



Universidade Federal da Bahia
PPGM – Programa de Pós-Graduação
em Mecatrônica



Márcio Pereira Lima

A Lógica Fuzzy tipo 2 e um estudo de caso aplicado no
Controle de Tráfego Aéreo

Salvador

2008



Universidade Federal da Bahia
PPGM – Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica



A Lógica Fuzzy tipo 2 e um estudo de caso aplicado no Controle de Tráfego Aéreo

Márcio Pereira Lima

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-graduação em
Mecatrônica da Universidade Federal
da Bahia como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de
Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Hora
de Oliveira Fontes. Co-orientador:
Prof. Dr. Leizer Schnitman.

Salvador

2008

L732 Lima, Márcio Pereira.

A lógica fuzzy tipo 2 e um estudo de caso aplicado no controle de tráfego aéreo /
Márcio Pereira Lima. - 2008.

135 f. : il. color.

Orientador : Prof. Dr. Cristiano Hora de Oliveira Fontes.

Co-orientador: Prof. Dr. Leizer Schnitman.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2008.

1. Inteligência artificial. 2. Lógica fuzzy tipo 2. 3. Sistemas fuzzy tipo 2. 4. Controle
de tráfego aéreo. I. Fontes, Cristiano Hora de Oliveira. II. Schnitman, Leizer. III.
Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. IV. Título.

CDD - 006.3

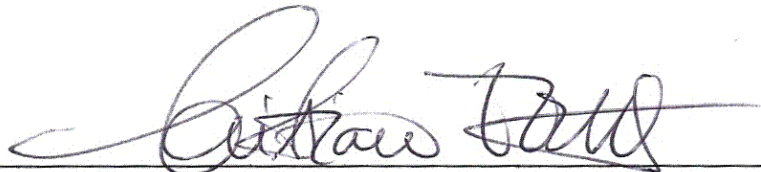
CDU - 004.8

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: A LÓGICA FUZZY TIPO 2 E UM ESTUDO DE CASO APLICADO NO CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO.

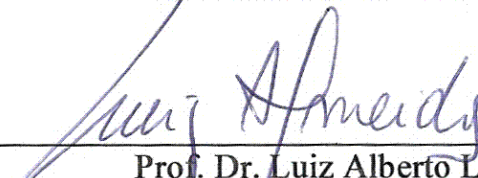
Estudante: Márcio Pereira Lima

Esta dissertação de mestrado foi aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Cristiano Hora de Oliveira Fontes

Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Universidade Federal da Bahia - UFBA



Prof. Dr. Luiz Alberto Luz Almeida

Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Universidade Federal da Bahia - UFBA



Prof. Dr. Karl Heinz Kienitz

Dr.sc. techn., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich - ETHZ
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

08 de setembro de 2008

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos controladores de tráfego aéreo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu amigo Ricardo, que sempre me motivou a estudar e a nunca desanimar nesta caminhada.

Agradeço aos amigos controladores de tráfego aéreo, que contribuíram com suas preciosas informações acerca de suas atitudes em tomadas de decisão.

Agradeço também aos professores e funcionários do PPGM, principalmente aos orientadores, Cristiano e Leizer, que acreditaram na realização deste trabalho e que conduziram seu desenvolvimento com sabedoria e paciência.

RESUMO

A lógica fuzzy tipo 2 é uma extensão da lógica fuzzy tradicional e tem ganhado bastante atenção e reconhecimento nas diversas áreas do conhecimento humano. Ela trata elementos que a lógica fuzzy tradicional não é capaz de resolver, em consequência da dificuldade presente na descrição da própria incerteza, tais como limites imprecisos de conjuntos e imprecisão de parâmetros das funções de pertinências. Esta imprecisão muitas vezes é dada pelas definições oriundas de informações de especialistas ou por erros presentes nos dados. Neste trabalho é apresentada esta nova modalidade da lógica e algumas de suas variações, como a intervalar com modelo TSK (Takagi-Sugeno-Kang). Também foram abordadas as diferenças em relação à lógica fuzzy tradicional, trabalhos desenvolvidos, áreas de aplicação, vantagens e desvantagens. Um estudo de caso foi realizado a fim de ilustrar a aplicabilidade da lógica fuzzy tipo 2 em relação à tomada de decisão, especificamente para o tratamento de um problema existente no controle de tráfego aéreo. Para isto, foi necessária a criação de uma metodologia apropriada e o desenvolvimento de um *framework* para a validação do modelo proposto. Através dos resultados obtidos e comparações com modelos fuzzy tradicionais (tipo 1), foi possível identificar que o modelo fuzzy tipo 2 se apresentou como uma melhor proposta de tradução das tomadas de decisões em tráfego aéreo para o cenário definido. Desta forma, os resultados mostram a potencialidade da metodologia proposta para o desenvolvimento de sistemas que sirvam como ferramenta de apoio à tomada de decisão em tráfego aéreo, e, além disso, confirmam a eficácia e a adequação da lógica fuzzy tipo 2 na identificação de modelos que contemplam a informação humana (do especialista) como elemento fundamental para a sua construção.

Palavras-chave: lógica fuzzy tipo 2, sistemas fuzzy tipo 2, controle de tráfego aéreo.

ABSTRACT

Type-2 fuzzy logic is an extension of the traditional fuzzy logic and has earned considerable attention and recognition in the various areas of human knowledge. Type-2 fuzzy logic treats elements that the traditional fuzzy logic is unable to solve, such as the uncertainty in some aspects of modeling of systems, including the fuzzy sets and parameters of the membership functions. This non exactness can be associated with information from different experts or with the errors present in the data. This paper presents this new form of logic and some of its variations, as the interval Takagi-Sugeno-Kang (TSK). It also presents the differences in relation to traditional fuzzy logic, works developed, areas of application, advantages and disadvantages. A case study was conducted in order to illustrate the potential of type-2 fuzzy logic for decision making, specifically for the treatment of a problem in air traffic control. For this, it was necessary to create appropriate methodology and development of a framework for the validation of the proposed model. Through the results and comparisons with traditional fuzzy models (type-1), it was possible to identify that the type-2 fuzzy model was the best translation of the decision making in air traffic to the scenario defined. Thus, the results show the capability of the methodology proposed for the development of systems that serve as a tool to support decision making in air traffic, and, moreover, confirm the efficiency and suitability of the type-2 fuzzy logic in the identification of models that contain the human's information (the expert) in its construction.

Keywords: *type-2 fuzzy logic, type-2 fuzzy logic systems, air traffic control.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de publicações sobre lógica fuzzy tipo 2 de 1975 a 2007.....	3
Figura 2. Conjunto fuzzy tipo 1 triangular	8
Figura 3. Relação entre as teorias dos conjuntos clássicos e fuzzy.....	9
Figura 4. Principais formatos dos conjuntos fuzzy.....	10
Figura 5. Conjuntos fuzzy A e B não interpolados e interpolados.....	10
Figura 6. Interseção dos conjuntos fuzzy A e B	10
Figura 7. União dos conjuntos fuzzy A e B	11
Figura 8. Conjunto fuzzy A e seu conjunto complemento A'	11
Figura 9. Variável lingüística velocidade	12
Figura 10. Esquema de sistemas fuzzy	13
Figura 11. Conjunto fuzzy tipo 2 gaussiano.	17
Figura 12. Hierarquia das teorias dos conjuntos.....	17
Figura 13. Conj. fuzzy tipo 2 representado em duas dimensões	19
Figura 14. Conj. fuzzy tipo 2 representado em três dimensões	19
Figura 15. Conjuntos fuzzy tipo 2 e operações..	20
Figura 16. Estrutura de inferência de modelo fuzzy tipo 2	22
Figura 17. Exemplo de um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar	25
Figura 18. Funções de pertinência secundárias de x_1 e x_2	25
Figura 19. Cenário da tomada de decisão.....	45
Figura 20. Quadro para preenchimento dos conjuntos fuzzy para a variável <i>Distância</i>	57
Figura 21. Descrição gráfica da variável <i>velocidade</i> – para automóveis	58
Figura 22. Arquitetura do <i>framework</i>	62
Figura 23. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal.....	63
Figura 24. Triângulo como trapézio degenerado.....	63
Figura 25. Triângulo com grau de pertinência máximo menor que 1	63
Figura 26. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal completo.....	63
Figura 27. Conjunto fuzzy tipo 1 trapezoidal	64
Figura 28. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar triangular	64
Figura 29. Conjunto fuzzy tipo 1 triangular	64
Figura 30. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal com um lado vertical.....	64
Figura 31. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar triangular com um lado vertical	65
Figura 32. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal com extremidades agudas e função inferior triangular.....	65
Figura 33. Exemplo do arquivo de inicialização	67
Figura 34. Ordem dos vértices de um trapézio fuzzy tipo 2 intervalar	68
Figura 35. As oito constantes de um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal	70
Figura 36. Estrutura do sistema fuzzy	75
Figura 37. Exemplo de quadro para coleta de dados da variável lingüística <i>distancia-dec</i>	77
Figura 38. Conjuntos fuzzy <i>no-ponto</i> para <i>distancia-dec</i>	80
Figura 39. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>no-ponto</i> para <i>distancia-dec</i>	80
Figura 40. Conjuntos fuzzy <i>perto</i> para <i>distancia-dec</i>	80
Figura 41. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>perto</i> para <i>distancia-dec</i>	81
Figura 42. Conjuntos fuzzy <i>longe</i> para <i>distancia-dec</i>	81
Figura 43. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>longe</i> para <i>distancia-dec</i>	81
Figura 44. Conjuntos fuzzy <i>zero</i> para <i>velocidade-dec</i>	82

Figura 45. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>zero</i> para <i>velocidade-dec</i>	82
Figura 46. Conjuntos fuzzy <i>baixa</i> para <i>velocidade-dec</i>	82
Figura 47. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>baixa</i> para <i>velocidade-dec</i>	82
Figura 48. Conjuntos fuzzy <i>normal</i> para <i>velocidade-dec</i>	83
Figura 49. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>normal</i> para <i>velocidade-dec</i>	83
Figura 50. Conjuntos fuzzy <i>alta</i> para <i>velocidade-dec</i>	83
Figura 51. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>alta</i> para <i>velocidade-dec</i>	83
Figura 52. Conjuntos fuzzy <i>perto</i> para <i>distancia-aprox</i>	84
Figura 53. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>perto</i> para <i>distancia-aprox</i>	84
Figura 54. Conjuntos fuzzy <i>longe</i> para <i>distancia-aprox</i>	84
Figura 55. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>longe</i> para <i>distancia-aprox</i>	84
Figura 56. Conjuntos fuzzy <i>normal</i> para <i>velocidade-aprox</i>	85
Figura 57. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>normal</i> para <i>velocidade-aprox</i>	85
Figura 58. Conjuntos fuzzy <i>alta</i> para <i>velocidade-aprox</i>	85
Figura 59. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar <i>alta</i> para <i>velocidade-aprox</i>	85
Figura 60. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável <i>distancia-dec</i>	93
Figura 61. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável <i>velocidade-dec</i>	93
Figura 62. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável <i>distancia-aprox</i>	93
Figura 63. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável <i>velocidade-aprox</i>	93
Figura 64. Percentagem de concordância entre os modelos avaliados e os casos reais de tomada de decisão.....	95
Figura 65. Percentagem de concordância entre os modelos fuzzy (tipo 1 médio e tipo 2) e os casos reais de tomada de decisão.....	96
Figura 66. Análise de fluidez e precaução dos modelos fuzzy.....	97
Figura 67. Superfície de solução para <i>velocidade-dec</i> =0 KT e <i>velocidade-aprox</i> =120 KT. ...	99
Figura 68. Superfície de solução para <i>velocidade-dec</i> =0 KT e <i>velocidade-aprox</i> = 60 KT. ..	100
Figura 69. Superfície de solução para <i>velocidade-dec</i> =10 KT e <i>velocidade-aprox</i> =160 KT. 100	
Figura 70. Superfície de solução para <i>distancia-dec</i> =250 m e <i>distancia-aprox</i> =6,8 NM.....	101
Figura 71. Superfície de solução <i>distancia-aprox</i> =5,5NM e <i>velocidade-aprox</i> =162KT	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplo de formato de tabela de regras fuzzy.....	57
Tabela 2. Tabela de regras fuzzy.	66
Tabela 3. Variáveis lingüísticas do modelo proposto e seus termos lingüísticos.....	77
Tabela 4. Comparação entre métodos de inferência.....	79
Tabela 5. Constantes dos termos da variável <i>autorizacao</i>	86
Tabela 6. Correspondência entre a saída numérica do sistema e a autorização.	87
Tabela 7. Parâmetros dos conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares.	87
Tabela 8. Percentual de acerto para grupos de parâmetros diferentes da variável de saída.	89
Tabela 9. Caracterização de concordância, fluidez e precaução de modelos.	97
Tabela 10. Dados utilizados para a validação do modelo.	129
Tabela 11. Propriedades dos conjuntos fuzzy sobre os operadores das t-normas.	131
Tabela 12. Movimento dos aeródromos mais movimentados do país, triênio 2005 – 2007. .	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACC – *Area Control Center* – Centro de Controle de Área
APP – *Approach Control* – Controle de Aproximação
ARSR – *Air Route Surveillance Radar*
ASDE-X – *Airport Surface Detection Equipment – Model X*
ASR – *Airport Surveillance Radar*
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCI – Centre for Computational Intelligence
CTAS – *Center-Tracon Automation System*
CTR – Zona de Controle
DC – *Direct Current* – corrente contínua
DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo
FCFS – *First Come, First Served*
FCM – Fuzzy C-Means
FOU – *Footprint of Uncertainty*
FPGA – *Field Programmable Gate Array*
GPS – *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global
ICA – Instrução do Comando da Aeronáutica
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
KT – knots – nós (unidade de medida de velocidade)
LLWAS – *Low Level Wind Shear Alerting System*
MFLIPS – *Mega Fuzzy Inferences per Second* – Mega inferências fuzzy por segundo
NM – *Nautical Mile* – Milha Náutica
OACI – Organização de Aviação Civil Internacional
REC – *Radar Echo Classifier* – Classificador de Eco Radar
RVSM – *Reduced Vertical Separation Minimum* – Mínimo de Separação Vertical Reduzido
SISO – *Single Input, Single Output* – uma entrada, uma saída
STMS – *Saipher Tower Management System*
TARIS – Terminal Radar de Imagem Sintética
TCAS – *Traffic Alert and Collision Avoidance System*
TMA – *Terminal Area* – Área de Controle Terminal
TORA – *Translational Oscillation Rotational Actuator* – Atuador Rotacional com Oscilação de Translação
TSK – Takagi-Sugeno-Kang

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	função de pertinência
Σ	união lógica, para o universo de discurso discreto
\int	união lógica, para o universo de discurso contínuo
$+$	união lógica, quando usado entre funções de pertinência
$/$	separador, quando usado em representação de conjuntos fuzzy
$*$	t-norma genérica, quando usado entre graus ou funções de pertinência
\amalg	operador <i>join</i>
\vee	t-conorma genérica
\amalg	operador <i>meet</i>
\neg	operador <i>negation</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. JUSTIFICATIVAS.....	2
1.3. MOTIVAÇÃO	5
1.4. ESTRUTURA DO TEXTO.....	6
2. A LÓGICA FUZZY	7
2.1. A LÓGICA FUZZY TIPO 1	7
2.1.1. Conjuntos fuzzy.....	7
2.1.2. Operações sobre conjuntos fuzzy	10
2.1.3. Variáveis lingüísticas	12
2.1.4. Sistemas de inferência fuzzy	13
2.1.5. Aplicações da lógica fuzzy.....	15
2.2. A LÓGICA FUZZY TIPO 2	15
2.2.1. Conjuntos fuzzy tipo 2	16
2.2.2. Operações sobre conjuntos fuzzy tipo 2	19
2.2.3. Sistemas de inferência na lógica fuzzy tipo 2	21
2.3. SISTEMAS FUZZY TIPO 2 INTERVALARES.....	24
2.4. SISTEMAS FUZZY TIPO 2 SEGUNDO TAKAGI-SUGENO-KANG (TSK).....	26
2.5. TRABALHOS COM LÓGICA FUZZY TIPO 2	29
3. O CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO	39
3.1. HISTÓRICO.....	39
3.2. FERRAMENTAS PARA CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO	41
3.3. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	44
3.4. TRABALHOS RELACIONADOS	47
4. DESENVOLVIMENTO	51
4.1. ROTEIRO DA PESQUISA	51
4.2. METODOLOGIA.....	52
4.3. <i>FRAMEWORK</i>	61
4.3.1. <i>A arquitetura do framework</i>	61
4.3.2. <i>Funções do framework</i>	68
5. ESTUDO DE CASO.....	72
5.1. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	72
5.2. RESTRIÇÕES E HIPÓTESES PARA APLICAÇÃO DO MODELO	90
6. DISCUSSÃO DO MODELO E RESULTADOS OBTIDOS.....	92
6.1. MODELO E CONJUNTOS FUZZY TIPO 2	92
6.2. RESULTADOS OBTIDOS	94
6.3. SUPERFÍCIES DE SOLUÇÃO.....	98
7. CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICES.....	118
ANEXOS	131

1. Introdução

A lógica fuzzy tipo 2 foi apresentada em meados da década de 70 através dos trabalhos de Zadeh (1975) e posteriormente aprimorada por vários pesquisadores, com destaque para os trabalhos de Mizumoto e Tanaka (1976, 1981) e Karnik e Mendel (1998, 2000). A lógica fuzzy tipo 2 representa uma extensão da lógica fuzzy tradicional (usualmente denominada de lógica fuzzy tipo 1) ou mesmo uma segunda aproximação para a abordagem de incertezas inerentes ao mundo real (MENDEL, 2001).

A lógica fuzzy tipo 2 vem adquirindo cada vez mais atenção e reconhecimento sobretudo na modelagem de sistemas. Enquanto a lógica fuzzy tipo 1 pressupõe a necessidade de um conhecimento exato das funções de pertinência, em sistemas fuzzy tipo 2 esta premissa é conceitualmente questionada dando-se origem aos chamados conjuntos fuzzy tipo 2 que, em linhas gerais, oferecem a possibilidade de elevar a habilidade de tratamento lógico e sistemático para a baixa exatidão da informação. Neste sentido, pode-se destacar as seguintes situações bastante típicas que sugerem a abordagem ou modelagem a partir de sistemas de inferência fuzzy tipo 2 (MENDEL, 2001):

- Identificação de modelos fuzzy para predição de comportamento, utilizando dados ou informações com ruído;
- Regras obtidas através de informações geradas pelo especialista humano.

Neste sentido, a lógica fuzzy tipo 2 se aplica de forma eficaz em problemas de identificação de modelos ou sistemas de inferência balizados na informação humana ou que possuem esta como elemento fundamental para a sua construção.

Incetezas também estão presentes no cotidiano do ser humano, a exemplo em tomadas de decisões, onde termos incertos, imprecisos, ambíguos ou até contraditórios podem ser avaliados para originar uma decisão. O controle de tráfego aéreo é uma área onde tomadas de decisões ocorrem a todo instante, a fim de promover um movimento das aeronaves de modo seguro, ordenado e rápido. Neste trabalho, uma atividade de torre de controle foi escolhida como estudo de caso para a aplicação de um sistema fuzzy tipo 2.

Neste capítulo são apresentados os objetivos do trabalho, a justificativa do tema e os principais fatores de motivação. Explicações sobre o estudo de caso são introduzidas nesta seção e sua descrição completa é feita no capítulo 5.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a lógica fuzzy tipo 2, mostrando suas idiossincrasias, suas diferenças em relação à lógica fuzzy tradicional, quais trabalhos já foram desenvolvidos e em quais campos do conhecimento humano esta técnica vem sendo aplicada, assim como suas vantagens e desvantagens. Além disso, um estudo de caso é realizado para mostrar sua potencialidade em relação à tomada de decisões – uma das suas principais aplicações. Este estudo de caso compreende um aspecto específico do controle de tráfego aéreo tomando, como campo de testes, a torre de controle do Aeroporto Internacional Deputado Luís Eduardo Magalhães localizado em Salvador-BA. Uma metodologia para modelagem de sistemas fuzzy tipo 2 é desenvolvida para ser aplicada a este estudo de caso.

