

A LÓGICA FUZZY DO TIPO 2 E UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO

MÁRCIO P. LIMA, CRISTIANO H. DE O. FONTES, LEIZER SCHNITMAN

*Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Rua Aristides Novis, 02, 2º andar, Escola Politécnica – 40210-630 – Salvador – BA
E-mails: lima.bct@gmail.com, cfontes@ufba.br, leizer@ufba.br*

Abstract— This paper presents some aspects related to the type-2 fuzzy logic such as its features, the differences between the type-2 and type-1 fuzzy logic, the works developed, application's areas, advantages and disadvantages of this procedure. Furthermore, a study of case will be accomplished, in order to elucidate the potentiality of the type-2 fuzzy logic in relation to the decision making, specifically to handle with an existent problem in air traffic control.

Keywords— Type-2 fuzzy logic, type-2 fuzzy logic systems, decision making, air traffic control.

Resumo— Este trabalho apresenta vários aspectos relacionados à lógica fuzzy do tipo-2, destacando-se as diferenças em relação à lógica fuzzy tradicional, trabalhos desenvolvidos, áreas de aplicação, vantagens e desvantagens. Além disso, um estudo de caso será realizado, ilustrando a potencialidade da lógica fuzzy do tipo 2 em relação à tomada de decisão, especificamente para o tratamento de um problema existente no controle de tráfego aéreo.

Palavras-chave— Lógica fuzzy tipo 2, sistemas fuzzy tipo 2, tomadas de decisão, controle de tráfego aéreo.

1 Introdução

A lógica fuzzy do tipo 2 tem sido uma área muito pesquisada nos últimos anos (John e Coupland, 2007). Este crescimento vem acompanhado de uma potencialidade desta estratégia no tratamento de incertezas em modelos e/ou informações provenientes de especialistas. Pode-se encontrar trabalhos nas áreas de Engenharia (Elétrica, Eletrônica, Mecatrônica, Espacial, etc), Ciência da Computação, Medicina, Biologia, Economia, Matemática, dentre outras, evidenciando-se a potencialidade, diversidade e amplitude de aplicação desta metodologia e a eficácia desta extensão em relação à lógica fuzzy do tipo 1.

Na maioria dos trabalhos pesquisados, conforme referenciados na seção 2, a lógica fuzzy do tipo 2 consegue superar os problemas que a lógica fuzzy tradicional ou outra técnica não conseguia resolver satisfatoriamente, caracterizando assim, um caminho promissor principalmente na identificação de modelos a partir de informações obtidas por especialista humano.

A lógica fuzzy do tipo 2 trata as incertezas associadas aos conjuntos fuzzy, o que não é contemplado na lógica fuzzy do tipo 1, viabilizando, portanto, a manipulação de termos imprecisos em toda sua extensão, inclusive na definição das funções de pertinência (Mendel, 2003).

O controle de tráfego aéreo representa um campo de intensa atividade de tomadas de decisões. Controladores de tráfego aéreo diferentes têm definições diferentes das mesmas variáveis lingüísticas e mesmo assim conseguem inferi-las e tomam decisões semelhantes. Assim, a lógica fuzzy

do tipo 2 representa uma alternativa potencial para a modelagem deste tipo de problema.

Na seção 2 será dada uma visão geral da lógica fuzzy do tipo 2 e de sistemas fuzzy. Na seção 3 o controle de tráfego aéreo será abordado juntamente com a identificação do problema a ser investigado. Na seção 4 é apresentada a modelagem e o sistema fuzzy do tipo 2 aplicado para a solução do problema. Por fim, na seção 5 serão dadas a conclusão e indicações para a continuidade deste trabalho.

2 A Lógica Fuzzy do tipo 2

A lógica fuzzy do tipo 2 foi introduzida por Lotf Zadeh em 1975 como uma extensão da lógica fuzzy tradicional (Zadeh, 1975). Seu surgimento está relacionado com a insuficiência da lógica fuzzy tradicional em modelar as incertezas inerentes à definição das funções de pertinência dos antecedentes e conseqüentes em um sistema de inferência fuzzy (Mendel 2003).

