sistemas especialistas híbridos estão sendo utilizados para auxiliar no desenvolvimento de sistemas inteligentes que tratam a incerteza de domínios complexos. O desenvolvimento de sistemas híbridos necessita de um conhecimento mais aprimorado por parte do engenheiro do conhecimento, pois exige a compreensão dos métodos envolvidos na aplicação. Da união entre Teoria da Probabilidade e Conjuntos *Fuzzy*, resulta uma abordagem para desenvolver sistemas especialistas híbridos *Fuzzy*-Probabilístico.

6 –Abordagem Híbrida Fuzzy-Probabilística.

A maneira de como tratar a incerteza da informação no desenvolvimento de sistemas especialistas híbridos é de responsabilidade do engenheiro do conhecimento que, através da análise do domínio da aplicação seleciona a abordagem que lhe parecer mais adequada. Em [9] é apresentada uma abordagem na qual, fuzzyfica-se a saída de uma Rede Bayesiana, e cria-se um padrão através das tuplas de saída da Rede.

Em [1] é apresentada uma abordagem híbrida que realizou modificações no Teorema de Bayes permitindo a redistribuição do vetor de probabilidades da saída de uma Rede Bayesiana, com variáveis dicotômicas, ocasionando um achatamento destas probabilidades em relação a uma Rede Bayesiana sem hibridismo.

A abordagem híbrida aqui apresentada trata a incerteza nas entradas de uma Rede Bayesiana, permite utilizar nós dicotômicos ou não dicotômicos, fuzzyficando as variáveis que apresentam características de imprecisão, ou seja, admite o desenvolvimento de n conjuntos *fuzzy* que a aplicação necessitar. Esta abordagem utiliza a formula modificada do teorema de Bayes apresentada em [1] utilizando a combinação de probabilidades e graus de pertinência.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento de sistemas especialistas híbridos aplicando a abordagem híbrida apresentada neste trabalho segue os seguintes passos:

A – Análise do domínio da aplicação por parte do engenheiro do conhecimento e do especialista, objetivando identificar características das variáveis envolvidas na aplicação, ou seja, reconhecer se o domínio necessita de uma modelagem híbrida ou a utilização de um método único e específico satisfaz as necessidades.

B – Realizar a modelagem da parte qualitativa da Rede Bayesiana, ou seja, criar os nós que representam as evidências e o(s) nó(s) identificador(es) da(s) hipótese(s).

C – Definir quais as variáveis de entrada apresentam características de imprecisão, ou seja, aquelas que vão ser fuzzyficadas e quais não apresentam características de imprecisão e sim de aleatoriedade, tratadas como conjuntos *crisp*. Após o reconhecimento das variáveis é necessário que sejam identificados os conjuntos *fuzzy* para elas, não sendo necessário à delimitação destes, esta será realizada na etapa seguinte.

D – Essa é a etapa mais complexa do desenvolvimento de sistemas compostos por uma base de conhecimento. Segundo [10], a aquisição do conhecimento envolve, a identificação do conhecimento técnico relevante, a gravação, e inserção no computador para ser utilizado pela máquina de inferência do sistema especialista. Para a abordagem híbrida, aqui apresentada, é necessário que o conhecimento do especialista seja representado na forma de probabilidades para formar a base de conhecimento da Rede Bayesiana, parte quantitativa, e também seja feita à caracterização dos conjuntos *fuzzy*, ou seja, escolha dos tipos de funções de pertinência que melhor representam o domínio da aplicação, delimitação do universo de discurso (UD) de cada variável e identificação dos limites de cada conjunto *fuzzy*.

E – Implementação do sistema especialista híbrido através da abordagem híbrida proposta. As formulas 1, 2, 3, 4 e 5 são as necessárias para calcular as probabilidades do vetor de saída da Rede Bayesiana utilizando o hibridismo. As formulas 1 e 2 são as do Teorema de Bayes, utilizadas para calcular as probabilidades condicionais das variáveis que não apresentam características de imprecisão, ou seja, são probabilísticas (aleatórias).

$$P(H_i | e) = \frac{P(e | H_i) \cdot P(H_i)}{P(e)} \text{ onde,} \quad (1)$$

$$P(e) = P(e | H_i) + P(e | \neg H_i), \quad (2)$$

Enquanto que as formulas 3, 4 e 5 são utilizadas para calcular as probabilidades das variáveis que apresentam imprecisão no seu domínio (*fuzzy*). A teoria que apresenta a modificação do Teorema de Bayes é encontrada em [1].