Como produto do trabalho, um *framework* é proposto e implementado a fim de possibilitar a aplicação da lógica fuzzy tipo 2 no problema abordado, uma vez que, até o momento, não existe nenhum produto comercial ou didático completo o suficiente que contemple esta modalidade da lógica fuzzy. Apesar da aplicação específica neste problema, o *framework* tem características genéricas o suficiente para ser aplicado em outros casos. Adicionalmente, ele também poderá vir a ser disponibilizado para uso e aprimoramento por outros pesquisadores.

Uma metodologia de modelagem de sistemas fuzzy tipo 2 será proposta e avaliada, utilizando várias técnicas como questionários, entrevistas, seleção de especialistas, criação de desenhos, tabela de decisão, entre outros, levando em consideração vários aspectos do controle de tráfego aéreo.

1.2. Justificativas

As pesquisas na área da lógica fuzzy tipo 2 têm aumentado muito nos últimos anos (JOHN; COUPLAND, 2007). Na Figura 1 pode ser vista a quantidade de publicações científicas realizadas nesta área desde o seu surgimento até o mês de dezembro de 2007 (JOHN; COUPLAND, 2007; TYPE2FUZZYLOGIC.ORG, 2008).

Assim como ocorre na maioria das novas técnicas e teorias, a lógica fuzzy tipo 2 passou por um período de latência nos primeiros anos de sua existência. Porém, com um aumento de pesquisadores na área e com primeiros resultados de sua eficácia, ela passou a ter cada vez mais adeptos e trabalhos científicos publicados (MENDEL, 2003b). Este crescimento vem acompanhado de uma importante característica desta abordagem: a diversidade de áreas do conhecimento humano perfeitamente suscetíveis à sua aplicabilidade.

Pode-se encontrar trabalhos na área da Engenharia (Elétrica, Eletrônica, Industrial, Mecatrônica, Espacial, etc.), da Ciência da Computação, da Medicina, da Biologia, da Economia, da Matemática, entre outras.

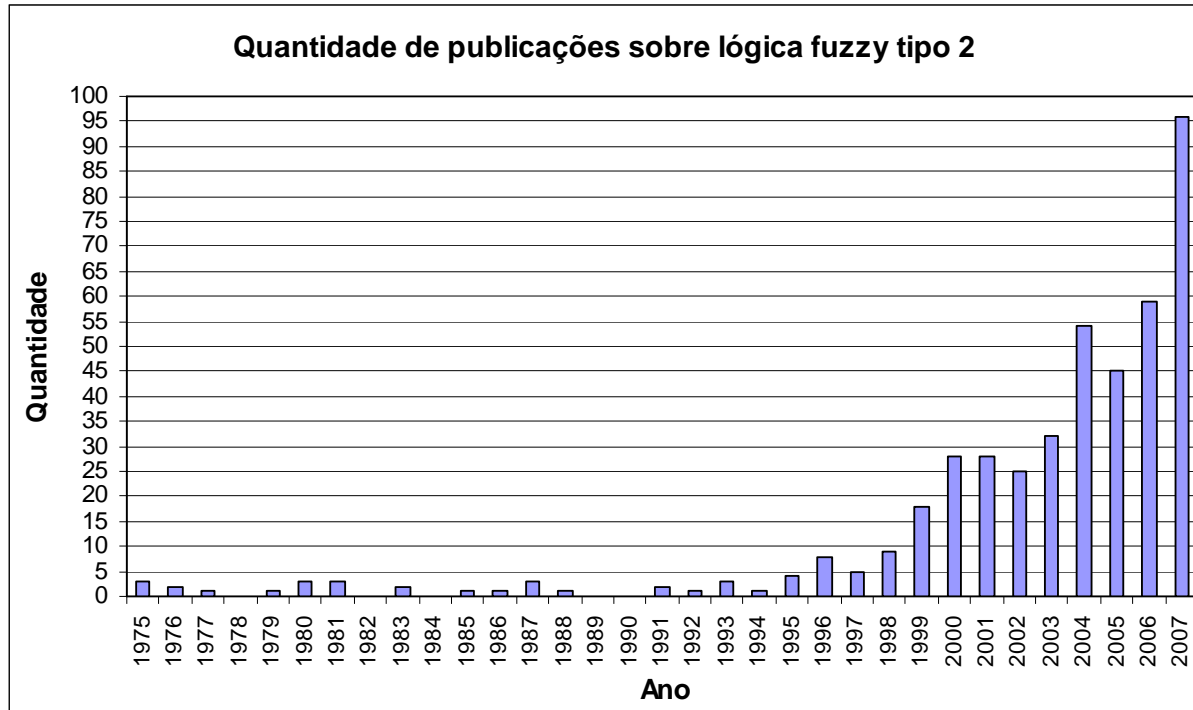


Figura 1. Número de publicações sobre lógica fuzzy tipo 2, de 1975 a 2007. Baseado em John e Coupland (2007) e TYPE2FUZZYLOGIC.ORG (2008).

Na modelagem de sistemas tradicionais, percebe-se que nem sempre os especialistas conseguem expressar-se corretamente a respeito dos conjuntos fuzzy antecedentes. O mesmo ocorre com os valores dos conseqüentes, onde, inclusive, pode-se chegar a definir valores ou termos lingüísticos diferentes para as mesmas regras. Além disso, ruídos nos conseqüentes e antecedentes podem refletir ruídos nas funções de pertinência (MENDEL, 2003b). Por tais tipos de incertezas a lógica fuzzy tipo 2 mostra-se aplicável na medida em que eleva a habilidade de se tratar a imprecisão da informação de uma maneira ainda mais criteriosa.

Outro tópico importante desta técnica está em seus resultados quando comparados aos métodos tradicionais para tratamento de incertezas. Em muitos trabalhos reportados na literatura, a lógica fuzzy tipo 2 consegue superar os problemas que a lógica fuzzy tradicional ou outra técnica não conseguiria resolver satisfatoriamente, representando assim, um caminho promissor para pesquisas tanto na área de criação de sistemas especialistas quanto na área de identificação de modelos e/ou construção de regras para apoio à tomada de decisão. Estas evidências podem ser verificadas em uma quantidade significativa de referências relativamente atuais, tais como: John et al. (2000), Rhee e Hwang (2001), Rhee e Hwang

(2002), Castillo e Melin (2003), Melin e Castillo (2003b), Ozen e Garibaldi (2003), Uncu et al. (2003), Wu e Mendel (2003), Doctor et al. (2004), Hagraas (2004a), Hagraas (2004b), Hwang e Rhee (2004), Kaur e Wilson (2004), Phokharatkul e Phaiboon (2004a), Singh et al. (2004), Tan e Lai (2004), Wu e Tan (2004a), Wu e Tan (2004b), Zeng e Liu (2004), Coupland e John (2005), Figueroa et al. (2005), Huarng e Yu (2005), Mencattini et al. (2005), Mendez et al. (2005), Niewiadomski (2005), Own et al. (2005), Sepúlveda et al. (2005), Shu e Liang (2005), Lee et al. (2006), Li et al. (2006), Medina e Mendez (2006), Pareek e Kar (2006), Qiu (2006), Tan (2006), Wan e Kamal (2006) e Zeng e Liu (2006).

Quanto ao estudo de caso proposto, o controle de tráfego aéreo foi escolhido porque representa um campo de atividades bastante rico em tomadas de decisões que envolvem termos imprecisos e, sobretudo, a interpretação e experiência do especialista humano. Para ilustrar, a seguir serão apresentados alguns destes termos.

– Uma autorização emitida por um controlador de tráfego aéreo a um piloto de helicóptero: “Taxie¹ a *baixa altura* sobre a pista”. O controlador de tráfego aéreo não informa a altura em que o helicóptero deve estar, no entanto o piloto consegue entender e cumprir tal instrução.

– Classificação de intensidade de turbulência: *leve, moderada, forte* ou *severa* (BRASIL, 2001). A classificação destes graus de turbulência está intimamente ligada à experiência e percepção dos pilotos.

– Grau de umidade da pista: *muito molhada, molhada, pouco molhada, úmida* ou *seca*. Esta é uma informação de grande importância para pilotos que estão por efetuar o pouso e, na prática, baseia-se na percepção visual do controlador de tráfego aéreo.

– Definição de *altocumulus*² (BRASIL, 2001, p. 33, grifo nosso):

[...] Apresentam-se frequentemente como um lençol de grande extensão composto de elementos, isolados ou não, dispostos com bastante regularidade. Às vezes seus elementos tomam a forma de rolos alongados e sensivelmente paralelos, que podem estar separados por canais de céu claro ou ainda apresentar pequenos orifícios arredondados dando à nuvem o aspecto de uma rede ou favo de mel [...].

Através destes exemplos pode-se verificar a predominância da imprecisão da informação no cotidiano do tráfego aéreo. Ela é percebida nas ações individuais e coletivas de tomadas de decisões. A todo instante os controladores de tráfego aéreo realizam computação com palavras que não possuem definições precisas, como por exemplo: “Se um *jatinho* estiver

¹ Movimento realizado por aeronaves sobre vias terrestres devidamente demarcadas em um aeródromo (BRASIL, 2006).

² Um dos tipos de nuvens (BRASIL, 2001).

próximo do ponto de espera³ e *veloz*, então ele pode decolar antes do pouso de um Boeing 737 que está *distante* da pista”.

Através de uma pesquisa de campo direcionada a controladores de tráfego aéreo de Salvador e Brasília foi verificado que eles não têm uma definição precisa de velocidade de aeronaves em táxi, mas eles sabem que a aeronave está *lenta* ou *rápida* pela experiência que possuem e em um contexto delimitado. Esta pesquisa é detalhada no capítulo 5. Os controladores de tráfego aéreo também não sabem precisar a distância que uma aeronave está de um ponto de espera, mas tomam decisões através das posições em que ela se encontra: se ela está *perto* ou *longe* do ponto de espera. É importante salientar que muitas decisões em controle de tráfego aéreo são tomadas baseadas nestas informações lingüísticas e na maioria dos casos são feitas de forma eficaz.

1.3. Motivação

O estudo e investigação da lógica fuzzy tipo 2 para este trabalho teve como motivações um interesse particular pela lógica fuzzy tradicional e, por conseguinte, a procura de algumas lacunas que estavam sem respostas referentes às incertezas inerentes aos conjuntos fuzzy. Neste sentido, há um paradoxo instigante levantado por Mendel (2003a, p. 38, tradução nossa):

(1) Um conjunto fuzzy A para um termo (palavra, frase) é uma função de pertinência do tipo 1 bem definida, uma vez que todos seus parâmetros são bem definidos, (2) palavras têm significados diferentes para pessoas diferentes, então são incertas, e conseqüentemente, (3) é uma contradição dizer que algo preciso possa modelar algo incerto.⁴

É um paradoxo dizer que sistemas fuzzy tipo 1 são fuzzy, pois fuzzy tem a conotação de incerteza e sistemas fuzzy tipo 1 são completamente determinados através das especificações das formas e dos parâmetros dos seus conjuntos fuzzy (MENDEL 2003a). A principal contribuição da abordagem fuzzy tipo 2 compreende a adoção de imprecisões (e conseqüente redução da incerteza) em toda a extensão da modelagem e, inclusive, na definição das próprias funções de pertinência e/ou parâmetros dos conseqüentes.

Outra motivação importante foi a possibilidade de dar continuidade a um trabalho iniciado na graduação, explorando a lógica fuzzy para auxílio à tomada de decisão no controle

³ Ponto mais próximo da pista que uma aeronave (que intenciona decolar) pode prosseguir em táxi, sem que interfira na segurança do pouso de outras aeronaves (que estão por pousar na mesma pista).

⁴ “(1) A fuzzy set A for a term (word, phrase) is a well-defined type-1 FS $\mu_A(x)$ ($x \in X$) that is totally certain once all of its parameters are specified, (2) words mean different things to different people, and so are uncertain, and therefore, (3) it is a contradiction to say that something certain can model something that is uncertain” (MENDEL, 2003a, p. 38).

de tráfego aéreo (LIMA; AMORIM, 2007). Neste trabalho, os controladores de tráfego aéreo tomam decisões sobre termos lingüísticos e a ação de controle também é do gênero lingüístico, toda a modelagem do sistema fuzzy foi feita sobre conjuntos fuzzy tradicionais. Porém, controladores de tráfego aéreo diferentes têm definições diferentes das mesmas variáveis lingüísticas utilizadas (conjuntos fuzzy com limites diferentes uns dos outros) e, mesmo assim, conseguem inferi-las e tomam decisões semelhantes. Assim, a lógica fuzzy tipo 2 apresenta uma potencialidade de adequação e de modelagem do estudo de caso proposto.

1.4. Estrutura do texto

Enquanto este primeiro capítulo abordou os objetivos deste trabalho, as justificativas de sua realização e as motivações, os capítulos seguintes estão estruturados da seguinte forma:

No segundo capítulo será apresentada uma abordagem geral da lógica fuzzy tipo 1 e tipo 2, destacando suas características, seu uso em sistemas fuzzy, suas aplicações, e a importância lógica fuzzy tipo 2 para a realização deste projeto.

No terceiro capítulo será abordado o serviço de controle de tráfego aéreo, sua origem, evolução e complexidades, enfocando especialmente a torre de controle de Salvador. Também será caracterizado o problema de pesquisa, com detalhes do cenário da tomada de decisão, alvo do estudo de caso.

No quarto capítulo será apresentado o desenvolvimento do trabalho. Será detalhado o roteiro da pesquisa e a metodologia de desenvolvimento de sistemas fuzzy tipo 2 aplicada ao cenário do problema. A criação de um *framework*, necessário para a criação do sistema fuzzy tipo 2, também será abordada através do esboço da sua arquitetura e do detalhamento de suas funções.

No capítulo quinto será descrito o estudo de caso proposto. Cada passo é detalhado, desde a criação de formulários, pesquisa de campo, modelagem, até a validação do sistema. Finalizando o capítulo será realizada uma discussão acerca das restrições que se aplicam ao sistema desenvolvido.

No sexto capítulo serão apresentadas discussões sobre os principais aspectos de modelagem do sistema e os resultados obtidos através de comparações com outros sistemas.

No sétimo e último capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas, juntamente com as dificuldades encontradas no desenvolvimento e também sugestões de trabalhos futuros.

2. A Lógica Fuzzy

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos da lógica fuzzy tradicional, como definição de conjuntos fuzzy, variáveis lingüísticas e sistemas fuzzy. Em seguida a lógica fuzzy tipo 2 é apresentada, juntamente com suas características e comparações com a lógica fuzzy tradicional. Também são detalhados alguns tipos de sistemas fuzzy tipo 2, como o intervalar e o Takagi-Sugeno-Kang (TSK). E para finalizar, alguns trabalhos relacionados com a lógica fuzzy tipo 2 são comentados.

2.1. A lógica fuzzy tipo 1

A lógica fuzzy tipo 1, ou lógica fuzzy tradicional – como chamado por Tan e Lai (2004) – é uma modalidade da lógica capaz de capturar informações vagas, imprecisas ou ambíguas – em geral inerentes à linguagem humana – e convertê-las para um formato numérico, para o processamento computacional (FERREIRA; PARANHOS, 2004; SHAW; SIMÕES, 1999). A lógica fuzzy também é conhecida como lógica nebulosa ou lógica difusa (SANDRI; CORREA, 1999).

Em meados da década de 60, o Prof. Lotfi Zadeh, da Universidade de Berkeley, observou que o processamento de informações fundamentado na lógica booleana era insuficiente ou incapaz de automatizar certas atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações que envolviam informações ambíguas ou imprecisas. Em 1965 o Prof. Lotfi Zadeh publicou o artigo *Fuzzy Sets*, conceituando os *conjuntos fuzzy* e criando os princípios dos *sistemas fuzzy* que poderiam resolver tais problemas (ZADEH, 1965). Zadeh é conhecido como “o pai da lógica fuzzy” (MENDEL, 1995).

2.1.1. Conjuntos fuzzy

Conjuntos fuzzy são conjuntos que não possuem limites claros e precisos. A pertinência de um elemento num conjunto fuzzy não é uma questão de afirmação ou negação, mas uma questão de grau (KLIR; YUAN, 1995), isto é, um elemento pode pertencer, não pertencer e pertencer parcialmente a um conjunto.

“Um conjunto fuzzy pode ser definido matematicamente associando a cada elemento um valor que representa seu grau de pertinência no conjunto fuzzy. Este grau corresponde a um valor para o qual aquele elemento é similar ou compatível com o conceito representado por aquele conjunto” (KLIR; YUAN, 1995, p. 04, tradução nossa).

Uma forma de se indicar essa pertinência é através de uma função de pertinência, que pode ser definida como função responsável por identificar a representatividade de elementos a seu(s) conjunto(s).

A função de pertinência de um elemento x sobre um conjunto fuzzy A é representada pela notação $\mu_A(x)$, definição mostrada em (1). O universo de discurso X é um conjunto que contém todos os possíveis valores que os elementos do domínio podem assumir para um dado problema (SHAW; SIMÕES, 1999).

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

Em (2) é dado um exemplo de uma função de pertinência composta por três partes, considerando-se o universo de discurso o intervalo contínuo $[0, 5]$. Na Figura 2 é mostrada a representação gráfica deste conjunto, que se apresenta na forma triangular.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} x-1 & \text{se } x \in [1,2] \\ 3-x & \text{se } x \in [2,3] \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

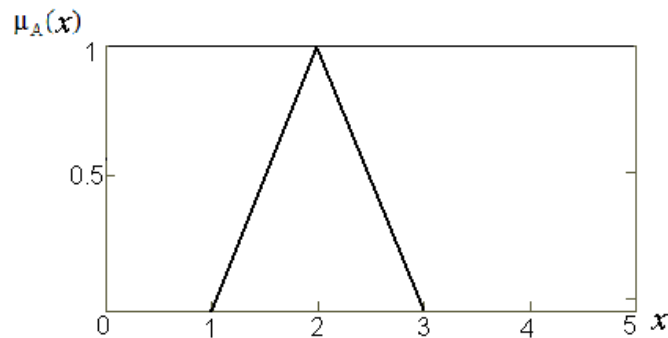


Figura 2. Conjunto fuzzy tipo 1 triangular

A pertinência $\mu_A(x)$ de um elemento x pode assumir qualquer valor do intervalo $[0,1]$. O valor 0 (zero) significa que o elemento não é membro do conjunto, 1 (um) significa que ele pertence completamente e um valor real entre 0 e 1 significa que este elemento possui pertinência parcial no conjunto (SHAW; SIMÕES, 1999). Cada um desses valores é chamado de grau de pertinência.

Podemos considerar que os conjuntos clássicos são um caso particular dos conjuntos fuzzy no qual o grau de pertinência de seus elementos só podem assumir os valores 0 ou 1 (KLIR; YUAN, 1995) (Figura 3).

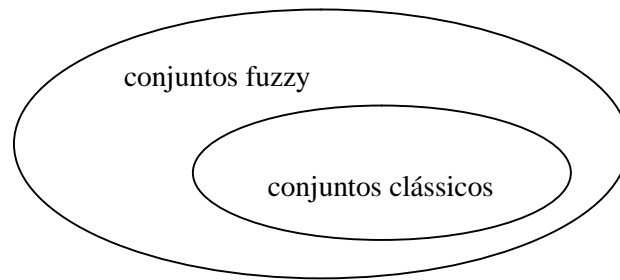


Figura 3. Relação entre as teorias dos conjuntos clássicos e fuzzy

Kasabov (1998) define três maneiras de representar um conjunto fuzzy: através de um conjunto de pares ordenados, através da união lógica de seus elementos e através de formas geométricas.