Conjuntos fuzzy são os principais elementos da lógica fuzzy. Conjuntos fuzzy do tipo 2 são conjuntos fuzzy cujos graus de pertinência são conjuntos fuzzy do tipo 1 e não um único valor (Karnik et al, 1999). Tais conjuntos podem ser usados em situações onde existe incerteza a respeito dos graus de pertinência, incerteza do formato das funções de pertinência ou incerteza em alguns dos parâmetros das funções de pertinência (Karnik e Mendel, 1998).

Um meio de representar conjuntos fuzzy do tipo 2 é através da forma geométrica da sua função de pertinência. Nas Figuras 1 e 2 são representados dois conjuntos fuzzy diferentes do tipo 2. O primeiro é representado por uma gaussiana em duas dimensões, a área desfocada próxima à linha da função representa a incerteza dos limites do conjunto, esta

área é denominada “footprint of uncertainty” (FOU). Na Figura 2 há o recurso da terceira dimensão para possibilitar a representação da incerteza (eixo vertical), a área escura representa o FOU.

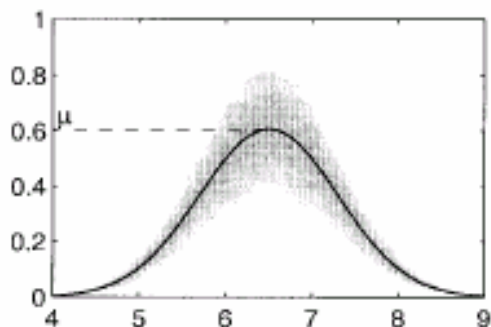


Figura 1. Conjunto fuzzy do tipo 2 representado bidimensionalmente. Fonte: Karnik et al (1999).

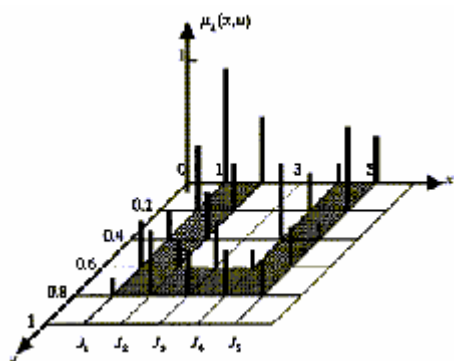


Figura 2. Conjunto fuzzy do tipo 2 representado tridimensionalmente. Fonte: Mendel e John (2002).

Uma das grandes aplicações da lógica fuzzy do tipo 2 está na identificação de modelos, ou previsão de comportamento, a partir de informações de especialistas. Sistemas fuzzy do tipo 2 são sistemas fuzzy em que pelo menos um dos seus conjuntos fuzzy antecedentes ou consequentes são conjuntos fuzzy do tipo 2 (Karnik et al, 1999). Na Figura 3 é representada a estrutura genérica deste tipo de sistema.

O fuzzificador dos sistemas fuzzy do tipo 1 transforma um determinado valor da entrada, inserido

em seu universo de discurso, em um único valor pertencente ao intervalo [0;1], conforme o conjunto do tipo 1 definido para o antecedente em uma dada regra. O processo de fuzzificação em um sistema do tipo 2, de acordo com a natureza e definição de um conjunto do tipo 2, estabelece a associação de um valor da entrada com uma função de pertinência do tipo 1 e não simplesmente com um único valor pertencente ao intervalo [0;1]. Ou seja, insere-se no mecanismo de inferência a incerteza em relação à pertinência da entrada.

Regras fuzzy são regras condicionais do tipo SE-ENTÃO e possuem o formato:

SE (proposição fuzzy) ENTÃO (proposição fuzzy)

A diferença entre sistemas fuzzy do tipo 1 e do tipo 2 está associada à natureza das funções de pertinência e não às regras. Portanto, as regras permanecem as mesmas para os sistemas fuzzy do tipo 1 ou 2 (Karnik et al, 1999).