$$P(H_i | \delta) = \frac{P(\delta | H_i)}{P(\delta)} \text{ onde,} \quad (3)$$

$$P(\delta | H_i) = P(H_i) \cdot [P(\delta | H_i) \cdot \mu_{\varepsilon 1}(\delta) + (1 - P(\delta | H_i)) \cdot \mu_{\varepsilon 2}(\delta)] \text{ onde,} \quad (4)$$

$$P(\delta) = \sum P(H_i) \cdot [P(\delta | H_i) \cdot \mu_{\varepsilon 1} + (1 - P(\delta | H_i)) \cdot \mu_{\varepsilon 2}(\delta)] \text{ onde,} \quad (5)$$

- $P(H_i | \delta)$ representa a probabilidade da hipótese dado um evento *fuzzy*.

- $\mu_{\varepsilon 1}$ e $\mu_{\varepsilon 2}$ representam os graus de pertinência dos conjuntos *fuzzy* envolvidos nos cálculos.

F – Realizar experimentos com o sistema para testar sua funcionalidade.

G – Análise dos resultados. Verificar junto ao especialista se, dado às entradas testadas, as probabilidades de saída, representam seu conhecimento.

Esta abordagem pode ser utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas híbridos para auxiliar especialistas e não especialistas de diversas áreas do conhecimento geral, que desejam utilizar sistemas computacionais inteligentes como uma maneira tecnológica alternativa de auxílio para solucionar problemas complexos que apresentem incertezas aleatórias, imprecisas e (ou) vagas, como por exemplo, na área de Geologia, para classificação de aquíferos fraturados ou em diagnóstico médico.

7. Conclusão.

A utilização do hibridismo em sistemas inteligentes permite trabalhar com as incertezas do mundo real de maneira mais qualificada, ou seja, os resultados obtidos apresentam-se mais parecidos com o modo de raciocinar de um especialista.

Sabe-se que não existe uma abordagem ou modelo “ideal” para desenvolvimento de qualquer tipo de domínio, baseado nisto, esclarece-se que este trabalho não tem o objetivo de desmerecer abordagens que não utilizam hibridismo, apenas apresenta uma abordagem híbrida que busca implementar a “maneira de pensar”, de uma forma alternativa, dos seres humanos, esta que é um dos paradigmas da IA.

A discussão entre qual das duas teorias, Conjuntos *Fuzzy* e Probabilidade, seja a mais adequada para o tratamento de incertezas do mundo real não é consensual, posto que cada uma destas teorias é uma certeza, com probabilidade ou grau de pertinência, improvável de ser total, dado que a escolha é baseada na própria incerteza do domínio de aplicação.

A abordagem híbrida apresenta-se como uma possibilidade de combinação entre as teorias citadas, de maneira que permita um melhor aproveitamento destas técnicas no tratamento de incertezas objetivando modelar, trabalhar e implementar o raciocínio humano em sistemas computacionais inteligentes.

8 – Referências.

- [1] Brignoli, J. T. Modelo Híbrido Difuso-Probabilístico, Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [2] Dubois, D. & Prade, H. *Fuzzy Sets and Probability: Missunderstandings, Bridges and Gaps*, Institute de Recherche en Informatique de Toulouse (I.R.I.T).
- [3] Kasabov, N. K. *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*, The MIT Press, London.
- [4] Nassar, S. M. *Tratamento de Incerteza: Sistemas Especialistas Probabilísticos*, notas de aula, Florianópolis, 2002.
- [5] Nguyen, H. T. *Fuzzy Sets and Probability*, J. Fuzzy Sets and Systems 90 (1997) 129-132.
- [6] Ortega, N. R. S. *Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina*, Tese, São Paulo, 2001.
- [7] Osório, F. S & Vieira R. *Sistemas Híbridos Inteligentes*, XIX Congresso da S.B.C. ENIA'99 – Encontro Nacional de Inteligência Artificial, Unisinos, Rio de Janeiro, 1999.
- [8] PEARL, J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Mateo, Calif.: Morgan Kaufmann, 1988.
- [9] Rezende, S. O. *Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações*, Manole, 2003.
- [10] Silva, A. O. *Modelo Híbrido de Rede Bayesiana e Lógica Nebulosa para Pesquisa Quantitativa em Ciências Sociais*, Dissertação, Florianópolis, 2002.
- [11] Wilson, R. A. & Keil, F. C. *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, The MIT Press, London, 1999.