Considerando X o universo de discurso, o conjunto fuzzy A pode ser definido como um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (3)$$

A representação por união dos elementos para o universo de discurso discreto é dada por:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (4)$$

E se for contínuo:

$$A = \int_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (5)$$

Os símbolos Σ , $+$ e \int representam os operadores de união lógica ao invés de somatório, soma aritmética e integração. A barra (/) é utilizada apenas como um separador (KASABOV, 1998).

As funções de pertinência podem ser representadas por formas geométricas, as principais são: triangular, trapezoidal e gaussiana, mostradas na Figura 4, onde as letras a , b , c e d marcam pontos chaves para a implementação destas funções de pertinência. Para o formato gaussiano, os parâmetros mais importantes são a média e o desvio padrão.

O formato da função de pertinência deve estar associado à natureza dos dados da variável representada. Ou seja, a modelagem deve se aproximar do comportamento das variáveis fuzzy consideradas (COX, 1994).

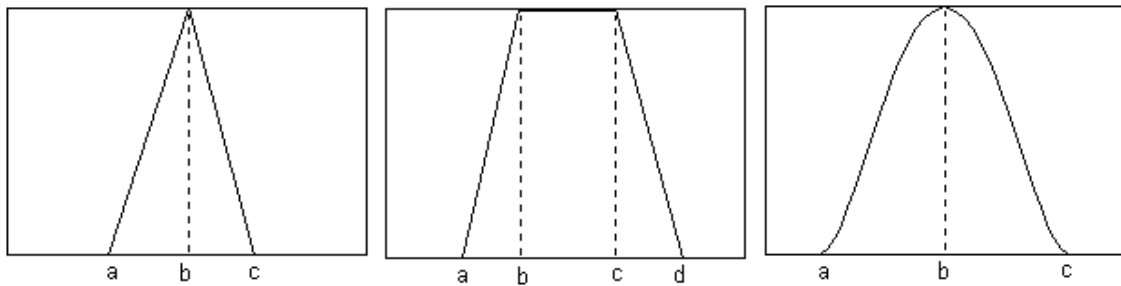


Figura 4. Principais formatos dos conjuntos fuzzy: triangular, trapezoidal e gaussiano

2.1.2. Operações sobre conjuntos fuzzy

Considere os conjuntos fuzzy A e B não-interpolados e interpolados, respectivamente, apresentados na Figura 5.

Na teoria dos conjuntos clássicos, a interseção de dois conjuntos contém os elementos que são comuns nos dois conjuntos. Na lógica fuzzy, um dos operadores de interseção mais utilizados compreende o operador *mínimo* e, desta forma, o conjunto interseção é gerado tomando-se os mínimos graus de pertinência dos conjuntos fuzzy envolvidos – área escura da Figura 6 (COX, 1994).

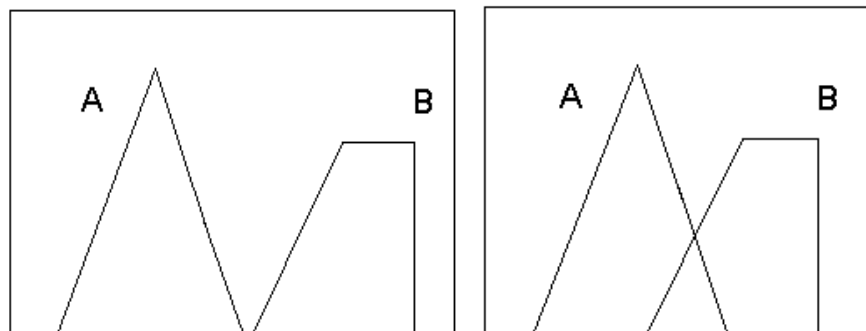


Figura 5. Conjuntos fuzzy A e B não interpolados e interpolados, respectivamente

A interseção de conjuntos fuzzy pode ser definida da seguinte forma:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6)$$

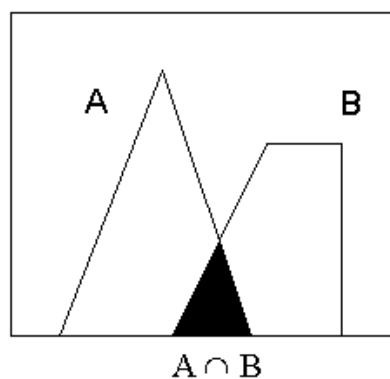


Figura 6. Interseção dos conjuntos fuzzy A e B

Na teoria dos conjuntos clássicos, união é o conjunto que contém os elementos em comum dos conjuntos envolvidos. Na lógica fuzzy, um dos operadores de intersecção mais utilizados compreende o operador *máximo* e, desta forma, o conjunto intersecção é gerado a partir dos máximos graus de pertinência entre os conjuntos fuzzy envolvidos – área escura da Figura 7 (COX, 1994).

Analogamente, a união de conjuntos fuzzy pode ser definida como segue:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (7)$$

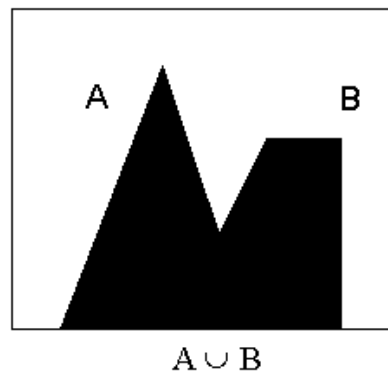


Figura 7. União dos conjuntos fuzzy A e B

O conjunto complemento de um conjunto A contém todos os elementos que não estão contidos em A, em relação ao universo de discurso (COX, 1994). Considere um conjunto fuzzy A como sendo toda a área escura da Figura 8(a). Na Figura 8(b) é mostrado A' como o conjunto complemento de A e é representado por toda área escura desta figura.

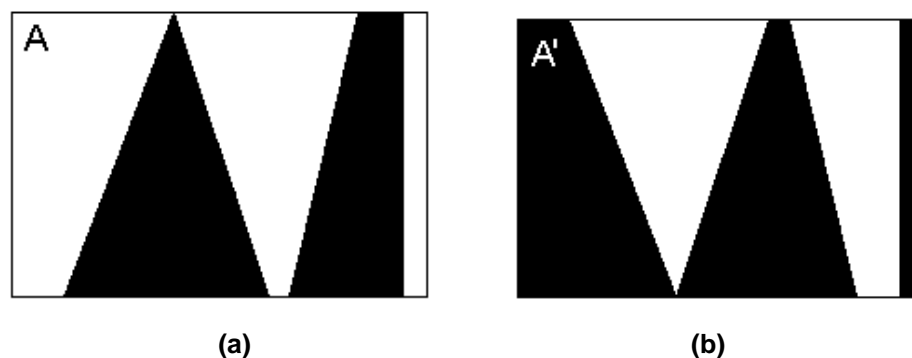


Figura 8. Conjunto fuzzy A e seu conjunto complemento A', respectivamente

O complemento de conjuntos fuzzy é definido da seguinte forma:

$$\mu'_{A}(x) = 1 - \mu_{A}(x) \quad (8)$$

2.1.3. Variáveis lingüísticas

“Uma variável lingüística é uma variável cujos valores são palavras ou sentenças na forma de linguagens naturais” (SILVA, 2001, p. 66). As variáveis lingüísticas são usadas para representar a semântica de seus conjuntos.

Cada variável lingüística – ou variável fuzzy, comumente conhecida – é caracterizada pela quintupla (v, T, X, g, m) , onde v é o nome da variável, T é o conjunto de termos lingüísticos de v que se referem à variável cujos valores estão num intervalo do conjunto universo X , g é a regra sintática (uma gramática) para geração de termos lingüísticos e m a regra semântica que associa para cada termo lingüístico $t \in T$ ao seu significado (KLIR; YUAN, 1995).

As variáveis lingüísticas são compostas por termos lingüísticos – que representam conjuntos fuzzy. Por exemplo, a variável lingüística *temperatura* pode ser composta pelos termos fuzzy *muito quente*, *quente*, *morno*, *frio* e *muito frio*, o termo lingüístico *quente* comporta elementos que possuem algum grau de pertinência associado a esta semântica, e assim se faz também com os outros termos.

Para ilustrar, considere a Figura 9 representando o estudo da velocidade de um carro esportivo em uma rodovia brasileira. O eixo horizontal representa a velocidade do carro expressa em Km/h e o eixo vertical representa o grau de pertinência que pode ser atribuído a cada valor de velocidade do universo de discurso $[0, 140]$.

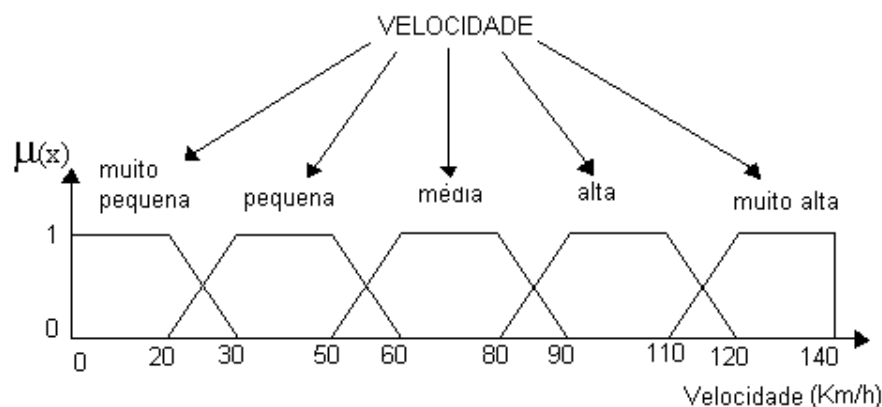


Figura 9. Variável lingüística velocidade

A velocidade é a variável lingüística e pode comportar os termos lingüísticos: *muito pequena*, *pequena*, *média*, *alta* e *muito alta*. Estes termos podem variar em quantidade e em valores, a critério do especialista que modela o sistema. Os termos lingüísticos expressam a sensação atribuída a certos valores de velocidade. *Alta*, por exemplo, possui significância máxima quando a velocidade está entre 90 e 110 Km/h, porém, valores de 80 a 90 Km/h também passam algum valor semântico para *alta* e isso se faz de modo gradativo e é medido

através da função de pertinência para *alta*. Valores entre 110 e 120 Km/h também expressam velocidade alta, mas em graus menores, pois à medida que a velocidade cresce e deixa de ser *alta*, ela passa a ser *muito alta*.

2.1.4. Sistemas de inferência fuzzy

Sistemas fuzzy são sistemas especialistas compostos de: entrada de dados numéricos, método de fuzzificação, regras fuzzy, inferência fuzzy, método de defuzzificação e saída numérica (KASABOV, 1998). Na Figura 10 são mostrados estes componentes.

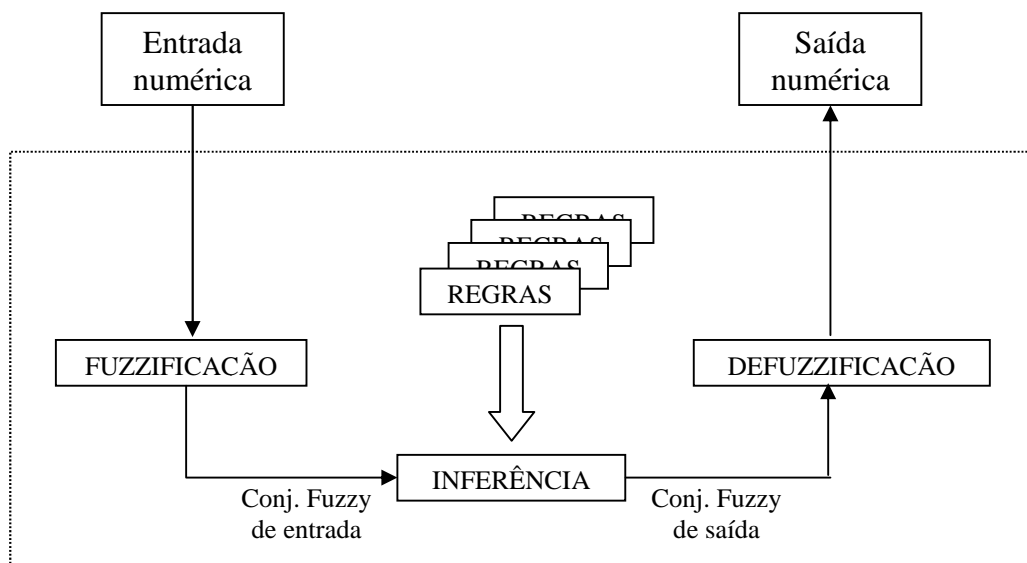


Figura 10. Esquema de sistemas fuzzy (MENDEL, 1995, p. 347)

Klir e Yuan (1995) definem que sistema fuzzy, em geral, é qualquer sistema cujas variáveis, ou pelo menos uma delas, se classificam na forma de conjuntos fuzzy.

Entradas e saídas numéricas

As entradas são valores numéricos que serão traduzidos em termos lingüísticos para serem usados no processo de inferência. A saída é um resultado numérico originado da inferência das regras sobre as entradas.

Regras fuzzy

Regras fuzzy representam habilidades e conhecimento individual ou de senso comum (KASABOV, 1998) e, portanto, representam a estrutura de modelo fuzzy propriamente dito. Elas são utilizadas na inferência para mapear o conjunto de entradas fuzzy para um conjunto de saídas fuzzy (MENDEL, 1995). Essas regras são combinadas entre si através de conectivos lógicos como *AND* e *OR*.

As regras fuzzy são regras condicionais expressas em sentenças do tipo SE-ENTÃO, por isso são também chamadas de declarações condicionais fuzzy e possuem o formato:

$$\text{SE (proposição fuzzy) ENTÃO (proposição fuzzy)} \quad (9)$$

A proposição fuzzy que faz parte da condição da regra é chamada de antecedente, e a proposição que faz parte da conclusão é chamada de conseqüente (SILVA, 2001).

Mecanismo de inferência

O mecanismo de inferência define a maneira de como as regras são combinadas (MENDEL, 1995), provendo uma base para tomada de decisões. Os mais utilizados pela engenharia são o *mínimo* e o *produto* (MENDEL, 2001).

Fuzzificação e defuzzificação

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais para o domínio fuzzy. Este processo atribui valores lingüísticos, definidos por funções de pertinência associadas às variáveis de entrada (SHAW; SIMÕES, 1999). A defuzzificação é a operação inversa da fuzzificação, fornece um valor final real obtido pela inferência das regras fuzzy sobre os conjuntos fuzzy de entrada. Os principais métodos de defuzzificação são: Centro-Da-Área, Centro-Do-Máximo e Média-Do-Máximo (SHAW; SIMÕES, 1999).

Modelos de sistemas fuzzy

Antes de criar um sistema fuzzy é necessário identificar qual o modelo mais apropriado para o sistema, os mais conhecidos são o de MAMDANI e o de SUGENO (MENDEL, 1995).

– **MAMDANI** – Foi um dos primeiros modelos, proposto em 1975 por Ebrahim Mamdani. Seus esforços foram baseados nas publicações de 1973 de Lotfi Zadeh sobre algoritmos fuzzy para sistemas complexos e processos de decisão (THE MATHWORKS INC, 1999).

– **SUGENO ou TAKAGI-SUGENO-KANG ou TSK** – é similar ao método de Mamdani em vários aspectos, porém a diferença reside na descrição dos conseqüentes de cada regra que, diferentemente da abordagem proposta por Mamdani, compreende modelos paramétricos lineares, onde a saída é determinada diretamente pelos valores reais das entradas, não existindo, portanto, conjuntos fuzzy para a variável de saída. A abordagem TSK pode ser usada para modelar qualquer sistema de inferência cujas funções de pertinência de saída sejam lineares ou constantes (THE MATHWORKS INC, 1999).

2.1.5. Aplicações da lógica fuzzy

A lógica fuzzy permite obter maior generalidade em representar sistemas que lidam com incertezas, maior poder de expressão, habilidade de modelar problemas complexos, modelar o conhecimento de sistemas especialistas, manipular incertezas e reduzir complexidades de problemas (KLIR; YUAN, 1995; COX, 1994).

Devido às suas propriedades, a lógica fuzzy tem encontrado aplicações nas áreas de sistemas especialistas, computação com palavras, raciocínio aproximado, linguagem natural, controle de processos, robótica, modelagem de sistemas parcialmente abertos, reconhecimento de padrões, processos de tomada de decisão (*decision making*), entre outros (FERREIRA; PARANHOS, 2004).

Em desenvolvimento de produtos, a lógica fuzzy é usada em controladores para automação (KLIR; YUAN, 1995), como em câmeras de vídeo, forno de microondas, máquina de lavar, controle de locomotivas, aparelhos de ar-condicionado, câmbio automático adaptativos para carros (SHAW; SIMÕES, 1999), entre outras.

A Engenharia também é uma área de grande aplicabilidade da lógica fuzzy, como a Elétrica, Civil, Mecânica, Química, Nuclear, Agrícola e Computação (KLIR; YUAN, 1995). A lógica fuzzy também é utilizada na Medicina, Física, Matemática, Biologia, Ecologia, Geologia, Meteorologia, Ciências Políticas entre outras áreas.

A lógica fuzzy também é utilizada na área da computação, como exemplo, no gerenciamento de redes de computadores, em sistemas especialistas, nos jogos e na robótica. A lógica fuzzy pode ainda ser associada a diversas técnicas, compondo sistemas híbridos⁵, a fim de produzir resultados mais eficientes (KASABOV, 1998).

2.2. A lógica fuzzy tipo 2

A lógica fuzzy tipo 2 foi introduzida por Lotfi Zadeh em 1975 como uma extensão da lógica fuzzy tradicional (ZADEH, 1975), e posteriormente aprimorada por vários pesquisadores que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento de operações, fórmulas ou algoritmos de elementos dos sistemas que utilizam a lógica fuzzy tipo 2. Dentre os mais relevantes pode-se citar os trabalhos de Mizumoto e Tanaka (1976, 1981), Nieminen (1977), Dubois e Prade (1978, 1979, 1980), Hisdal (1981) e Karnik e Mendel (1998, 2000). Seu surgimento está relacionado com a incapacidade da lógica fuzzy tradicional em modelar

⁵ Integração de diferentes métodos da engenharia do conhecimento com a finalidade de obter uma solução melhor para um dado problema, quando comparado com uma técnica isolada para resolver o mesmo problema (KASABOV, 1998, p. 421).

por completo a incerteza inerente à informação (MENDEL 2003a). A principal questão observada foi: “Como um conjunto fuzzy, que denota incerteza, poderia ser definido por limites fixos e exatos?” A solução consiste em definir limites que também são incertos.

O maior desafio para a construção da teoria da lógica fuzzy tipo 2 foi a definição de um novo conjunto fuzzy, denominados de conjunto fuzzy tipo 2, e, em consequência, o desenvolvimento das operações associadas a estes novos conjuntos destacando-se intersecção, união e redução de tipo (MENDEL, 2001).