Para a desfuzzificação de sistemas fuzzy do tipo 1, o conjunto fuzzy do tipo 1 originado do processo de inferência é transformado em um conjunto fuzzy do tipo 0, ou seja, simplesmente um número. Em sistemas fuzzy do tipo 2, a desfuzzificação compreende duas etapas, que são a redução de tipo, que é uma conversão do conjunto fuzzy do tipo 2, resultante da inferência, em um conjunto fuzzy do tipo 1, e, em seguida, a utilização de um método convencional de desfuzzificação tal como o centróide para a obtenção do valor final da inferência.

Sistemas fuzzy do tipo 2 tem sido usados em várias áreas, como descrito a seguir.

Coupland (2003), Hagrais (2004) e Astudillo et al (2006) aplicaram lógica fuzzy do tipo 2 para navegação de robôs móveis. John e Lake (2001) desenvolveram um projeto para modelar o processo de tomada de decisão de enfermeiras. Qiu (2006) apresentou um sistema híbrido utilizando fuzzy do tipo 2 e otimização com Algoritmos Genéticos para a previsão do tempo de sobrevivência de pacientes com mieloma. John et al (2000) apresentaram

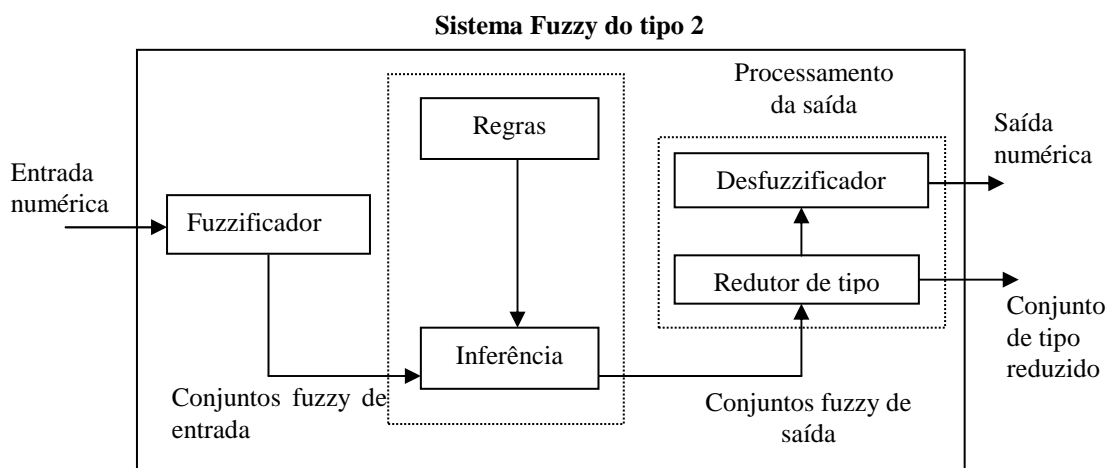


Figura 3. Estrutura de um sistema fuzzy do tipo 2 (Baseado em Karnik et al, 1999, p.

resultados da utilização de técnicas de clusterização neuro-fuzzy com conjuntos fuzzy do tipo 2 na análise e classificação de traumas da tibia. Gu (2005) propôs um modelo de sistema especialista para realização de compras via web. Tang et al (2004) criaram um sistema de compras on-line utilizando a tecnologia de data mining fuzzy do tipo 2. Melgarejo et al (2004) apresentaram uma arquitetura de hardware baseada nas técnicas de inferência fuzzy do tipo 2, Melgarejo e Peña-Reyes (2004) implementaram este modelo sobre a tecnologia FPGA. Shu e Liang (2004) criaram um sistema fuzzy do tipo 2 para análise e estimativa do tempo de sobrevivência de redes de sensores sem fio. Wu e Mendel (2003) expuseram resultados preliminares de um sistema de classificação de veículos terrestres através de suas emissões acústicas. Zeng e Liu (2004) apresentaram uma extensão do modelo oculto de Markov. Huarng e Yu (2005) criaram um modelo para previsão de estoque. Tan (2006) apresentou um controlador fuzzy do tipo 2 simplificado adequado para aplicações de tempo real. Homaifar et al (2001) propuseram um modelo para redução de vibração em materiais utilizados em veículos espaciais.

3. O Controle de Tráfego Aéreo

Com a invenção das aeronaves, datada do início do século XX, a humanidade vem presenciando a evolução e o aprimoramento tecnológico deste meio de transporte. Na medida em que aumentava o número de aeronaves, aumentava também a necessidade de controlá-las, a fim de evitar colisões entre elas. O controlador de tráfego aéreo é o responsável por esta tarefa e para isso pode trabalhar em vários tipos de órgãos de controle, um dos mais conhecidos é a torre de controle, que pode ser encontrada na maioria dos aeroportos.

Para efetuar o controle entre as aeronaves, as torres de controle emitem autorizações e instruções às aeronaves. Dentre estas autorizações, as mais comuns são para pousar, decolar, arremeter, taxiar, acionar motores e rebocar aeronaves (Brasil, 1999). A autorização de decolagem é o item que será estudado, pois no seu processo decisório encontramos muitos termos lingüísticos imprecisos, tornando-se assim, um caso propício para estudo.

No serviço de controle de tráfego aéreo, inúmeras decisões precisam ser tomadas em tempo hábil para haver segurança e fluidez de tráfego aéreo. Diversos sistemas computacionais têm sido implementados nos órgãos de controle a fim de auxiliar os controladores de tráfego aéreo e também para otimizar o uso do espaço aéreo, conforme indicados por Lima e Amorim (2006). Contudo, durante o levantamento de referências para este trabalho, não foi encontrado nenhum indicativo a respeito de sistemas de decisão envolvendo o cenário proposto na Figura 4:

Uma aeronave no solo está se movimentando em direção à pista, prestes a decolar, e uma outra aeronave se aproxima para pouso na mesma pista, ocasionando um momento de tensão e tomada de decisão por parte do controlador. A decisão a ser tomada pela torre de controle é: “Autorizar ou não a aeronave (do solo) a ingressar na pista e decolar antes que a outra pouse?”

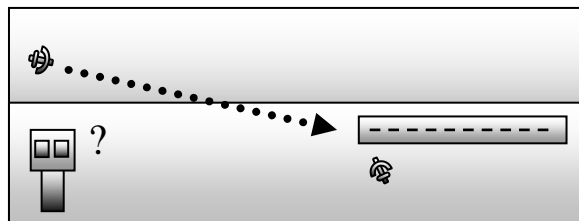


Figura 4. Cenário da tomada de decisão.

Seria fácil para o controlador de tráfego aéreo tomar a decisão se a aeronave que está por pousar estivesse bem longe (neste caso, a aeronave do solo seria autorizada a decolar) ou bem perto do pouso (neste caso, a do solo deverá aguardar o pouso da que se aproxima). Porém, se a aeronave que pousa estiver a uma distância intermediária, ocorre a dúvida, pois uma avaliação mal-sucedida poderia ocasionar um incidente ou até mesmo um acidente aeronáutico.

Este cenário ocorre em todos os aeroportos controlados, contudo, as tomadas de decisão dos controladores de tráfego aéreo variam em função de diversos fatores inerentes a cada aeroporto, como por exemplo, o comprimento e o formato das taxiways – vias terrestres demarcadas destinadas à movimentação de aeronaves. Este trabalho propõe um estudo de caso utilizando lógica fuzzy do tipo 2 para apoio à tomada de decisão no controle de tráfego aéreo, especificamente para auxiliar os controladores de tráfego aéreo que operam no Aeroporto Internacional de Salvador/BA – Brasil, na tomada de decisão de autorização de decolagens de aeronaves que possam conflitar com aeronaves que estejam em aproximação para pouso, deixando-os com maior disponibilidade para resolver outros tipos de controle e conflitos aéreos.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos na área de controle de tráfego aéreo relacionados com a lógica fuzzy e que também servem como embasamento para o desenvolvimento desta pesquisa.