2.2.1. Conjuntos fuzzy tipo 2

Conjuntos fuzzy são os principais elementos da lógica fuzzy em geral. Um conjunto fuzzy \tilde{A} , do tipo 2, no universo de discurso X é tal que o grau de pertinência de $x \in X$ em \tilde{A} é $\mu_{\tilde{A}}(x)$ que é um conjunto fuzzy tipo 1 com domínio $[0, 1]$. Os elementos do domínio de $\mu_{\tilde{A}}(x)$ são chamados de pertinências primárias de x em \tilde{A} . Os graus de pertinência dos graus de pertinência primários em $\mu_{\tilde{A}}(x)$ são chamados de pertinências secundárias de x em \tilde{A} , que compõem a função de pertinência secundária. Ou seja, em um conjunto fuzzy tipo 2, um elemento do seu domínio não possui um único valor como pertinência e sim está associado a uma outra função de pertinência (KARNIK; MENDEL, 1998). Na Figura 11(a) pode ser visto um conjunto fuzzy tipo 2 com função de pertinência primária gaussiana e cujo universo de discurso é $[0; 6]$. Na Figura 11(b) é mostrada a função de pertinência secundária gaussiana para $x = 4$. Desta forma, verifica-se que o grau de pertinência para $x = 4$ não é um único valor, e sim um conjunto fuzzy tipo 1 gaussiano com universo de discurso $[0; 1]$. Isto significa que para $x = 4$, existem graus de pertinência mais significativos – como 0,6 – e menos significativos – como 0,4 ou 0,8 por exemplo.

Representar um conjunto fuzzy tipo 2 não é tão fácil como representar um conjunto fuzzy tipo 1 uma vez que as incertezas agregadas pelos conjuntos fuzzy tipo 2 acrescentam uma dimensão, gerando-se assim um conjunto tridimensional (MENDEL, 2001). Para representá-los bidimensionalmente, utiliza-se o *footprint of uncertainty* (FOU), que representa a incerteza dos limites dos conjuntos fuzzy tipo 2 através de uma área hachurada ou desfocada em torno da curva que representa a função de pertinência principal (conjunto de pertinências primárias cujas pertinências secundárias possuem valor unitário – linha mais escura da gaussiana da Figura 11a).

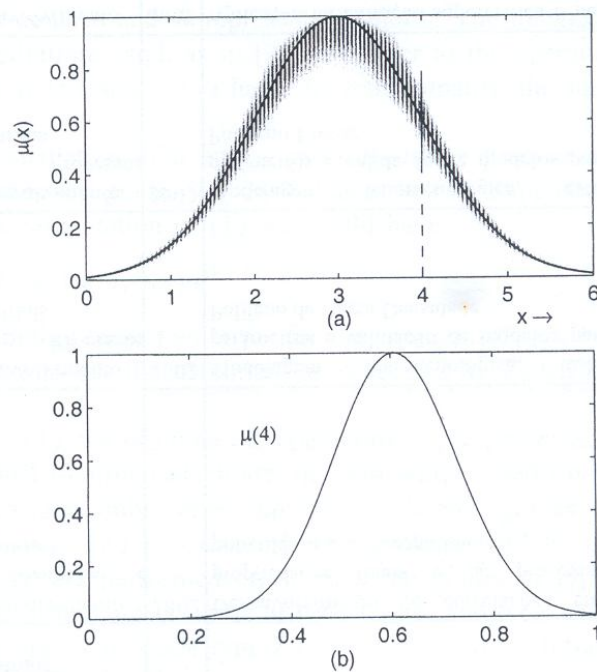


Figura 11. Conjunto fuzzy tipo 2 gaussiano. (a) – Função de pertinência primária. (b) – Função de pertinência secundária para $x = 4$ (Fonte: MENDEL, 2001, p. 86).

Conjuntos fuzzy tipo 2 podem ser usados em situações onde existe incerteza a respeito dos graus de pertinência, do formato ou em algum dos parâmetros das funções de pertinência (KARNIK; MENDEL, 1998). Existem ordens maiores que 2 para conjuntos fuzzy, porém, quanto maior a ordem, maior a complexidade do sistema (KARNIK; MENDEL, 1998; KARNIK et al., 1999; MENDEL, 2001). Por isso, na maioria dos trabalhos relacionados com incertezas sobre conjuntos, a ordem 2 mostra-se satisfatória. Na Figura 12 é apresentada a estrutura hierárquica dos conjuntos.

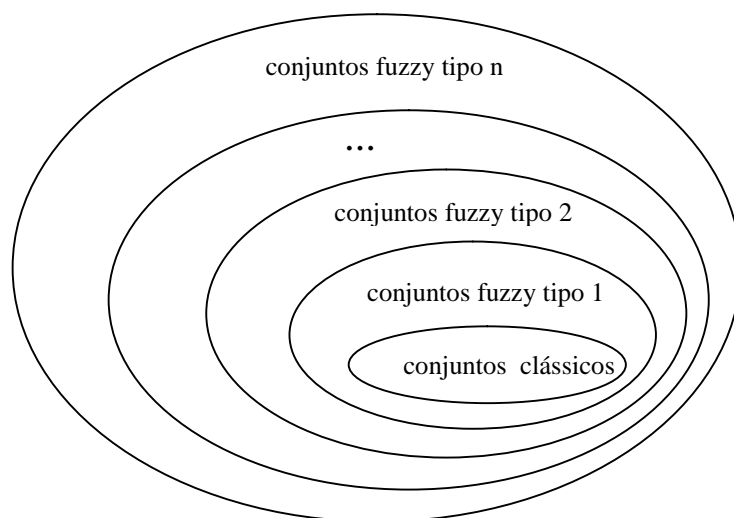


Figura 12. Hierarquia das teorias dos conjuntos

Quanto à representação da função de pertinência de um conjunto tipo 2, a função secundária é dada por:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = f_x(u_1)/u_1 + f_x(u_2)/u_2 + \dots + f_x(u_m)/u_m \quad (10)$$

ou

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_i f_x(u_i)/u_i \quad \text{onde } u_i \in J_x \subset [0,1] \quad (11)$$

Onde J_x representa o domínio da função de pertinência primária e u_i é cada elemento de J_x . Desta forma, o conjunto fuzzy tipo 2 é a união de todos os conjuntos secundários:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x)/x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} f_x(u)/u \right] / x \quad J_x \subset [0,1] \quad (12)$$

Onde J_x é pertinência primária de x .

Uma forma mais simplificada de representar é mostrada na equação (13), onde os sinais de integral, assim como na equação anterior, representam a união lógica de todos os x e u admissíveis, sendo x e u variáveis dos universos contínuos X e J_x , respectivamente.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x,u)/(x,u) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (13)$$

Para o caso discreto (N pontos em X e M_i valores de pertinência primárias em J_x), o conjunto do tipo 2 pode ser representado conforme segue, onde i varre o universo de discurso X e k varre o universo de discurso J_x . Os somatórios correspondem a união lógica entre os elementos de X e seus graus de pertinência.

$$\begin{aligned} \tilde{A} = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} f_x(u)/u \right] / x &= \sum_{i=1}^N \left[\sum_{k=1}^{M_i} f_{x_i}(u_{ik})/u_{ik} \right] / x_i = \left[\sum_{k=1}^{M_1} f_{x_1}(u_{1k})/u_{1k} \right] / x_1 + \\ &\left[\sum_{k=1}^{M_2} f_{x_2}(u_{2k})/u_{2k} \right] / x_2 + \dots + \left[\sum_{k=1}^{M_N} f_{x_N}(u_{Nk})/u_{Nk} \right] / x_N \end{aligned} \quad (14)$$

ou, simplesmente:

$$\tilde{A} = \sum_{x \in X} \sum_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x,u)/(x,u) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (15)$$

Um outro meio de representar conjuntos fuzzy tipo 2 é através da forma geométrica da sua função de pertinência. Nas Figuras 13 e 14 é apresentado um mesmo conjunto fuzzy tipo 2. Na primeira ele é representado em duas dimensões, cuja área cinza representa a incerteza

dos limites do conjunto, o seu FOU. Na Figura 14 pode ser observado o recurso da terceira dimensão para possibilitar a representação da incerteza (eixo vertical), a área cinza representa seu o FOU.

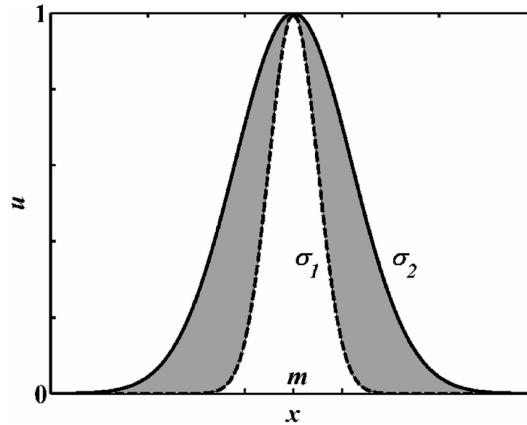


Figura 13. Conj. fuzzy tipo 2 representado em duas dimensões (Fonte: AGÜERO; VARGAS, 2007).

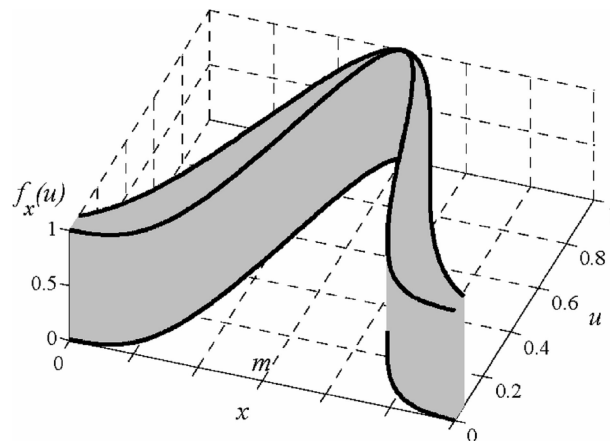


Figura 14. Conj. fuzzy tipo 2 representado em três dimensões (Fonte: AGÜERO; VARGAS, 2007).

O nome usado para descrever o conjunto está associado ao nome da função de pertinência secundária. Portanto, se a função de pertinência primária de \tilde{A} é um trapézio e sua função de pertinência secundária é gaussiana, então \tilde{A} é um conjunto fuzzy tipo 2 gaussiano (MENDEL, 2001; LIANG et al., 2000).

2.2.2. Operações sobre conjuntos fuzzy tipo 2

Efetuar operação em conjuntos do tipo 2 implica em operar as suas respectivas funções de pertinência secundárias (conjuntos do tipo 1). Uma operação entre dois ou mais conjuntos fuzzy tipo 1, e não simplesmente uma operação entre os respectivos graus de pertinência (como é feito na lógica fuzzy tipo 1), fornece um outro conjunto fuzzy tipo 1 e pode ser generalizada através do princípio da extensão (MENDEL, 2001):

$$f(A_1, \dots, A_r) = \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_r \in X_r} \mu_{A_1}(x_1) * \dots * \mu_{A_r}(x_r) / f(x_1, x_2, \dots, x_r) \quad (16)$$

Onde A_1, \dots, A_r são conjuntos fuzzy tipo 1, $f(A_1, \dots, A_r)$ é a nova função estendida, $*$ é uma t-norma⁶, $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ é a função que deu origem à extensão. $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ e $\mu_{A_1}(x_1) * \dots * \mu_{A_r}(x_r)$ devem ser calculados primeiramente, $\forall x_1 \in X_1, \dots, \forall x_r \in X_r$.

As principais operações sobre conjuntos fuzzy tipo 2 são a união, a intersecção e a negação (KARNIK; MENDEL, 1998). Para exemplificar, na Figura 15(a) são representados dois conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2, \tilde{A} e \tilde{N} , na Figura 15(b) é mostrado a união destes conjuntos e na Figura 15(c) a intersecção.

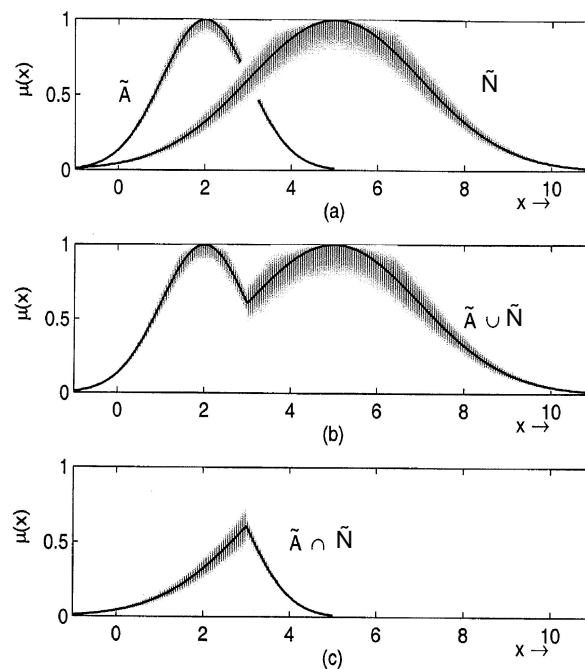


Figura 15. Conjuntos fuzzy tipo 2 e operações. (a) Conjuntos fuzzy participantes. (b) União dos conjuntos e (c) Intersecção dos conjuntos. Baseado em Karnik e Mendel (2000, p. 332).

Considere \tilde{A} e \tilde{N} conjuntos fuzzy tipo 2, em um universo de discurso X . $\mu_{\tilde{A}}(x)$ e $\mu_{\tilde{N}}(x)$ são graus de pertinência (conjuntos fuzzy tipo 1 no domínio $[0, 1]$) de x para cada conjunto \tilde{A} e \tilde{N} respectivamente. Desta forma, as funções de pertinência secundárias podem ser representadas pelas equações (17) e (18).

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in J_x^u} f_x(u)/u \quad J_x^u \subset [0,1] \quad (17)$$

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \int_{w \in J_x^w} g_x(w)/w \quad J_x^w \subset [0,1] \quad (18)$$

⁶ Conjunto de operadores de intersecção para conjuntos fuzzy. Ex: mínimo e produto algébrico (Mendel, 2001).

Onde $u, w \in [0, 1]$ são as pertinências primárias e $f_x(u)$ e $g_x(w)$ são as pertinências secundárias.

Com base no princípio da extensão (equação 16), os graus de pertinência para união, intersecção e negação (ou complemento) para os conjuntos \tilde{A} e \tilde{N} podem ser definidos respectivamente como (KARNIK; MENDEL, 2000):

$$\tilde{A} \cup \tilde{N} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{N}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \amalg \mu_{\tilde{N}}(x) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} (f_x(u) * g_x(w)) / (u \vee w) \quad (19)$$

$$\tilde{A} \cap \tilde{N} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{N}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcap \mu_{\tilde{N}}(x) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} (f_x(u) * g_x(w)) / (u * w) \quad (20)$$

$$\overline{\tilde{A}} = \int_{x \in X} \mu_{\overline{\tilde{A}}}(x) / x \quad (21)$$

onde

$$\mu_{\overline{\tilde{A}}}(x) = \int_{u \in J_x^u} f_x(u) / (1 - u) = \neg \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (22)$$

\vee representa uma t-conorma⁷ (máximo) e $*$ representa uma t-norma (mínimo ou produto). O símbolo de integração representa a união lógica. As operações \amalg , \sqcap e \neg são respectivamente junção (*join*), encontro (*meet*) e negação (*negation*). Para o caso discreto, o símbolo de integral (\int) nas equações de 19 a 22 é substituído pelo símbolo de somatório (Σ).

As propriedades dos conjuntos fuzzy podem ser consultadas no Anexo 1. Estas propriedades se referem apenas às t-normas *mínimo* e *produto*, que são as mais usadas em aplicações na engenharia (MENDEL, 2001). *Tipo 1* e *tipo 2* representam a ordem da lógica fuzzy, *sim* e *não* indicam se aquela propriedade é satisfeita ou não para o item correspondente. Para as regras da lógica fuzzy tipo 2, os símbolos \vee , $*$ e \leq são substituídos por \amalg , \sqcap e \subseteq , respectivamente.

2.2.3. Sistemas de inferência na lógica fuzzy tipo 2

Uma das grandes aplicações da lógica fuzzy tipo 2 está na modelagem de sistemas especialistas. A lógica fuzzy tipo 2 oferece a mesma estrutura de regras da lógica fuzzy tipo 1 (equação 9). As regras permanecem as mesmas para os sistemas fuzzy tipo 1 e tipo 2 (KARNIK et al., 1999). A principal diferença entre os dois sistemas é que alguns (pelo menos um) ou todos os conjuntos envolvidos são do tipo 2 (KARNIK et al., 1999). Se as incertezas referentes à definição dos conjuntos de um sistema fuzzy tipo 2 desaparecerem, o sistema de

⁷ Conjunto de operadores de união para conjuntos fuzzy. Ex: máximo e soma algébrica (MENDEL, 2001).

inferência fica igual ao sistema fuzzy tipo 1 (MENDEL 2001). Ou seja, a discussão entre sistemas fuzzy tipo 1 e tipo 2 está associada à natureza das funções de pertinência e não às regras.

Na Figura 16 é apresentada a estrutura geral de um sistema fuzzy tipo 2 segundo Mamdani, ou seja, onde os conseqüentes contemplam genericamente conjuntos do tipo 2. Tais sistemas são aplicáveis em circunstâncias em que há dificuldade de se determinar uma função de pertinência exata para cada conjunto fuzzy do sistema, portanto, adequado em lidar com incertezas. Também são aplicáveis em situações em que os dados de entrada possuem incertezas relacionadas a ruídos (KARNIK; MENDEL, 1998).

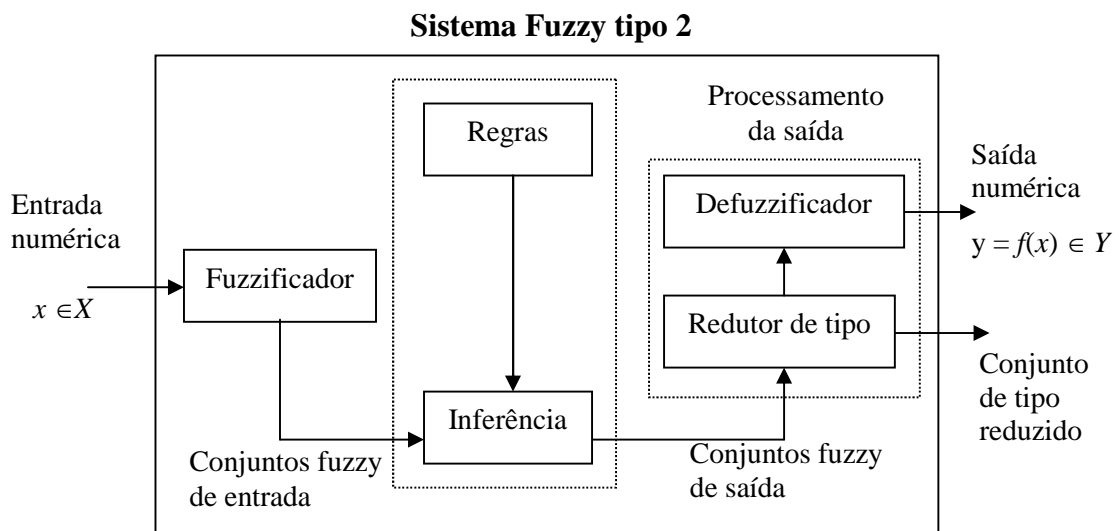


Figura 16. Estrutura de inferência de modelo fuzzy tipo 2. Baseado em Mendel (2001, p. 288)

A principal diferença entre a estrutura de sistemas fuzzy tipo 1 e tipo 2 está em uma parte do processamento da saída, mais precisamente no redutor de tipo, presente no tipo 2 (MENDEL, 2001). Nas seções seguintes será descrito cada um dos elementos do sistema e sua comparação entre os dois tipos.

Há vários modelos de sistemas fuzzy, como o Mamdani, o Takagi-Sugeno-Kang (TSK), o Larsen e o Tsukamoto (SANDRI; CORREA, 1999), porém os mais populares são o Mamdani e o TSK. Da mesma forma que na abordagem do tipo 1, ambos são caracterizados por usarem regras SE-ENTÃO e por possuírem a mesma estrutura nos antecedentes. A diferença entre eles é que, como na abordagem do tipo 1, o modelo de *Mamdani* possui conjuntos fuzzy nos conseqüentes (genericamente do tipo 2), enquanto que no modelo *TSK*, os conseqüentes são modelos paramétricos em função das entradas (MENDEL, 2001) cujos parâmetros genericamente são representados por conjuntos do tipo 1.