Clymer (1995) propôs um modelo fuzzy adaptativo para reduzir o tempo de espera de aeronaves no ar que aguardam para pouso. Robinson III et al (1997) desenvolveram um método para seqüenciamento de pouso de aeronaves. Babić e Krstić (2000) propuseram uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para cálculo da quantidade de setores a serem utilizados para o controle das aeronaves. Profillidis (2000) criou um método para previsão de crescimento do aeroporto de Rhodes. Camargo Júnior e Nascimento (2002) realizaram um estudo sobre a resolução de conflitos de aeronaves que estejam em rota de colisão. Rong (2002)

desenvolveu um sistema hierárquico baseado em agentes para auxílio na navegação de aeronaves, livrando-as de conflitos com outras aeronaves ou do mau-tempo. Gao et al (2003) propuseram uma solução para descongestionar aeroportos de grande movimento. Kessinger et al (2003) criaram um classificador de eco radar para identificar os diversos tipos de objetos captados por radar Doppler, para previsão do tempo. Boles (2005) descreveu o desenvolvimento de um sistema criado pela British Aerospace Systems para eliminar interferências nos radares dos controladores de tráfego aéreo, criados pelas turbinas das torres de produção de energia eólica da Inglaterra. Hicks et al (2003) propuseram um modelo fuzzy para previsão de teto de nuvens e visibilidade horizontal, elementos importantes para o controle de tráfego aéreo. Lindholm (2005) desenvolveu uma ferramenta para informação e alerta dos principais perigos meteorológicos relacionados à aviação.

Após esta revisão bibliográfica, é possível observar que o controle de tráfego aéreo é uma área de grandes e recentes pesquisas. Também é perceptível que a lógica fuzzy é aplicável a diversos aspectos do controle de tráfego aéreo. Contudo, não foi encontrada nenhuma referência da lógica fuzzy do tipo 2 associada ao controle de tráfego aéreo, tornando-se assim um novo e promissor campo de pesquisa.

4. Modelagem do Sistema

Um grupo de especialistas foi designado para auxiliar na modelagem do sistema. Uma das tarefas do grupo foi identificar as aeronaves que mais trafegam em Salvador e, entre elas, as que possuem desempenho semelhante nos pontos-chaves desta pesquisa – aproximação final para pouso e movimento nas taxiways para decolagem. As aeronaves selecionadas foram os Boeing 737-300, Boeing 737-400, Boeing 737-500, Boeing 737-700, Boeing 737-800, Fokker 100, Airbus 319 e 320.

Em uma outra etapa, foram feitos questionários direcionados aos controladores de tráfego aéreo para registrar os seus critérios utilizados para tomar a decisão de autorização de decolagens. Alguns pilotos também foram entrevistados a fim de se levantar valores de alguns termos lingüísticos do modelo, como valores limites de velocidade das aeronaves no solo e velocidade mínima em aproximação para pouso.

Após a análise das entrevistas aos controladores especialistas, foi possível listar os itens mais relevantes na avaliação para a tomada de decisão: tipo das aeronaves envolvidas no cenário, posição e velocidade da aeronave que está por decolar e posição e velocidade da aeronave que se aproxima para pouso.

Diante destas informações, foi possível modelar a estrutura do sistema fuzzy. Na Figura 5 é representado o esquema do sistema.

Foram definidas quatro variáveis de entrada e uma de saída. Estas variáveis serão explicadas a seguir e a definição formal dos seus conjuntos fuzzy faz parte da próxima etapa deste trabalho.

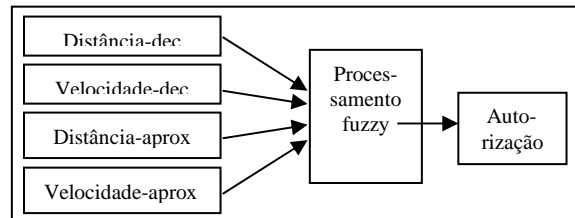


Figura 5. Esquema do Sistema Fuzzy.

Distância-dec – Distância que a aeronave que está por decolar se encontra em relação ao ponto de espera medida em metros. O ponto de espera é a máxima posição que uma aeronave pode taxiar antes de ingressar em uma pista para decolagem. Esta variável é composta dos conjuntos fuzzy: no-ponto, perto e longe.