O fuzzificador dos sistemas fuzzy tipo 1 transforma a entrada numérica de natureza precisa em um dado valor de pertinência. Para o tipo 2, o fuzzificador transforma a entrada numérica em um conjunto fuzzy tipo 1.

De uma forma geral, uma regra genérica em um sistema de inferência fuzzy tipo 2 possui a seguinte representação:

$$R^L : \text{SE } x_1 \text{ é } \tilde{F}_1^L \text{ e } \dots \text{ e } x_p \text{ é } \tilde{F}_p^L, \text{ ENTÃO } y \text{ é } \tilde{G}^L \quad L = 1, \dots, M \quad (23)$$

Onde, x_i são entradas, \tilde{F}_i^L são conjuntos dos antecedentes ($i = 1, \dots, p$), y é a saída, \tilde{G}^L conjunto do conseqüente e M é a quantidade de regras do sistema.

A inferência em sistemas fuzzy tipo 1 combina as regras fuzzy ativadas, mapeando os conjuntos fuzzy de entrada em conjunto fuzzy de saída. O motor de inferência computa o grau de ativação de cada regra através de uma operação t-norma entre os graus de pertinência dos antecedentes de cada regra. Os conseqüentes destas regras são combinados por uma das t-conormas ou por soma ponderada (KARNIK et al., 1999).

No tipo 2, o processo de inferência é similar, porém os operadores de união e intersecção são diferentes e específicos para conjuntos fuzzy tipo 2, conforme já apresentado pelas equações (19) e (20) (operadores *join* e *meet* e suas variações) (MENDEL, 2001).

O processamento da saída contém dois elementos: o redutor de tipo e o defuzzificador. A redução de tipo é a operação que transforma o conjunto fuzzy tipo 2, resultante do processo de inferência, em um conjunto fuzzy tipo 1. Através de um método tradicional de defuzzificação (centróide), este conjunto final fornecerá o valor final inferido. Os principais redutores de tipo são: Centróide, Centro-Das-Somas, Altura, Altura Modificada e Centro-Dos-Conjuntos (MENDEL, 2001).

Dentre as vantagens de um sistema de inferência fuzzy tipo 2, pode-se destacar:

- Captura mais eficiente das incertezas associadas às funções de pertinência, principalmente quando estas são definidas por diferentes especialistas (COUPLAND, 2003; HAGRAS, 2004b; TAHAYORI et al., 2006);
- Utilização da terceira dimensão para lidar com a incerteza (WU; TAN, 2004a);
- Melhores resultados quando comparados com sistemas fuzzy tipo 1;
- Redução de oscilação persistente em sistemas de controle (WU; TAN, 2004a).

Sistemas fuzzy tipo 2 tem significante melhoria sobre sistemas fuzzy tipo 1, entretanto não são bem explorados devido a fatores como:

– Dificuldade em visualização gráfica devido à natureza tridimensional dos conjuntos (MENDEL; JOHN, 2001);

– Dificuldade de implementação de operações tais como redução de tipo o que implica em elevado esforço computacional (MENDEL; JOHN, 2001; TAHAYORI et al., 2006).

Sistemas fuzzy tipo 2 tem sido usados em tomadas de decisão, resolução de equações relacionais, processamento de pesquisas, previsão de séries temporais, aproximação de funções, banco de dados relacionais, controle de robôs móveis, processamento de dados, dentre várias outras aplicações (LIANG et al., 2000), como será mostrado na seção 2.5. Porém, sistemas fuzzy tipo 2, na sua forma mais genérica, não são adequados para certas aplicações de tempo real, devido à sua computação intensiva no processamento da saída (WU; TAN, 2005). Esta complexidade computacional é devida principalmente aos cálculos de redução de tipo, que pode ser contornado com a proposta de conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares (SEIHWAN; LEE-KWANG, 2001), apresentados na próxima seção.

2.3. Sistemas fuzzy tipo 2 intervalares

O modelo de sistemas fuzzy intervalares foi criado por Liang e Mendel (2000) com o intuito de tornar os sistemas fuzzy tipo 2 mais simples e eficientes. Estes pesquisadores estudaram como construir funções de pertinência para conjuntos fuzzy tipo 2 intervalar, propuseram métodos para computar operações e método de inferência para estes sistemas (QIU, 2006).

Um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar é um conjunto fuzzy tipo 2 onde todas as funções de pertinência secundárias são conjuntos fuzzy tipo 1, cujos graus de pertinência são iguais a 1 $\forall u \in J_x \subseteq [0,1], \forall x \in X$ (MENDEL, 2004) (equação 24). Funções de pertinências secundárias intervalares refletem uma incerteza uniforme sobre a pertinência primária de x e são as funções mais comumente usadas em sistemas fuzzy tipo 2 (MENDEL, 2004).

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x)/x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} 1/u \right] / x \quad J_x \subset [0,1] \quad (24)$$

Onde J_x é pertinência primária de x .

Um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar também pode ser representado expressando-se suas funções de pertinência superior e inferior. A função de pertinência superior é um subconjunto de \tilde{A} que possui os máximos graus de pertinência do FOU, e a função de

pertinência inferior é um subconjunto de \tilde{A} que possui os mínimos graus de pertinência do FOU (LIANG et al., 2000).

As funções de pertinência superior e inferior, mostrados nas equações (25) e (26), são dois conjuntos fuzzy tipo 1 que delimitam o FOU, denotados por $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ e $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ respectivamente (MENDEL; WU, 2004).

$$\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{FOU}(\tilde{A}) \quad \forall x \in X \quad (25)$$

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{FOU}(\tilde{A}) \quad \forall x \in X \quad (26)$$

A seguir é apresentado um exemplo de conjunto fuzzy tipo 2 intervalar.

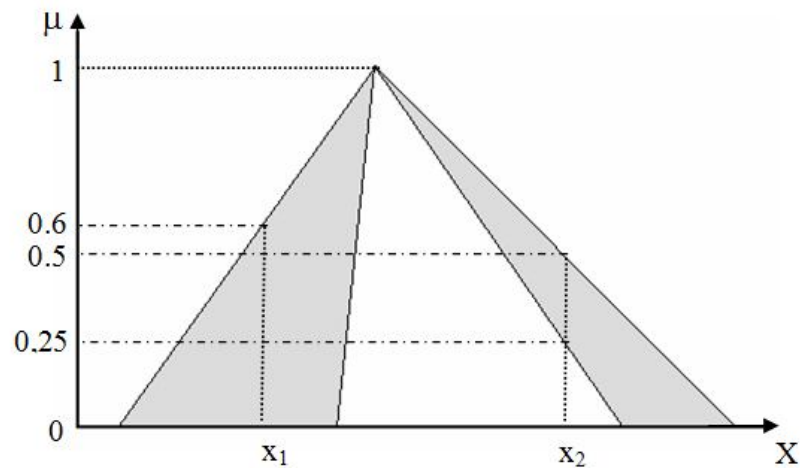


Figura 17. Exemplo de um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar

A região cinza da Figura 17 representa o FOU do conjunto fuzzy tipo 2. O grau de pertinência primário de x_1 é um intervalo de valores de 0 a 0,6. Cada elemento deste intervalo possui grau de pertinência secundário igual a 1. Para x_2 , as pertinências primárias pertencem ao intervalo $[0,25; 0,5]$ e, da mesma forma, cada um destes valores possui pertinência igual a unidade. Nas figuras 18(a) e 18(b) são ilustradas as funções de pertinência secundárias referentes a x_1 e x_2 .

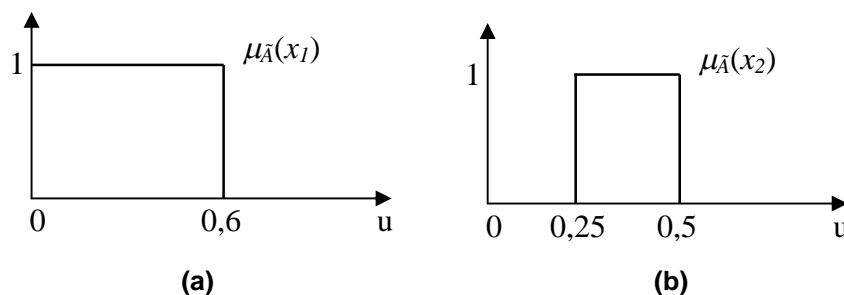


Figura 18. Funções de pertinência secundárias de x_1 e x_2 , respectivamente

Sistemas fuzzy intervalares são mais simples de operar que os não-intervalares, fato que facilita a modelagem (HAGRAS, 2004a). Também acarretam um menor tempo de processamento computacional (RHEE; HWANG, 2002). Sistemas de tempo real, a exemplo do controle de robôs móveis, necessitam de sistemas de controle com menor tempo de processamento e os sistemas intervalares oferecem esta vantagem (HAGRAS, 2004a; WU; MENDEL, 2002). Essa redução de complexidade é ocasionada pelo fato de que apenas as funções de pertinências superior e inferior são utilizadas para os cálculos e não as inúmeras curvas compreendidas entre estas duas funções (WU; MENDEL, 2002).

2.4. Sistemas fuzzy tipo 2 segundo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

Sistemas fuzzy do modelo Takagi-Sugeno-Kang (ou TSK) são sistemas fuzzy em que o conseqüente é um modelo paramétrico e não um conjunto fuzzy como no modelo de Mamdani. O modelo TSK tipo 1 foi proposto por Takagi e Sugeno (1985) e por Sugeno e Kang (1988) com a intenção de desenvolver uma abordagem sistemática para generalizar regras fuzzy para um dado conjunto de dados de entrada/saída. O modelo TSK tem sua principal utilização em controle de sistemas (MENDEL, 2001).

Uma regra de um sistema de inferência fuzzy tipo 1 segundo TSK possui a seguinte estrutura genérica:

$$\text{SE } x_1 \text{ é } F_1^i \text{ E } x_2 \text{ é } F_2^i \dots \text{ E } x_p \text{ é } F_p^i, \text{ ENTÃO } y^i = c_0^i + c_1^i \cdot x_1 + \dots + c_p^i \cdot x_p \quad (27)$$

Onde F_1^i, \dots, F_p^i são funções de pertinência do tipo 1 e c_0^i, \dots, c_p^i são parâmetros do conseqüente. i representa a i -ésima regra do sistema e p a quantidade de antecedentes.

O resultado da inferência é calculado de forma imediata através da seguinte soma ponderada:

$$Y_{TSK} = \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} = \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot (c_0^i + c_1^i \cdot x_1 + \dots + c_p^i \cdot x_p)}{\sum_{i=1}^M f^i} \quad (28)$$

Onde f^i é o resultado da aplicação de uma t-norma (mínimo ou produto) sobre os antecedentes e M o total de regras do sistema.

Uma regra genérica em um sistema de inferência do tipo 2 segundo TSK possui a seguinte estrutura (MENDEL, 2001):

$$\text{SE } x_1 \in \tilde{F}_1^i \text{ E } x_2 \in \tilde{F}_2^i \dots \text{ E } x_p \in \tilde{F}_p^i, \text{ ENTÃO } Y^i = C_0^i + C_1^i \cdot x_1 + \dots + C_p^i \cdot x_p \quad (29)$$

Onde $\tilde{F}_1^i, \dots, \tilde{F}_p^i$ são conjuntos do tipo 2 e C_0^i, \dots, C_p^i são conjuntos do tipo 1. Ou seja, o conseqüente contempla uma operação algébrica (combinação linear) entre conjuntos do tipo 1. Portanto, esta regra possibilita tratar incertezas simultaneamente nos antecedentes e nos conseqüentes (MENDEL, 2001). Dentro desta estrutura, seguem-se dois casos especiais, quais sejam:

- Antecedentes do tipo 2 e conseqüentes com parâmetros singulares (números);
- Ambos antecedentes e conseqüentes representados por conjuntos do tipo 1.

A saída de um sistema fuzzy tipo 2 TSK é obtido aplicando-se o princípio da extensão (equação 16) na equação 28, onde agora ambos f^i e y^i são conjuntos fuzzy tipo 1 (equação 30):

$$Y_{TSK,2} = \int_{y^1 \in Y^1} \dots \int_{y^M \in Y^M} \int_{f^1 \in F^1} \dots \int_{f^M \in F^M} \left[T_{i=1}^M \mu_{Y^i}(y^i) * T_{i=1}^M \mu_{F^i}(f^i) \right] \left/ \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \right. \quad (30)$$

Onde $Y^i = C_0^i + C_1^i x_1 + C_2^i x_2 + \dots + C_p^i x_p$ é um conjunto fuzzy tipo 1 e a expressão entre colchetes representa a aplicação de t-normas entre os conjuntos. A equação (30) também é chamada de *saída estendida* de um sistema fuzzy tipo 2 TSK (MENDEL, 2001). Através desta equação são originadas as equações de ordem 1 e ordem 0 para os sistemas TSK.

Embora a equação (30) lembre o redutor de tipo Centro-Dos-Conjuntos, não é necessário redução de tipo para sistemas fuzzy tipo 2 TSK, assim como não é necessária a defuzzificação para sistemas fuzzy tipo 1 TSK (MENDEL, 2001).

Quando os conjuntos fuzzy tipo 2 utilizados no sistema TSK forem intervalares, $\mu_{Y^i}(y^i) = 1$ e $\mu_{F^i}(f^i) = 1$, a equação (30) é reescrita da seguinte forma:

$$Y_{TSK,2} = [y_l, y_r] = \int_{y^1 \in [y_l^1, y_r^1]} \dots \int_{y^M \in [y_l^M, y_r^M]} \int_{f^1 \in [\underline{f}^1, \bar{f}^1]} \dots \int_{f^M \in [\underline{f}^M, \bar{f}^M]} 1 \left/ \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \right. \quad (31)$$

Onde $\underline{f}^i, \bar{f}^i$ são funções de pertinência inferior e superior respectivamente e y_l^i e y_r^i são os limites esquerdo e direito do conjunto fuzzy tipo 1, resultante do processo de inferência. A saída do sistema $Y_{TSK,2}$ é um conjunto fuzzy tipo 1 intervalar, representado pelos limites esquerdo e direito do conjunto: y_l e y_r – estes cálculos são idênticos aos

utilizados para o redutor de tipo Centro-Dos-Conjuntos. O resultado final é obtido através da defuzzificação que é feita através da média aritmética, mostrada na equação (32).

$$Y_{final} = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (32)$$

Onde,

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i \cdot y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \quad (33)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i \cdot y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} \quad (34)$$

Sistemas TSK podem ainda se classificar quanto à ordem. Sistemas TSK de ordem 0 (zero) são aqueles em que as funções dos conseqüentes são valores constantes. Esses valores não dependem diretamente dos valores das entradas do sistema, e sim da inferência das entradas sobre as regras fuzzy.

Sistemas TSK de ordem 1 (um) são aqueles em que as funções dos conseqüentes são modelos lineares em relação aos parâmetros e às variáveis de entrada. Existem sistemas TSK de ordem 2 ou superior, porém os mais comuns são os de ordens mais baixas (MENDEL, 2001).

Para o caso especial em que os conjuntos dos antecedentes são conjuntos fuzzy tipo 2 e os conseqüentes são números (conjuntos fuzzy tipo 0), ainda para sistemas intervalares, a regra genérica do sistema é simplificada para (LIANG; MENDEL, 2000 apud MEDEL, 2001):

$$\text{SE } x_1 \text{ é } \tilde{F}_1^i \text{ E } x_2 \text{ é } \tilde{F}_2^i \dots \text{ E } x_p \text{ é } \tilde{F}_p^i, \text{ ENTÃO } Y^i = C_0^i \quad i = 1, \dots, M \quad (35)$$

E a equação (31) é simplificada para:

$$Y_{TSK,2} = [y_l, y_r] = \int_{f^1 \in [\underline{f}^1, \bar{f}^1]} \dots \int_{f^M \in [\underline{f}^M, \bar{f}^M]} 1 \left/ \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \right. \quad (36)$$

Para outro caso especial, onde os antecedentes são conjuntos fuzzy tipo 1 e o conseqüente também é formado por conjuntos fuzzy tipo 1, a regra genérica do sistema é definida como (LIANG; MENDEL, 2000 apud MEDEL, 2001):

$$\begin{aligned} \text{SE } x_1 \text{ é } F_1^i \text{ E } x_2 \text{ é } F_2^i \text{ ... E } x_p \text{ é } F_p^i, \\ \text{ENTÃO } Y^i = C_0^i + C_1^i x_1 + C_2^i x_2 + \dots + C_p^i x_p \end{aligned} \quad (37)$$

Onde $i = 1, \dots, M$. Este é o caso em que as incertezas também estão nos conjuntos dos conseqüentes. Considerando-se que os conjuntos dos conseqüentes também sejam intervalares, a saída do sistema se configura um caso particular da equação (31), mostrado na equação (38):

$$Y_{TSK,2} = [y_l, y_r] = \int_{y^1 \in [y_l^1, y_r^1]} \dots \int_{y^M \in [y_l^M, y_r^M]} 1 \left/ \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \right. \quad (38)$$

Portanto,

$$Y = \left[\frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y_l^i}{\sum_{i=1}^M f^i}, \frac{\sum_{i=1}^M f^i \cdot y_r^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \right] \quad (39)$$

Onde Y comporta o limite esquerdo e direito do conjunto fuzzy tipo 1, resultante do sistema fuzzy tipo 2 TSK intervalar.

De forma geral, em modelos TSK tipo 2 de qualquer ordem não é necessária a operação de redução de tipo uma vez que a saída estendida, conforme a equação (30), produz como resultado um conjunto do tipo 1, necessitando somente da fase de defuzzificação.

Na próxima seção são apresentados trabalhos que utilizam a lógica fuzzy tipo 2 e suas aplicações nas mais diversas áreas.

2.5. Trabalhos com lógica fuzzy tipo 2

Na primeira parte desta seção são apresentados alguns trabalhos que utilizam a lógica fuzzy tipo 2 em algum tipo de aplicação. Na segunda parte são apresentados alguns trabalhos sobre novas definições ou aprimoramentos de algum aspecto da lógica fuzzy tipo 2.

Piccinelli e Mont (1998) propuseram um *framework* para um sistema de *help desk*. Muitas informações precisas e relevantes sobre clientes devem ser recuperadas de forma confiável. A lógica fuzzy tipo 2 é utilizada para a construção deste *framework* que gerencia

todas as informações dos clientes e também uma base de dados para recuperar essas informações de modo efetivo.

Karnik e Mendel (1999) discutem uma metodologia de projetos de sistemas fuzzy tipo 2 baseados em entrevistas de múltiplos especialistas, considerando diferentes fontes de incertezas.

John et al. (2000) apresentaram resultados da utilização de técnicas de clusterização neuro-fuzzy com conjuntos fuzzy tipo 2 na análise e classificação de traumas da tíbia. Como resultado houve uma melhoria na classificação destes tipos de trauma.

Liang et al. (2000) apresentaram um método para controle de tráfego de dados de vídeo e voz em redes ATM usando fuzzy tipo 2. Foi demonstrado a aplicabilidade de fuzzy tipo 2 e os bons resultados no controle de utilização de largura de banda.

Homaifar et al. (2001) propuseram um modelo para redução de vibração em materiais utilizados em veículos espaciais. A proposta consiste em um sistema estrutural dinâmico formado por placas lineares elásticas ligadas por sensores e atuadores piezelétricos. Os sinais dos sensores constituem as entradas do sistema fuzzy tipo 2 e a saída do sistema é aplicada nos atuadores. Para testar esta nova técnica de controle, uma simulação foi realizada em um computador pessoal através do SIMULINK/MATLAB[®]. Os resultados da simulação *off-line* confirmaram a robustez e eficiência do controlador fuzzy tipo 2 para a supressão das vibrações de ressonância.

Innocent et al. (2001) descreveram o uso de conjuntos fuzzy tipo 2 para representar as percepções de imagens de pulmões por especialistas, com a finalidade de prever a embolia pulmonar. Através de resultados preliminares foi demonstrada a potencialidade da abordagem.

John e Lake (2001) desenvolveram um projeto para modelar o processo de tomada de decisão de enfermeiras no atendimento a pacientes, levando em consideração suas percepções imprecisas e a complexidade da profissão.

Rhee e Hwang (2001) usaram a lógica fuzzy tipo 2 para aprimorar o algoritmo fuzzy C-means (FCM) convencional. Os centros dos *clusters* são estimados por funções de pertinência do tipo 2. Resultados mostraram que, na presença de ruídos, este modelo foi mais efetivo que o FCM tipo 1.

Innocent e John (2002) descreveram um algoritmo simples e de rápida execução computacional, que produz uma lista de possibilidades para dar suporte ao diagnóstico de doenças, baseado em conjuntos fuzzy tipo 2. Um protótipo foi criado no MATLAB[®] e através dos resultados foi observado que o algoritmo é adequado para diagnósticos. Porém,

existe a dificuldade de se definir apropriadamente os parâmetros dos conjuntos fuzzy tipo 2, tópico que poderia ser melhorado no algoritmo.

Rhee e Hwang (2002) apresentaram um algoritmo perceptron fuzzy tipo 2 intervalar. O perceptron é um algoritmo de treinamento usado para separar linearmente duas classes. Os resultados obtidos do modelo perceptron fuzzy tipo 2 convergiram para valores mais desejáveis quando comparados o modelo perceptron fuzzy tradicional.

Castillo e Melin (2003) propuseram uma abordagem fuzzy-fractal híbrida para monitoramento de plantas industriais, a fim de aumentar a produtividade, reduzir custos e melhorar a qualidade. Quando comparado com fuzzy tipo 1, o sistema baseado em fuzzy tipo 2 trouxe uma significativa melhoria neste processo de monitoramento de plantas.

Coupland (2003) justifica o uso de sistemas fuzzy tipo 2 em robôs móveis, uma vez que tanto os sensores quanto atuadores podem receber/transmitir dados imprecisos ou até mesmo ambíguos ou contraditórios. Além disso, muitas ações destes robôs envolvem situações em que há inferência baseada em dados imprecisos, como por exemplo, evitar objetos, explorar o terreno, aumentar velocidade, verificar mudanças do ambiente, reconhecer objetos, etc.

Melin e Castillo (2003a) propuseram um controle automático de qualidade de produção de caixas de som. Redes neurais artificiais e teoria fractal foram usadas neste trabalho. A lógica fuzzy tipo 2 foi adequada devido às complexidades definidas no trabalho. Testes realizados em uma planta real de produção apresentaram resultados satisfatórios.

Melin e Castillo (2003b) propuseram um controle adaptativo para modelos de plantas dinâmicos não-lineares usando lógica fuzzy tipo 2 e redes neurais. Experimentos apontaram resultados bons tanto na eficiência quanto na precisão, quando comparados com fuzzy tipo 1.

Ozen e Garibaldi (2003) descreveram o desenvolvimento de um sistema especialista para a avaliação da acidez-basicidade umbilical. Esta análise é importante para prover os cuidados médicos adequados a recém-nascidos. As amostras de sangue coletadas dos recém-nascidos frequentemente contém erros em um ou mais parâmetros importantes do sangue e isso é contornado através dos conhecimentos especialistas dos profissionais da área de saúde. Um sistema especialista fuzzy tradicional já foi desenvolvido, porém não foi capaz de capturar completamente as incertezas lingüísticas envolvidas no processo. Um sistema especialista baseado em lógica fuzzy tipo 2 foi proposto, pois esta técnica lida melhor com as incertezas lingüísticas e possibilita a criação de mecanismos que permitem ao sistema adaptar-se às tomadas de decisões dos profissionais de saúde.

Uncu et al. (2003) propuseram um sistema de modelagem fuzzy que identifica a base de regras de um sistema fuzzy tipo 2 utilizando a técnica de clusterização C-means fuzzy. Testes foram realizados em uma aplicação de estimativa de preço de ações, e quando comparado com outras técnicas (ANFIS, redes neurais artificiais, fuzzy tipo 1), o método proposto trouxe resultados mais precisos.

Wu e Mendel (2003) apresentaram resultados preliminares de um sistema de classificação de veículos terrestres através de suas emissões acústicas. Para avaliação de desempenho, um outro sistema fuzzy tradicional foi criado e também um classificador bayesiano. Através dos resultados, pode-se observar que o sistema fuzzy tipo 2 obteve o melhor desempenho.

Castillo e Melin (2004) descreveram o uso da lógica fuzzy tipo 2 e redes neurais em um modelo adaptativo para cancelamento de ruídos. Os experimentos apontaram a potencialidade da lógica fuzzy tipo 2 para esta finalidade.

Doctor et al. (2004) descreveram um sistema para adaptação e aprendizado de controladores fuzzy tipo 2 para agentes inteligentes embarcados em ambientes de computação ubíqua. Experimentos mostraram que os agentes tipo 2 lidam melhor com incerteza e imprecisão presentes neste tipo de computação e o desempenho superou ao do sistema que usa fuzzy tipo 1.

Robôs móveis com navegação autônoma em ambientes dinâmicos encontram uma série de dificuldades relacionadas a incertezas do ambiente. Hagra (2004a) apresentou uma arquitetura de controle reativo para robôs móveis autônomos baseados em sistema de controle fuzzy tipo 2 para implementação dos comportamentos básicos de navegação. A arquitetura foi implementada para diversos tipos de robôs móveis em ambientes diversos. Os Resultados superaram aos obtidos com sistema de controle fuzzy tradicional.

Hagra (2004b) apresentou um controlador fuzzy tipo 2 e sua nova aplicação no controle em tempo real para robôs móveis. Diferentes comportamentos dos robôs foram analisados em ambientes dinâmicos e desafiadores. Resultados foram bem melhores que os do controlador fuzzy tipo 1.

Hwang e Rhee (2004) apresentaram uma melhoria no algoritmo shell C-esférico, utilizando fuzzy tipo 2 intervalar. O algoritmo é usado como técnica de clusterização. Resultados experimentais mostraram a eficiência do método e melhoria de desempenho quando comparado com o algoritmo original.

Kaur e Wilson (2004) propuseram um modelo para lidar com dois processos de tomada de decisão que envolve confiança e risco: o problema do jogo teórico “Dilema do

Prisioneiro” e uma operação hipotética de uma loja de Internet. Um sistema fuzzy tipo 2 intervalar foi criado para implementar o modelo. Em ambos os casos foi possível obter informações mais úteis e realísticas quando comparados com conjuntos fuzzy tipo 1.

Lee e Lin (2004) propuseram um novo esquema usando rede neurofuzzy tipo 2 e filtro adaptativo para sistemas de controle não-linear. Resultados de simulação mostraram a efetividade do controlador proposto.

Melgarejo et al. (2004a) apresentaram uma proposta de arquitetura de hardware baseada nas técnicas de inferência fuzzy tipo 2. Através do modelo computacional proposto, essa nova arquitetura permite que os sistemas fuzzy tipo 2 sejam executados de modo mais eficiente, uma vez que o hardware foi preparado para tais fins. O hardware comporta vários estágios de *pipeline* para que o processo de inferência fuzzy ocorra completamente em paralelo. Em outro trabalho, Melgarejo et al. (2004b) implementaram o modelo supracitado otimizado sobre a tecnologia FPGA e através dos resultados foi observado que o modelo obteve êxito nesta proposta. Neste caso, o processador realizou mais de 30 milhões de inferências fuzzy tipo 2 por segundo.

Phokharatkul e Phaiboon (2004a) apresentaram um sistema fuzzy tipo 2 para prever a perda de cobertura de sinal de sistema de comunicação móvel celular. Através de comparação com o sistema Hata foi possível mostrar que o sistema fuzzy tipo 2 obteve melhores resultados e previsões mais precisas.

Phokharatkul e Phaiboon (2004b) apresentaram um sistema fuzzy aplicado a um robô móvel para evitar obstáculos ao se locomover. O projeto utilizou um sensor infravermelho, um sistema de controle de motor DC, interface RS-232, microcontroladores e conhecimento de sistemas inteligentes. Através de resultados experimentais foi possível comprovar a eficiência do sistema proposto, tornando-o melhor que sistemas de controle fuzzy tradicionais.

Singh et al. (2004) propôs um novo método para controlar um sistema não linear usando o modelo neuro-fuzzy baseado em conjuntos fuzzy tipo 2. Resultados de simulações mostram que este método provê um esquema mais flexível para construção de funções de pertinência e com melhor aproximação para incertezas.

Tan e Lai (2004) desenvolveram um sistema de controle proporcional fuzzy tipo 2 para processos cujos parâmetros são incertos. Resultados de simulações demonstraram que o desempenho do controlador proposto pode ser mantido mesmo quando os parâmetros do sistema desviam de seus valores nominais.

Tang et al. (2004) criaram um sistema de compras *on-line* cujas informações de compras estão armazenadas em um banco de dados. Baseado em um histórico de compras, um

agente pode adquirir uma informação de produto utilizando tecnologia de *data mining* fuzzy tipo 2.

Wu e Tan (2004a) conduziram um estudo para verificar a eficiência de um controlador fuzzy tipo 2 para controle de nível de líquidos em tanques. Algoritmos genéticos foram usados para otimizar parâmetros do controlador fuzzy. Resultados experimentais mostraram que o controlador fuzzy tipo 2 lida melhor com a complexidade da planta e também modela melhor incertezas do que controladores fuzzy tipo 1.

Wu e Tan (2004b) propuseram uma arquitetura simplificada para sistemas fuzzy tipo 2. A arquitetura reduz o esforço computacional sobre fuzzy tipo 2, preservando as vantagens da lógica fuzzy. Resultados experimentais sobre plantas SISO mostraram que a arquitetura proposta obteve melhor desempenho quando comparado com controle fuzzy tipo 1.

Zeng e Liu (2004) apresentaram uma extensão do modelo oculto de Markov utilizando lógica fuzzy tipo 2. Um sistema tradicional foi criado para efetuar a comparações entre os modelos. Os testes foram feitos sobre reconhecimento de fonemas e os resultados experimentais mostraram que o desempenho é semelhante nos dois modelos e a complexidade computacional também é semelhante, porém a abordagem com fuzzy tipo 2 é mais robusta ao tratamento de ruídos.

Di Lascio e Gisolfi (2005) apresentaram um novo monóide⁸ residual comutativo parcialmente ordenado sobre uma específica classe de conjuntos fuzzy tipo 2. Este monóide permite desenvolver uma abordagem para modelagem em computação.

Di Lascio et al. (2005) apresentaram um modelo de diagnóstico médico baseado em conjuntos fuzzy tipo 2. Dados históricos do paciente e um conjunto de patologias foram usadas pelo modelo para criar um conjunto de possíveis patologias do paciente ou informar quais informações seriam necessárias para fazer um diagnóstico mais preciso.

Figuerola et al. (2005) apresentaram um controlador lógico fuzzy tipo 2 para um agente robótico com a finalidade de definir trajetórias no contexto de futebol de robôs. O sistema possui 2 entradas e duas saídas, com 4 regras. Resultados mostraram que o novo controlador lida melhor com incertezas relacionadas a ruídos e a trajetória parabólica da bola, sem aumentar, no entanto, o esforço computacional da aplicação.

Gu (2005) criou um modelo de sistema especialista para realização de compras via *web*. É um guia para os usuários adquirirem maiores vantagens e benefícios nas compras feitas neste meio eletrônico.

⁸ Monóide é um elemento da álgebra abstrata, é “um semigrupo dotado de uma identidade” (BOROWSK; BORWEIN, 2004, p. 254).

Huang e Chen (2005) propuseram a primeira arquitetura de hardware especializada para execução de inferências fuzzy tipo 2. O conceito básico da arquitetura foi explorar o paralelismo temporal através de *pipelines* para as atividades de inferência. O desempenho do circuito atingiu 3,125 mega-inferências fuzzy/s (MFLIPS)⁹.

Huarng e Yu (2005) propuseram usar um modelo fuzzy tipo 2 para previsão de índices de bolsa de valores. Os sistemas investigados utilizam uma única variável de previsão e esta nova abordagem melhorou o desempenho, pois utilizou informações extras que não foram contempladas nos sistemas de previsão fuzzy tradicionais. Para validação foi utilizado o índice da bolsa de valores de Taiwan – o TAIEX. As análises empíricas mostraram que as previsões do novo modelo superaram às do modelo tradicional.

Mencattini et al. (2005) apresentaram uma abordagem de previsão meteorológica baseada em séries temporais e sistemas fuzzy tipo 2. Esta técnica permitiu obter previsões mais precisas quando comparada ao método tradicional.

Mendez et al. (2005) propuseram um modelo para a predição de temperatura de barras metálicas aquecidas utilizando um algoritmo híbrido com lógica fuzzy tipo 2. Estimar esta temperatura é de grande importância para a produção das bobinas de metal. Através de uma simulação foi observado que o sistema obteve um bom desempenho mesmo com a presença de incertezas introduzidas por dados ruidosos.

Niewiadomski (2005) propôs o emprego de conjuntos fuzzy tipo 2 em banco de dados de sumários lingüísticos. Esta inovação lida melhor com as incertezas da linguagem natural, o que é impossível de se obter com os conjuntos fuzzy tradicionais.

Own et al. (2005) propuseram um filtro adaptativo com fuzzy tipo 2 para atenuação de ruído a fim de preservar detalhes de imagens. Resultados de simulações mostraram que estes filtros fuzzy tipo 2 possuem robustez e também superaram outras abordagens de filtragem.

Rehák et al. (2005) propuseram um modelo utilizando lógica fuzzy tipo 2 para análise de confiança em um ambiente colaborativo multiagente.

Sepúlveda et al. (2005) realizaram simulações que comprovaram que controladores lógicos baseados em sistemas fuzzy tipo 2 são melhores que os baseados em sistemas fuzzy tipo 1 quando relacionados a incertezas produzidas por elementos de instrumentação.

Shu e Liang (2005) propuseram uma abordagem para utilizar um sistema fuzzy tipo 2 para análise e estimativa do tempo de sobrevivência de redes de sensores sem fio. Através de

⁹ *Mega Fuzzy Logic Inferences per Second (MFLIPS)*.

simulações ficou demonstrado que a abordagem proposta obteve melhores resultados quando comparada à de um sistema fuzzy tipo 1.

Astudillo et al. (2006) utilizaram fuzzy tipo 2 para desenvolver um controlador de trajetória para o modelo dinâmico de um robô móvel, integrando um controlador cinemático e um controlador de torque.

Du e Zhu (2006) Criaram uma fundamentação conceitual e formal para o tratamento de objetos espaciais – como pontos, linhas e regiões – que não possuem limites bem definidos. A lógica fuzzy tipo 2 mostrou-se mais adequada para a descrição e implementação dos conceitos vagos de tais objetos espaciais.

Hagras (2006) aponta erros nos cálculos de Back-propagation (BP) criados por Wang et al. (2004) e indica a forma correta.

Lee et al. (2006) propuseram um controlador fuzzy tipo 2 adaptativo desacoplado para tratamento de estabilidade do problema não-linear TORA (Atuador Rotacional com Oscilação de Translação)¹⁰. O problema foi dividido em dois subsistemas para simplificar o sistema não-linear, o algoritmo de aprendizado *backpropagation* foi usado em um deles. Simulações e comparações foram feitas e foi mostrada a efetividade deste controlador, que apresentou um menor tempo para estabilização.

Li et al. (2006) propuseram um método para previsão de tráfego no trânsito, baseado na lógica fuzzy tipo 2. Informações do tráfego cotidiano e do tráfego em tempo real são combinadas para construir as regras fuzzy. Através de resultados preliminares foi possível mostrar que o desempenho do sistema é comparável ou até melhor que outras abordagens relatadas na literatura associada.

Medina e Mendez (2006) apresentaram uma aplicação de sistema fuzzy tipo 2 intervalar para a previsão de taxa de câmbio diária entre peso mexicano e dólar americano. Através de experimentos foi possível perceber que é possível prever esta taxa de câmbio e que é possível obter um bom lucro com esta estratégia.

Pareek e Kar (2006) apresentaram uma demonstração bem sucedida da aplicação de um sistema fuzzy tipo 2 para prever um parâmetro crítico de uma turbina a gás em uma usina de força. Houve uma melhora substancial no desempenho quando comparado com um sistema fuzzy tipo 1 na presença de ruídos nos dados das amostras.

Qiu (2006) implementou um sistema fuzzy para máquina de lavar roupas. Vários autores já propuseram modelos fuzzy para tais máquinas, porém, este sistema foi projetado

¹⁰ *Translational Oscillation Rotational Actuator.*

para que pudesse ser utilizado no modo fuzzy tradicional ou fuzzy tipo 2. O autor apresentou os resultados com várias amostras de roupas e fez um comparativo do gasto energético do processo. O modo fuzzy tipo 2 gastou bem menos energia. Também apresentou um sistema híbrido utilizando fuzzy tipo 2 e otimização com Algoritmos Genéticos para a predição do tempo de sobrevivência de pacientes com mieloma¹¹.

Tan (2006) apresentou um controlador fuzzy tipo 2 simplificado adequado para aplicações de tempo real. A idéia principal foi de substituir alguns conjuntos fuzzy tipo 1 em conjuntos fuzzy tipo 2. Resultados experimentais indicaram que o controlador é mais robusto que o convencional, além de baixar o esforço computacional.

Zeng e Liu (2006) integraram campos aleatórios de Markov com conjuntos fuzzy tipo 2 para o reconhecimento de caracteres manuscritos. O modelo foi aplicado no reconhecimento de caracteres chineses e os resultados dos experimentos mostraram que o modelo proposto é melhor do que os modelos de campos aleatórios de Markov clássicos para a classificação desses caracteres.

Quanto ao aprimoramento ou o desenvolvimento de novas abordagens no âmbito da lógica fuzzy tipo 2, alguns trabalhos podem ser destacados:

Seihwan e Lee-Kwang (2001) propuseram um método utilizando algoritmos genéticos para determinação das posições e formas das funções de pertinência, além de definir as regras de sistemas fuzzy tipo 2. Resultados indicaram um desempenho maior quando se utiliza este método, quando comparado com outros métodos fuzzy.

Uncu e Turksen (2003) propuseram uma modelagem de sistemas fuzzy TSK tipo 2 composta de duas fases, com a finalidade de melhorar o desempenho através da redução da complexidade computacional.

Coupland e John (2004) apresentaram um método eficiente do uso da operação *meet*, aumentando significativamente o desempenho de sistemas fuzzy tipo 2.

Mendel (2004) propôs uma nova abordagem de sistemas fuzzy tipo 2 usando fórmulas matemáticas e fluxogramas computacionais para auxiliar os projetistas de sistemas no entendimento dos sistemas fuzzy. O foco está na computação de derivadas necessárias para implementar alguns tipos de algoritmos.

¹¹ Variedade de câncer que afeta os linfócitos tipo B, encarregados de produzir imunoglobulinas. Caracteriza-se pelo surgimento de dores ósseas, freqüentemente a nível vertebral, anemia, insuficiência renal e um estado de imunodeficiência crônica (DICIONÁRIO MÉDICO, 2007).

Mendel e Wu (2004) demonstraram cálculos do centróide de um sistema fuzzy tipo 2 intervalar utilizando algumas propriedades geométricas como as áreas e os centros de gravidade das funções de pertinência superior e inferior dos conjuntos fuzzy correspondentes.