Velocidade-dec – Velocidade empregada pela aeronave que está por decolar, durante seu táxi em direção ao ponto de espera, medida em nós ($1 \text{ nó} \cong 1,85 \text{ Km/h}$). Esta variável possui os conjuntos fuzzy: zero, baixa, normal e alta.

Distância-aprox – Distância entre cabeceira da pista e uma aeronave que se aproxima para pouso, medida em milhas náuticas ($1 \text{ milha náutica} \cong 1,85 \text{ Km}$). Esta variável possui dois conjuntos fuzzy: perto e longe.

Velocidade-aprox – Velocidade empregada pela aeronave que está em aproximação para pouso, medida em nós. Esta variável é composta pelos conjuntos fuzzy: normal e alta.

Autorização – Variável que comporta os valores de autorização emitidos pelos controladores de tráfego aéreo sobre a aeronave que está por decolar. Foram identificados três tipos de autorizações:

Não-decola – Termo que corresponde à proibição de decolagem da aeronave naquele momento.

Decola-imediato – Ao receber esta autorização, a aeronave deverá decolar o mais rápido possível, sem realizar parada na cabeceira da pista e sem reduzir a velocidade se já estiver em movimento. Este tipo de autorização ocorre quando existe uma outra aeronave se aproximando para pouso e o controlador julga possível que a aeronave do solo decole antes. Porém esta decolagem deve ser executada o mais rápido que o usual, para não comprometer a segurança e fluidez do tráfego aéreo.

Decola – Termo que corresponde à autorização de decolagem, sendo admitido um pequeno atraso na ação de decolagem por parte do piloto.

Foram identificadas quarenta e oito regras diferentes para o sistema fuzzy. Na Figura 6 são apresentadas algumas destas regras.

1. If (distancia-dec is no-ponto) and (velocidade-dec is zero) and (distancia-aprox is perto) and (velocidade-aprox is normal) then (autorizacao is decola-imediato)
2. If (distancia-dec is no-ponto) and (velocidade-dec is zero) and (distancia-aprox is longe) and (velocidade-aprox is normal) then (autorizacao is decola)
3. If (distancia-dec is no-ponto) and (velocidade-dec is zero) and (distancia-aprox is perto) and (velocidade-aprox is alta) then (autorizacao is nao-decola)
4. If (distancia-dec is no-ponto) and (velocidade-dec is zero) and (distancia-aprox is longe) and (velocidade-aprox is alta) then (autorizacao is decola)

Figura 6. Alguns exemplos de regras do sistema fuzzy proposto.

Numa primeira fase, o sistema foi implementado utilizando a lógica fuzzy do tipo 1 e informações de três especialistas controladores de tráfego aéreo. Para a definição dos conjuntos fuzzy tipo 1, foi utilizada a média dos limites dos conjuntos fuzzy definidos pelos especialistas e os resultados podem ser vistos na Tabela 1 (Lima e Amorim, 2006).

Tabela 1. Comparação dos resultados do modelo fuzzy tipo 1 com a decisão do controlador

Porcentagem	Indicação do modelo comparado à decisão real do controlador de tráfego aéreo
73,3	Resultados idênticos
10	A indicação do modelo foi mais precavida
10	A indicação do modelo foi melhor que a do controlador
6,7	Risco – casos em que o controlador não aceitaria a indicação do modelo

Pode-se perceber que o modelo fuzzy tipo 1 é promissor devido ao seu alto índice (73,3%) de coincidência dos resultados de autorizações (variável fuzzy de saída do sistema). Porém, o índice de risco (6,7%) é consideravelmente alto a ponto de tornar inviável a utilização operacional deste modelo com tais parâmetros. Desta forma, pretende-se elaborar um sistema fuzzy do tipo 2, uma vez que contempla todas as informações obtidas pelos especialistas e não simplesmente a média dos dados. Assim, espera-se reduzir o índice de riscos, o qual significaria uma melhoria qualitativa do modelo.