Coupland e John (2005) apresentaram um método para melhorar a velocidade de processamento da inferência para sistemas fuzzy tipo 2, através da exploração de métodos da geometria computacional. Foram realizados alguns experimentos sobre um sistema limitado e através dos resultados foi observado que houve melhora no desempenho no processamento da inferência, quando comparado com um sistema padrão.

Wu e Tan (2005) propuseram o desenvolvimento de um redutor de tipo mais eficiente computacionalmente. A proposta foi baseada no conceito de “conjuntos tipo 1 equivalentes”. Resultados de simulações mostraram que este algoritmo reduz o esforço computacional e é muito mais simples de se implementar quando comparado com o modelo do redutor de tipo de Karnik-Mendel.

Coupland e John (2006) descreveram uma técnica de defuzzificação direta para conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares. Esta técnica pode ser utilizada como uma alternativa para o redutor de tipos para certos sistemas como os não-estacionários, onde se percebe uma considerável melhoria de desempenho.

Tahayori et al. (2006) propuseram um novo método para operações sobre conjuntos fuzzy tipo 2 através de aproximações, assegurando a precisão nos cálculos para as partes mais importantes dos graus de pertinência.

Wan e Kamal (2006) apresentaram um algoritmo para ajuste de parâmetros de um controlador fuzzy tipo 2. Os parâmetros do conseqüente e o FOU associado aos antecedentes são ajustados simultaneamente. Para simulação, foi utilizado um processo de neutralização de Ph e através dos resultados foi possível concluir que o sistema fuzzy tipo 2 pode ser utilizado para treinar um controlador fuzzy tipo 2.

3. O Controle de Tráfego Aéreo

O controle de tráfego aéreo é uma área potencial para estudos e desenvolvimento de tecnologias, pois cada vez mais aumentam as exigências de segurança e conforto para o transporte aéreo e para a operação de controle das aeronaves (SIEWERDT, 2005). Além disso, as tecnologias desenvolvidas para o tráfego aéreo podem ser aplicadas a diversos setores, como navegação aérea, controle de aeronaves, em satélites, previsões meteorológicas e em solo através dos sistemas de radares, infra-estrutura aeroportuárias, entre outros. Alguns destes trabalhos são apresentados na seção 3.4. Para melhor entender o estudo de caso que envolve o controle de tráfego aéreo, primeiramente será feita uma breve contextualização do problema, sua relação com a lógica fuzzy, apresentação de ferramentas e tecnologias de apoio ao controle de aeronaves e posteriormente serão apresentados alguns trabalhos que aplicam a lógica fuzzy a algum aspecto do controle de tráfego aéreo.

3.1. Histórico

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 aumenta o número de aeronaves, aumenta também a necessidade de controlá-las, a fim de evitar colisões entre elas (GILBERT, 1973). O controlador de tráfego aéreo é o profissional 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 de aeródromo*¹², ou simplesmente *torre de controle*, que pode ser encontrada na maioria dos aeroportos.

Archie William League (1907 – 1986) é considerado o primeiro controlador de tráfego aéreo. Foi contratado para orientar o tráfego aéreo que estava em constante crescimento no campo de vôo de St. Louis Lambert. Sua “Torre de Controle” (FOTO 1 no ANEXO 2) era composta de um guarda-sol, um carrinho de mão, uma cadeira dobrável e um par de bandeirolas – uma para instruir a parada de aeronaves no solo e outra para instruí-las a se movimentarem (ASSOCIAÇÃO DOS CONTROLADORES DE TRÁFEGO AÉREO DE GUARULHOS, 2006).

Em pouco tempo a profissão conquistou sofisticação. Em 1930, o Aeroporto Municipal de Cleveland construiu uma torre de controle equipada com rádios. Cinco anos

¹² Aeródromo é uma “área definida sobre a terra ou água destinada à chegada, partida e movimentação de aeronaves” (BRASIL, 2006, p. 15). Já aeroportos são aeródromos providos de facilidades logísticas e de conforto para passageiros e empresas.

após, vinte cidades americanas seguiram o exemplo (ASSOCIAÇÃO DOS CONTROLADORES DE TRÁFEGO AÉREO DE GUARULHOS, 2006). Atualmente, o sistema de controle de tráfego aéreo vem se tornando cada vez mais complexo devido a fatores como:

- Aumento do número de aeronaves, graças à crescente demanda pelos serviços aéreos de transporte de pessoas e cargas. Tal aumento pode ser percebido através dos dados da INFRAERO (ANEXO 3), referentes ao movimento nacional de aeronaves de 2005 a 2007;

- Necessidade de otimização de recursos aeroportuários. As pistas de pouso e decolagem estão se tornando recursos mais escassos, pois nem sempre os aeroportos dispõem de área física para expansão de suas estruturas (ANAGNOSTAKIS; CLARKE, 2003);

- Avanços tecnológicos na estrutura, produção, manutenção e monitoramento das aeronaves.

O controle de tráfego aéreo também vem acompanhando o cenário de evolução tecnológica. O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão subordinado ao Comando da Aeronáutica, gerencia o espaço aéreo do Brasil e através de seus órgãos regionais mantém seguro e confiável o fluxo do tráfego aéreo nas áreas sob sua jurisdição (DECEA, 2008).

A configuração do espaço aéreo também contribui para a organização do tráfego aéreo. O DECEA cria ou modifica essa configuração quando há necessidade de otimização do uso do espaço aéreo. Em 20 de janeiro de 2005, por exemplo, foi implantado o espaço RVSM (*Reduced Vertical Separation Minimum* – Mínimo de Separação Vertical Reduzido) no Brasil. Este espaço comporta mais aeronaves que a configuração anterior, pois a separação vertical entre as aeronaves caiu de 2000 para 1000 pés¹³ em certas áreas do espaço aéreo. Tal procedimento permite às empresas aéreas e proprietários de aeronaves certificados utilizarem suas aeronaves em níveis ótimos de voo, proporcionando substancial economia de combustível (ANAC, 2008).

A demanda e complexidade do serviço de controle de tráfego aéreo chegaram a tal ponto que o controlador de tráfego aéreo deve se especializar em áreas específicas de controle, não só em nível de geográfico, mas também em nível operacional. Quanto a este último, os controladores de tráfego aéreo podem exercer suas funções nas seguintes áreas:

- Centro de Controle de Área (ACC) – “Órgão estabelecido para prestar serviço de controle de tráfego aéreo aos vôos controlados nas áreas de controle sob sua jurisdição”

¹³ Uma das unidades de medida de comprimento utilizada no controle tráfego aéreo. Um metro corresponde a aproximadamente três pés.

(BRASIL, 2006, p. 19). Dentre estas áreas incluem-se aerovias¹⁴, regiões de informação de vôo e outros espaços aéreos definidos pelo DECEA.

– Controle de Aproximação (APP) – “Órgão estabelecido para prestar serviço de controle de tráfego aéreo aos vôos controlados que cheguem ou saiam de um ou mais aeródromos” (BRASIL, 2006, p. 20). APP’s controlam as aeronaves que se encontram nas chamadas Área de Controle Terminal¹⁵ (TMA), Zona de Controle (CTR) ou em áreas delegadas.

– Torre de Controle de Aeródromo (TWR) – “Órgão estabelecido para proporcionar serviço de controle de tráfego aéreo ao tráfego de aeródromo” (BRASIL, 2006, p. 31).

– Defesa Aérea – Órgão estabelecido para prestar serviço às aeronaves da Força Aérea Brasileira na defesa do espaço aéreo brasileiro.

Os serviços de controle de tráfego aéreo supracitados têm a finalidade de prevenir colisões de aeronaves, acelerar e manter ordenado o fluxo de tráfego aéreo (BRASIL, 2006). No caso específico de Salvador, somente os órgãos de controle APP e TWR estão presentes.

A torre de controle de Salvador encontra-se no Aeroporto Internacional de Salvador Deputado Luís Eduardo Magalhães (FOTO 2 no ANEXO 2). O movimento de aeronaves neste aeródromo é o maior do Nordeste e sexto do Brasil (INFRAERO, 2008). Nacionalmente é superado apenas por Congonhas (SP), Guarulhos (SP), Brasília (DF), Galeão (RJ) e Campo de Marte (SP), segundo dados da INFRAERO (2008) relativos ao triênio 2005-2007 (ANEXO 3).

3.2. Ferramentas para controle de tráfego aéreo

O serviço de controle de tráfego aéreo é comumente reconhecido como um trabalho extenuante. Assim como a profissão de piloto, a de controlador envolve enorme responsabilidade, pois as vidas de milhares de pessoas e bens materiais estão sob seus cuidados. Os controladores de tráfego aéreo são de vital importância para o funcionamento do sistema de controle de tráfego aéreo. Mesmo com possíveis falhas de sistemas de gerenciamento computadorizados e de radares, os controladores de tráfego aéreo têm condições de continuar o serviço de controle de modo convencional, usando os recursos mínimos, sem comprometer a segurança das aeronaves.

¹⁴ Rotas aéreas dispostas em forma de corredores (BRASIL, 2006).

¹⁵ Espaço aéreo controlado de limites definidos onde as aeronaves se encontram em fase de descida ou subida.

O controle de tráfego aéreo, no cenário mundial, caminha para um nível maior de automação. O papel do ser humano será mais relacionado a julgamentos interpretativos, decisões complexas e ações adaptativas. Avanços na tecnologia e na comunicação oferecem um potencial para significantes melhorias no controle de tráfego aéreo (MAXWELL, 1975).

Devido à grande complexidade¹⁶ do sistema de tráfego aéreo (LEE, 2005), dificilmente o controlador explora por completo todas as soluções possíveis em um curto intervalo de tempo nas tomadas de decisões (ANAGNOSTAKIS; CLARKE, 2003). Portanto, surge a necessidade de sistemas de apoio à tomada de decisão automatizados para auxiliarem no planejamento do controle.

Andriole (1989) apud Gu (2005) define sistema de apoio à tomada de decisão como um sistema computacional interativo e integrado, que contém ferramentas analíticas e capacidade de gerenciar informações, a fim de auxiliar aos responsáveis por tomar decisões. Normalmente tais sistemas envolvem vários critérios e restrições a serem satisfeitas.

Inúmeros sistemas têm sido implantados nos órgãos de controle a fim de auxiliar aos controladores de tráfego aéreo e também para otimizar o uso do espaço aéreo. Siewerdt (2005), da diretoria de Sistemas de Defesa da Atech Tecnologias Críticas, menciona alguns dos sistemas existentes para apoio à tomada de decisão no controle de tráfego aéreo:

– STMS[®] (*Saipher Tower Management System*) – “[...] sistema computadorizado para torres de controle que permite aos controladores visualizar, manipular e gerenciar o tráfego aéreo” (SAIPHER, 2007). Para cada aeronave é gerado um registro eletrônico que contém todas as informações operacionais sobre o voo, possibilitando a análise e gerência administrativa sobre os voos.

– LLWAS[®] (*Low Level Wind Shear Alerting System*) – Sistema com sensores que indicam a presença de turbulência nas proximidades dos aeroportos (MEYER et al., 1999).

– ASDE-X[®] – Radar de superfície provido de um sistema que alerta aos controladores de tráfego aéreo quando pessoas ou veículos sem autorização ou animais ingressam na pista de pouso e decolagem. (SENSIS, 2007).

Existem também sistemas que ajudam na seleção de rotas alternativas para as aeronaves, na emissão de autorizações de plano de voo, na solução tática entre trajetórias de aeronaves, entre outros.

Perry (1997) também identifica outros sistemas:

¹⁶ Um sistema pode ser chamado de complexo se suas dimensões são tão altas que seu modelo (se disponível) é não-linear, interconectado ou a informação no sistema é tão incerta que as técnicas clássicas não poderiam facilmente lidar com o problema (JAMSHIDI, 2006).

– Sistema de Posicionamento Global¹⁷ – Uma rede de satélites que provê sinais de navegação para determinação de posição, incluindo altitude e tempo. Este sistema é utilizado em navegação aérea em geral;

– Radar de Vigilância¹⁸ – Um radar de baixo alcance (normalmente de 55 milhas náuticas), usado em área de controle terminal;

– Radar de Vigilância em Rota¹⁹ – Um radar de longo alcance (normalmente 200 milhas náuticas), usado para rastrear aeronaves a altas altitudes, usado em Centros de Controle de Área;

– CTAS (*Center-Tracon Automation System*) – Software que provê ferramentas aos controladores de tráfego aéreo para automatizar algumas operações, como seqüenciamento para pouso em área de controle terminal e cálculo de atrasos de aeronaves em rota;

– Sistema Anticolisão²⁰ – Uma ferramenta abordo da aeronave que possibilita o piloto a identificar aeronaves nas proximidades (de 5 a 40 milhas náuticas, dependendo do ajuste). O sistema alerta os pilotos para impedir conflitos e recomenda ações quando for o caso (subir ou descer).

Siewerdt (2005) ainda cita trechos dos textos da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), confirmando a necessidade da otimização dos recursos do espaço aéreo e sistemas de suporte à tomada de decisão em tráfego aéreo:

De uma perspectiva de um prestador de serviços, a inclusão da habilidade dos operadores de aeroportos em operar num ambiente rico de informações, com dados em tempo-real, juntamente com sistemas e dados voltados para a predição, unida a uma gama de ferramentas automatizadas de suporte à decisão ou de tomadas de decisão, permitirá a otimização dos serviços para os usuários do espaço aéreo (THEIL, 2003 apud SIEWERDT, 2005, tradução nossa).²¹

Uso colaborativo de ferramentas de suporte à decisão assegurará o uso mais eficiente dos recursos do espaço aéreo; proverá o maior acesso possível destes recursos e o acesso igualitário para todos os usuários do espaço aéreo; atenderá preferências dos usuários; e, assegurará que a demanda sobre um recurso do espaço aéreo não exceda sua capacidade (THEIL, 2003 apud SIEWERDT, 2005, tradução nossa).²²

¹⁷ *Global Positioning System* (GPS).

¹⁸ *Airport Surveillance Radar* (ASR).

¹⁹ *Air Route Surveillance Radar* (ARSR).

²⁰ *Traffic Alert and Collision Avoidance System* (TCAS).

²¹ *From a service provider perspective, including that of airport operators the ability to operate within an information-rich environment, with real-time data, as well as system trend and predictive data, fused with a range of automated decision-support or decision-making tools, will enable optimization of services to airspace users* (THEIL, 2003 apud SIEWERDT, 2005).

²² *Collaborative usage of decision support tools will ensure the most efficient use of airspace resources; provide the greatest possible access to airspace resources; provide equitable access for all airspace users; accommodate user preferences; and, ensure that demand on an airspace resource will not exceed its capacity* (THEIL, 2003 apud SIEWERDT, 2005).

A OACI é uma instituição que tem como principais objetivos o desenvolvimento dos princípios e técnicas de navegação aérea internacional e a organização e o progresso dos transportes aéreos, de modo a favorecer a segurança, a eficiência, a economia e o desenvolvimento dos serviços aéreos. Além de estudar problemas técnicos, jurídicos e econômicos relativos ao transporte aéreo internacional, desenvolve um trabalho importante no campo da assistência técnica, procurando organizar e dar maior eficiência aos serviços de infra-estrutura aeronáutica nos países em desenvolvimento. A sede da organização se localiza em Montreal e conta com 190 países membros (OACI, 2008).

Existem algumas empresas consolidadas no mercado que produzem sistemas críticos de tomadas de decisão no âmbito de controle de tráfego aéreo, porém, em sua maioria, visam apenas aeroportos de grande complexidade (que possuem muitas pistas para pouso e decolagens, dezenas de *taxiways*²³, congestionamentos frequentes, etc.). Contudo, os aeroportos de pequeno e médio porte também têm certa complexidade de operação, e também podem ser alvo de pesquisas em busca de soluções.

3.3. Definição e caracterização do problema

Uma das principais funções da torre de controle é de “transmitir informações e autorizações às aeronaves sob seu controle para conseguirem um movimento de tráfego aéreo seguro, ordenado e rápido no aeródromo e em suas proximidades com o objetivo de evitar abalroamento entre as aeronaves [...]” (BRASIL, 2006, p. 115). Dentre estas autorizações, as mais comuns emitidas pelas torres de controle são para: pousar, decolar, taxiar, acionar motores e rebocar aeronaves. Um destaque será dado para a autorização de decolagem, pois no seu processo decisório encontramos termos lingüísticos imprecisos, tornando-se assim, um caso propício para estudo.

O controlador de tráfego aéreo deve ter atenção na medida em que muitas aeronaves estão envolvidas num processo que demanda decisões complexas. Por exemplo: deve sempre acompanhar visualmente as aeronaves que estão sob seu controle; deve sempre certificar-se se a pista está livre de obstáculos²⁴, etc. Além disso, o aeródromo é o local para o qual todas as aeronaves convergem, e de onde divergem, ocasionando possíveis conflitos de tráfego entre as aeronaves.

²³ Vias terrestres demarcadas no aeródromo destinadas à movimentação de aeronaves a baixa velocidade, excluídas as operações de pouso e decolagem (BRASIL, 2006).

²⁴ Não é raro aparecer cães cruzando a pista, pessoas sem autorização, peças ou cascalho sobre a pista, etc.

Tomadas de decisão estão presentes em quase todas as atividades dos controladores de tráfego aéreo. Um desses casos está representado no cenário da Figura 19.

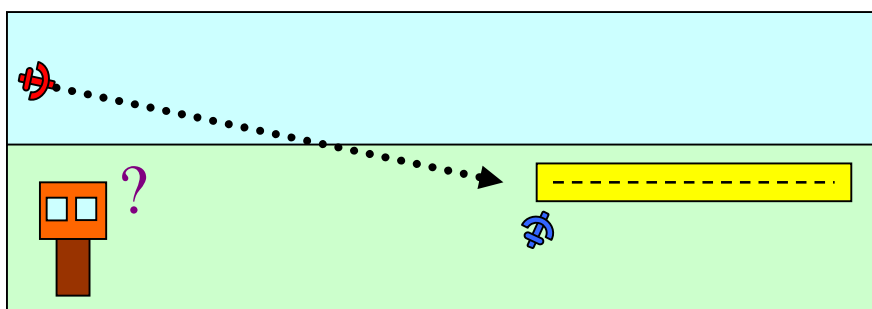


Figura 19. Cenário da tomada de decisão

Nesta figura, uma aeronave no solo está taxiando 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?”

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. Para este trabalho, esta distância intermediária é chamada de *segmento de indecisão*.

O segmento de indecisão varia para cada tipo de aeronave envolvida no cenário, pois está diretamente relacionado com o desempenho das aeronaves. Há também outros fatores que influenciam na tomada de decisão, como os meteorológicos e culturais relacionados ao comportamento de pilotos e de controladores de tráfego aéreo. Este cenário ocorre em todos os aeródromos controlados. Contudo, as tomadas de decisão dos controladores de tráfego aéreo também variam em função de diversos fatores inerentes a cada aeródromo, como por exemplo, o comprimento e o formato das *taxiways*.

Não existem, até o momento, normas que regulem qual a posição máxima que uma aeronave em aproximação para pouso deva estar para que uma outra próxima ao ponto de espera tenha autorização de decolagem. Esta decisão é dada a partir da experiência e da segurança do controlador de tráfego aéreo em questão.

Um aspecto importante neste contexto é que os controladores de tráfego aéreo utilizam principalmente duas grandezas físicas para a tomada de decisão – distância e velocidade – o que teoricamente poderia ser abreviado para a grandeza tempo. Porém, tal perspectiva não seria factível, pois os controladores de tráfego aéreo não estariam preparados para lidar com regras fuzzy sobre tempos. O que ocorre na prática é a utilização de velocidades e distâncias e em diversas unidades de medida, como será explicado posteriormente.