A próxima etapa do trabalho será a definição dos conjuntos fuzzy do tipo 2 para cada variável lingüística. As etapas restantes consistem em: escolha do método de inferência adequado, método de redução de tipo, método de desfuzzificação, implementação e validação do modelo.

5. Conclusão

A lógica fuzzy do tipo 2 é uma extensão da lógica fuzzy tradicional, com ela é possível tratar certos tipos de incertezas que a tradicional não tratava,

como limites de conjuntos imprecisos, graus de pertinência imprecisos ou incerteza do formato das funções de pertinência. A incerteza dos conjuntos fuzzy muitas vezes é consequência de definições provenientes de informações de especialistas, e pode também estar associada às imperfeições inerentes à amostra de dados em problemas de identificação com sistema fuzzy. Uma das principais aplicações da lógica fuzzy de um modo geral, está na tomada de decisões, e o controle de tráfego aéreo é uma área em que esse processo ocorre a todo instante, tornando-se alvo do estudo de caso deste trabalho. Um cenário de tomada de decisão foi estudado e foi percebido que controladores de tráfego aéreo possuem definições diferentes para mesmas variáveis lingüísticas envolvidas nas tomadas de decisões, e mesmo assim tomam decisões semelhantes sobre as aeronaves no contexto do cenário. Através da modelagem foi possível perceber o quanto a lógica fuzzy do tipo 2 faz parte deste cenário de tomada de decisão, porém é necessário a implementação do modelo e testes de validação para a verificação da eficácia do modelo proposto.

Referências Bibliográficas

- Astudillo, L., Castillo, O. e Aguilar, L. T. (2006). Intelligent Control of an Autonomous Mobile Robot Using Type-2 Fuzzy Logic, *Instituto Tecnológico de Tijuana*, Tijuana, México.
- Babić, O. e Krstić, T. (2000). Airspace Daily Operational Sectorization by Fuzzy Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 116, Issue 1. November. Special Issue on Fuzzy Sets in Traffic and Transport Systems, p. 49-64.
- Boles, T. (2005). BAE Uses Fuzzy Logic to Make Wind Farms Vanish, *The Business*, London. June 29.
- Brasil. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica (1999). *IMA 100-12 – Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo*. Brasília.
- Camargo Júnior, J. B. e Nascimento, R. L. (2002). Simulação de Algoritmos Aplicados ao Controle de Tráfego Aéreo, *In: 10º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP*, São Carlo, SIICUSP, Vol. 1.
- Clymer, J. R. (1995). Induction of Fuzzy Rules for Air Traffic Control. *Proceedings – 1995 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vancouver, British Columbia, Canada. October, p. 1495-1502.
- Coupland, S. (2003). Type-2 Fuzzy Control of a Mobile Robot, *Centre for Computational Intelligence De Montfort University*. The Gateway Leicester. United Kingdom.
- Gao, H., Chen, L. e Chen, D. (2003). Air Traffic Fuzzy Control of The Single Airport Ground-Holding Problem, *The proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation System*, October, p. 703-707.

- Gu, L. (2005). Web shopping expert systems using new interval type-2 fuzzy reasoning, *College of Arts and Sciences*, Georgia State University.
- Hagras, H. A. (2004). A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile Robots, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, Vol. 12, n° 4.
- Hicks, T., Crawford, T. e Wilson, M. (2003). A Fuzzy Logic System for Automated Short Term Aviation Weather Forecasts, *3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environment Science*, CA, EUA. 11 February.
- Homaifar, A., Shen, Y. e Stack B. V. (2001). Vibration Control of Plate Structures Using PZT Actuators and Type II Fuzzy Logic, *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, VA June 25-27.
- Huang, K. e Yu, H. (2005). A Type 2 fuzzy time series model for stock index forecasting, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 353, 1 August, p. 445-462.
- John, R.I.; Innocent, P.R. e Barnes, M.R. (2000). Neuro-fuzzy clustering of radiographic tibia image data using type 2 fuzzy sets, *Inf. Sci.* 125, N° 1-4, p. 65-82.
- John, R. e Lake, S. (2001). Type-2 fuzzy sets for modelling nursing intuition, *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, Joint 9th, Vol. 4, 25-28 July, p. 1920 – 1925.
- John, R. e Coupland, S. (2007). Type-2 Fuzzy Logic: A Historical View. Extensions to Type-1 Fuzzy Logic: Type-2 Fuzzy Logic and Uncertainty, *Cap. 5. IEEE Computational Intelligence Magazine* 2(1):57-62, February.
- Karnik, N. N. e Mendel, J.M. (1998). Introduction to type-2 fuzzy logic systems. *Fuzzy Systems Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence, The 1998 IEEE International Conference*, Vol. 2, 4-9 May, p.915 – 920.
- Karnik, N. N., Mendel, J. M. e Liang, Q. (1999). Type-2 Fuzzy Logic Systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, N° 6, December.
- Kessinger, C., Ellis, S. e Andel, J. V. (2003). The Radar Echo Classifier: A Fuzzy Logic Algorithm for the WSR-88D, *3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environment Science*, CA, EUA. 11 Feb.
- Lima, M. P. e Amorim, C. A. (2006). Um modelo Fuzzy para apoio à tomada de decisão no Controle de Tráfego Aéreo, *Monografia (Bacharelado em Análise de Sistemas) – Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Universidade do Estado da Bahia*, Salvador.
- Lindholm, T. A. (2005). Air Traffic Management Decision Support Using Integrated Methods of Diagnosing and Forecasting Aviation Weather, *Proceedings of the Fifth Integrated Communications, Navigation, and Surveillance (ICNS) Conference and Workshop*, November, p. 39.
- Melgarejo, M. A. e Peña-Reyes, C. A. (2004). Hardware architecture and FPGA implementation of a type-2 fuzzy system, *4th ACM Great Lakes symposium on VLSI*, Boston, MA, USA. Session: VLSI. p. 458 – 461.
- Melgarejo, M., Peña-Reyes, C.A. e Garca, A. (2004). Computational Model and Architectural Proposal for a Hardware Type-2 Fuzzy System, *From Proceeding (413) Neural Networks and Computational Intelligence*.
- Mendel, J. M. (2003). Fuzzy Sets for Words: a New Beginning, *The IEEE International Conference on Fuzzy Systems*.
- Mendel, J. M. e John, R. I. B. (2002). Type-2 Fuzzy Sets Made Simple, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 10, N° 2, April 2002.
- Profillidis, V.A. (2000). Econometric and fuzzy models for the forecast of demand in the airport of Rhodes, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 6, N° 2, April, p. 95-100.
- Qiu, Y. (2006). Statistical genetic interval-valued type-2 fuzzy system and its application, *College of Arts and Sciences*, Georgia State University.
- Robinson III, J. E., Davis, T. J. e Isaacson, D. R. (1997). Fuzzy Reasoning-Based Sequencing of Arrival Aircraft in The Terminal Area, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, New Orleans, LA, August.
- Rong, J. (2002). Intelligent Executive Guidance Agent for Free Flight, *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*. January, Reno, NV.
- Shu, H. e Liang, Q. (2004). Wireless Sensor Network Lifetime Analysis Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems, *Department of Electrical Engineering. University of Texas at Arlington*. Arlington – Texas – USA.
- Tan, D. W. W. W. (2006). A simplified type-2 fuzzy logic controller for real-time control, *Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore*.
- Tang, M., Zhang, Y. e Zhang, G. (2004). Type-2 Fuzzy Web Shopping Agents, *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI'04)*, p. 499-503.
- Wu, H. e Mendel, J. M. (2003). Multi-category Classification of Ground Vehicles using Fuzzy Logic Rule-based Classifiers: Early Results, *Proceeding (385) Artificial Intelligence and Soft Computing*, USA.
- Zadeh, L. A. (1975). The Concept of A Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning – 1, *Information Sciences*, Vol. 8, p. 199 - 249.
- Zeng, J. e Liu, Z. (2004). Type-2 Fuzzy Hidden Markov Models to Phoneme Recognition, *17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04) – Vol. 1*, p. 192-195.