Uma tomada de decisão efetiva neste contexto de controle de tráfego aéreo pode trazer vários benefícios como:

- Auxílio na fluidez do tráfego aéreo – o item 10.13.2 da ICA 100-12 explicita a necessidade da fluidez do tráfego. Diz que os controladores deverão ordenar o tráfego de forma a possibilitar que um maior número de partidas sejam realizadas com a mínima demora (BRASIL, 2006);

- Economia de combustível – uma vez que a aeronave que está por decolar ficará menos tempo no ponto de espera. Pela pesquisa realizada com pilotos, uma aeronave do tipo B737-300 gasta em média 15 Kg de combustível por minuto que passa acionada no solo, onerando as empresas aéreas;

- Redução do incômodo sentido por passageiros e tripulantes ocasionados por longas esperas no ponto de espera. Em dias normais em São Paulo, estas esperas podem chegar a 30 minutos (Dados coletados em entrevistas com pilotos);

- Deixar os controladores com maior disponibilidade para resolver outros tipos de controle e conflitos de tráfego aéreo.

O estudo de caso proposto neste projeto visa criar um modelo fuzzy tipo 2 para apoio à tomada de decisão no controle de tráfego aéreo, a fim de auxiliar os controladores de tráfego aéreo que operam no Aeroporto Internacional de Salvador na tomada de decisão de autorização de decolagens de aeronaves que possam conflitar com aeronaves que estejam em aproximação para pouso. Este estudo de caso é descrito com detalhes no capítulo 5. A construção deste modelo possibilitará o registro das decisões dos controladores de tráfego aéreo experientes (especialistas) e poderá servir como base de referência para os demais controladores, além de também poder servir para avaliação de desempenho de todos.

O uso da lógica fuzzy tipo 2 é proposto para o estudo de caso apresentado devido à sua potencialidade em tratar a variabilidade, e conseqüente imprecisão, decorrente das informações dos vários especialistas, ou seja, o que caracteriza tipicamente uma situação na qual o modelo identificado possui a informação humana como elemento fundamental para a sua gênese. A lógica fuzzy tipo 1 também se aplica ao caso analisado, podendo-se, neste caso,

utilizar informações de apenas um especialista ou um modelo médio proveniente de todos os especialistas. Porém, a lógica fuzzy tipo 2 proporciona mais vantagens que a do tipo 1, conforme comparação apresentada na seção 6.2.

Na próxima seção são descritos trabalhos que utilizam a lógica fuzzy em algum aspecto do controle de tráfego aéreo mundial.

3.4. Trabalhos relacionados

A lógica fuzzy tradicional tem sido usada em várias pesquisas e aplicações relacionadas ao controle de tráfego aéreo. A seguir são listadas algumas destas referências.

Clymer (1995) propôs um modelo fuzzy adaptativo para otimizar as capacidades dos aeroportos quanto ao tempo de espera de aeronaves para pouso. Através de consultas a especialistas em controle de tráfego aéreo, as regras fuzzy foram formuladas e ajustadas para que as aeronaves em aproximação façam o menor número de esperas e voltas possíveis, a fim de reduzir o tempo para ingresso nos corredores para pouso nos aeroportos. As esperas muitas vezes acontecem devido às diferenças de desempenho das aeronaves (velocidade, esteira de turbulência, etc.) e também para evitar colisões. Porém, esta separação entre aeronaves pode ser otimizada através do modelo proposto. Através dos resultados de simulações, foi possível obter melhores resultados com este modelo do que algoritmos não-lineares para o mesmo conjunto de treinamento. Adicionalmente foi proposto o desenvolvimento de uma máquina nomeada *Supervisor* para monitorar o trabalho dos controladores de tráfego aéreo para descobrir melhores regras a fim de melhorar o modelo.

Robinson III et al. (1997) desenvolveram um método baseado em lógica fuzzy para seqüenciamento de tráfego aéreo em áreas de controle terminal. O sistema de seqüenciamento também é baseado em contínuas atualizações de dados das aeronaves providos de radares e também de dados inseridos por controladores de tráfego aéreo. O sistema foi projetado pela *NASA Ames Research Center* e testado operacionalmente no Centro de Controle de Aproximação de Dallas/Fort Worth. Os testes mostraram que o algoritmo gera um eficiente plano de seqüenciamento de chegada de aeronaves e que é considerado aceitável por grande parte dos controladores de tráfego aéreo. O sistema acertou em mais de 90% dos casos o número de seqüência de pouso das aeronaves ao ingressar na Área de Controle Terminal.

Babić e Krstić (2000) criaram uma ferramenta de apoio à tomada de decisão baseada na lógica fuzzy. A ferramenta ajuda os controladores de tráfego aéreo a decidirem a quantidade de setores a serem utilizados para o controle das aeronaves. Cada setor

corresponde a uma área do espaço e cada grupo de controladores de tráfego aéreo fica responsável por um setor. Para a setorização, fatores são levados em consideração, como: volume de aeronaves no espaço, complexidade da região, tipos de aeronaves em manobras, etc. Esta decisão também visa minimizar a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo. Dois modelos foram propostos: o primeiro baseado apenas no conhecimento de especialistas e o segundo baseado na associação do conhecimento de especialistas e em pares de dados de entrada e saída. Testes foram realizados durante sete dias e os resultados dos dois modelos foram considerados satisfatórios.

Kuchar e Yang (2000) apresentaram uma pesquisa e discussão de 68 métodos de modelagem de detecção e resolução de conflitos de tráfego aéreo (*Conflict Detection and Resolution – CDR*). Um *framework* foi criado para categorizar estes diversos métodos, levando em consideração as dimensões da informação de estado (vertical, horizontal ou tridimensional), métodos da propagação dinâmica (nominal, pior caso, probabilístico), limites de detecção de conflitos, métodos de resolução de conflitos (pré-estabelecidos, otimizados ou manual), dimensões de manobras (mudança de velocidade, manobras laterais, verticais ou combinadas) e gerenciamento de conflitos de múltiplas aeronaves. Alguns destes modelos utilizam a lógica fuzzy como ferramenta de implementação.

Profillidis (2000) criou um método fuzzy e econométrico para previsão de crescimento do aeroporto de Rhodes. Neste método são analisados vários fatores referentes ao aeroporto: a relação entre transporte e atividades econômicas, previsão de crescimento do movimento de turistas em outros aeroportos, além de pesquisas de mercado, métodos estatísticos, entrevistas a especialistas, etc. A precisão das previsões realizadas foi satisfatória. Porém, o autor explicita a impossibilidade de se prever completamente o comportamento humano.

Camargo Júnior e Nascimento (2002) realizaram um estudo sobre a resolução de conflitos de aeronaves que estejam em rota de colisão em situação de cruzeiro. As técnicas de lógica fuzzy e algoritmos genéticos foram estudados para a resolução de tais conflitos. A lógica fuzzy foi utilizada principalmente pela natureza do tipo de vôo abordado: *Free Flight* – um conceito que proporciona flexibilidade na operação e no gerenciamento do tráfego aéreo, pois os pilotos podem gerenciar e modificar suas rotas dinamicamente, sem muitas vezes ter a necessidade da intervenção dos centros de controle de tráfego aéreo. Muitas destas ações envolvem termos lingüísticos e imprecisos, característicos da lógica fuzzy.

Rong (2002) desenvolveu um sistema hierárquico baseado em agentes que serve como um guia de vôo para aeronaves, livrando-as de conflitos com outras aeronaves ou do mau-tempo. Um dos principais agentes do sistema é o chamado “executivo”, responsável por

escolher a melhor rota para a aeronave, considerando os possíveis conflitos e consultando uma base de regras, e a lógica fuzzy exerce um papel fundamental nestas tomadas de decisões. Foi demonstrado através de testes que a abordagem proposta pode resolver satisfatoriamente conflitos de outros tráfegos e de mau-tempo combinados.

Gao et al. (2003) propuseram uma solução utilizando lógica fuzzy para resolver problemas de congestionamento nos aeroportos de grande movimento. A proposta visa evitar que as aeronaves fiquem esperando no solo por muito tempo, levando em consideração os possíveis congestionamentos do espaço aéreo e do aeródromo de destino. Os custos provindos do gasto de combustível em espera no solo chegam a 10 milhões de dólares anuais para as grandes companhias aéreas e o modelo se mostrou eficaz para uma simulação realizada pelos pesquisadores. Para um determinado exemplo, o método de FCFS (*first come, first served*) ocasionava 7 atrasos de vôos e originava um custo de 56,5 dólares por vôo atrasado. Porém, usando o modelo proposto, o número de atrasos caiu para 4 e o custo de atraso por vôo caiu para 35,8 dólares.

Hicks et al. (2003) propuseram um modelo fuzzy para previsão de teto²⁵ e visibilidade²⁶. A previsão destes elementos é importante para o controle de tráfego aéreo, pois em certas condições de teto e visibilidade as aeronaves não têm condições de pousar e são obrigadas a arremeter e prosseguir para um aeroporto alternativo, causando prejuízos para a empresa e aos passageiros. O sistema fuzzy de previsão conta com oito subsistemas fuzzy, quatro para teto e quatro para visibilidade. Resultados verificados por quase dois anos indicaram que o sistema proposto superou as previsões de órgãos oficiais de controle de tráfego aéreo.

Kessinger et al. (2003) criaram um classificador de eco radar (*Radar Echo Classifier – REC*), um sistema que utiliza lógica fuzzy para classificar os diversos tipos de objetos captados por radar *Doppler*, utilizados para previsão do tempo. O sistema elimina ruídos de ondas refletidos por edificações, árvores e também de certas condições atmosféricas (como granizo e inversão térmica), possibilitando uma previsão do tempo mais eficaz.

Boles (2005) descreveu o desenvolvimento de um sistema criado pela *British Aerospace (Bae) Systems* para eliminar interferências nos radares dos controladores de tráfego aéreo produzidas pelas turbinas das torres de produção de energia eólica da Inglaterra. A rotação das lâminas destas turbinas causa uma visualização na tela dos radares semelhante à de uma aeronave. Houve casos de fechamento de aeroportos por causa deste problema, a

²⁵ Altura da base da nuvem.

²⁶ Visibilidade horizontal, livre de precipitações como chuva, nevoeiro, fumaça, etc.

interferência se torna inaceitável se estes campos de torres estiverem em um raio de 60 milhas do aeroporto. Com auxílio da lógica fuzzy, a *Bae Systems* criou um software que capta o sinal emitido por essas turbinas e filtra-o para que não seja exibido nas telas dos radares.

Lindholm (2005) desenvolveu uma ferramenta para informação e alerta dos principais perigos meteorológicos relacionados à aviação, como os diversos tipos de turbulência e granizo, e também informações importantes para a segurança da navegação aérea, como valores de teto e visibilidade nos aeroportos e informações meteorológicas de áreas remotas e oceânicas. O método de previsão de tempo utiliza a lógica fuzzy e um *framework* para sistemas especialistas. O desenvolvimento desta ferramenta foi significativo para a eficiência do sistema aeroespacial estadunidense, por possibilitar uma grande melhoria na visualização das informações para os usuários finais, como pilotos e controladores de tráfego aéreo. Esta visualização inclui desde imagens em tempo-real até gráficos quadridimensionais.

Após esta revisão bibliográfica, percebe-se que o controle de tráfego aéreo é uma área de significativas e recentes pesquisas. Também é perceptível que a lógica fuzzy é aplicável a diversos aspectos do controle de tráfego aéreo, como auxílio ao controle de fluxo de aeronaves, auxílio à navegação aérea, previsão meteorológica e controle radar. Contudo, após buscas exaustivas, não foi encontrada até o momento nenhuma referência da lógica fuzzy tradicional e nem do tipo 2 para tomada de decisão no controle de tráfego aéreo associada ao cenário definido anteriormente, em nenhum aspecto, configurando-se desta forma, a característica inovadora e desafiante deste trabalho.

4. Desenvolvimento

Neste capítulo é abordado o roteiro da pesquisa bibliográfica e as etapas de uma metodologia para a modelagem de sistemas fuzzy tipo 2 aplicada ao problema proposto. Posteriormente são abordados todos os elementos que foram necessários para a construção de um *framework*, utilizado para a criação de sistemas fuzzy tipo 2 TSK de ordem 0 intervalar (conforme justificativa no capítulo 5).

4.1. Roteiro da pesquisa

A pesquisa bibliográfica foi dividida em três etapas, quais sejam, teoria de lógica fuzzy tipo 2, a aplicação de lógica fuzzy no controle de tráfego aéreo e os aspectos técnicos deste problema específico (estudo de caso). Com relação à teoria de lógica fuzzy tipo 2, foi consultado principalmente o livro do professor Jerry Mendel (2001) – *Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions* – e também artigos de Mendel e Karnik, que tiveram destaque na proposição e desenvolvimento da lógica fuzzy tipo 2. Foram coletados artigos de diversos sites de universidades e portais, como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, *Centre for Computational Intelligence (CCI) De Montfort University* e o portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Com estes estudos foi possível realizar um levantamento das suas principais tendências e propostas de aplicações.

Para identificar em quais áreas do controle de tráfego aéreo mundial a lógica fuzzy tem sido utilizada, foram feitas consultas a diversos artigos de centros de pesquisas de universidades, do *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, do portal do IEEE e do portal *Elsevier*.

Quanto aos aspectos técnicos do estudo de caso, foi necessário o acesso a documentos e regulamentos expedidos por órgãos gestores e reguladores do controle do espaço aéreo, a exemplo do Ministério da Defesa brasileiro. Tais documentos são de acesso público e disponíveis por meio eletrônico (sites oficiais) e também na forma impressa que podem ser encontrados nos órgãos de controle do espaço aéreo brasileiro. O principal deles é a *ICA 100-12 Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo* (Instrução do Comando da Aeronáutica) que trata das normas inerentes às regras de utilização do Espaço Aéreo Brasileiro e dos serviços de tráfego aéreo.

Outro modo de consultar e agregar informações ao projeto foi através de pesquisa de campo. Geograficamente esta pesquisa aconteceu em duas cidades: Salvador e Brasília. Salvador foi escolhida por ser o local de residência do autor, facilitando o contato com os controladores de tráfego aéreo, uma vez que este também atua profissionalmente como controlador e tem livre acesso à torre de controle. Brasília foi o outro local utilizado para a realização de entrevistas e pesquisa de informações, devido a uma oportunidade de viagem operacional relacionada ao serviço de controle de tráfego aéreo.

A entrevista com controladores de tráfego aéreo de outra localidade foi importante para perceber como estes profissionais utilizam as mesmas variáveis lingüísticas em tomadas de decisões semelhantes. Porém, observa-se que a definição de cada termo lingüístico de cada variável possui valores diferentes em cada região. Além de entrevistas feitas a controladores de tráfego aéreo, também foram realizadas entrevistas a pilotos de aeronaves, a fim de coletar informações utilizadas na etapa de modelagem do sistema. As entrevistas com especialistas são essenciais para o desenvolvimento de sistemas fuzzy (BABÍĆ; KRSTIĆ, 2000; KARNIK; MENDEL, 1999; MENDEL, 2003a). Estas informações são utilizadas para a definição de funções de pertinências individuais que, no âmbito global, refletem a existência de incertezas sobre as palavras (MENDEL, 2003a). Neste sentido, uma metodologia adequada é proposta e aplicada a fim de padronizar e maximizar a eficiência das entrevistas para o resgate de informações com qualidade, necessárias à construção do modelo de inferência fuzzy.

O livre acesso às dependências da torre de controle de Salvador para a pesquisa de campo foi de grande importância, pois algumas fases do desenvolvimento do sistema foram realizadas *in loco*, através de entrevistas e observação dos controladores de tráfego aéreo em exercício da função. Além disso, equipamentos utilizados em medição de alguns dados usados no sistema se encontram naquele recinto.

Ainda para a modelagem, foi necessário consultar a carta geográfica do Aeroporto Internacional de Salvador Deputado Luís Eduardo Magalhães (ANEXO 4) a fim de extrair os dados dimensionais das *taxiways* envolvidas no projeto.

4.2. Metodologia

Para a realização do estudo de caso foi elaborada uma metodologia formada por quinze passos com suas respectivas diretrizes. O resultado de sua aplicação no estudo de caso proposto é apresentado no capítulo 5. O objetivo desta metodologia também é de propor um caminho para realização de futuras pesquisas e futuras modelagens para outros aeródromos.

Passo 1 – Elaboração de questionários iniciais

Primeiramente é necessária a criação de um formulário para entrevistar controladores de tráfego aéreo numa abordagem mais generalizada, uma vez que a pesquisa ainda se encontra no início. Este formulário deve conter questões que possibilitem:

- 1 – Coletar os critérios que os controladores de tráfego aéreo utilizam para tomar a decisão de autorização de decolagens;
- 2 – Auxiliar com informações necessárias para a delimitação do escopo do cenário da tomada de decisão;
- 3 – Perceber se realmente os termos utilizados na tomada de decisão são lingüísticos e possuem limites incertos ou imprecisos quanto às suas definições;
- 4 – Coletar dados iniciais para a modelagem de algumas variáveis lingüísticas;
- 5 – Perceber alguma relevância para a proposta de criação do modelo de tomada de decisão.

Além destas questões, outras podem ser acrescentadas a fim de esclarecer melhor a função de controle de tráfego aéreo.

Também é necessária a criação de um questionário para entrevistar pilotos de aeronaves em geral, não sendo necessário especificar uma classe de pilotos. Este formulário deve conter questões que possibilitem:

- 1 – Identificar quais fatores meteorológicos influenciam na velocidade da aeronave em táxi e em aproximação para pouso;
- 2 – Analisar o comportamento dos pilotos quanto ao recebimento e cumprimento dos diferentes tipos de autorizações emitidas pelos controladores de tráfego aéreo;
- 3 – Auxiliar na modelagem de alguns termos lingüísticos, como por exemplo, valores limites de velocidade em táxi;
- 4 – Auxiliar com informações necessárias para a delimitação do escopo do cenário de tomada de decisão;
- 5 – Perceber alguma relevância para a proposta de criação do modelo de tomada de decisão.

Passo 2 – Entrevista com controladores de tráfego aéreo

Esta etapa corresponde à aplicação do questionário confeccionado no passo 1 a controladores de tráfego aéreo de um determinado aeródromo, cujo modelo se aplicará. Para se obter uma maior riqueza de informações, é recomendável que se entreviste controladores de tráfego aéreo com diferentes tempos de serviço, sexo e idade.

Como esta entrevista não tem caráter estrito de coleta de dados para modelagem de termos lingüísticos, ela poderá ser feita em um ambiente externo à torre de controle, como por exemplo, em uma sala de reuniões ou sala de descanso.

Passo 3 – Entrevista com pilotos

Esta etapa corresponde à aplicação do questionário confeccionado no passo 1 a pilotos que, de preferência, trafegam no mesmo aeródromo alvo do estudo de caso. Para se obter uma maior riqueza de informações, é recomendável que se entreviste pilotos experientes.

Assim como no passo anterior, esta entrevista não tem caráter estrito de coleta de dados para modelagem de termos lingüísticos, portanto ela poderá ser feita em qualquer ambiente em que se consiga ter atenção do piloto, como em uma sala de reuniões ou sala de descanso.

Passo 4 – Escolha da categoria de aeronaves

O modelo a ser criado depende dos tipos das aeronaves envolvidas – a que está por decolar e a que está por pousar.

Se um tipo de aeronave *A* está por decolar e um tipo de aeronave *B* está por pousar, teremos um modelo *M1* de tomada de decisão. Se invertermos as posições – *A* está por pousar e *B* está por decolar – então teremos um modelo *M2* de tomada de decisão. Isso ocorre pois as variáveis lingüísticas usadas na tomada de decisão mudam de acordo com o tipo de aeronave em uma dada posição do modelo. Por exemplo, um Fokker 50 pode ter apenas 2 termos lingüísticos para velocidade em táxi – lenta e normal – enquanto que um Boeing 777 pode ter 4 termos – lenta, normal, alta e muita alta. Além da quantidade de termos, as definições dos termos podem variar para cada tipo de aeronave.

Para efeito de modelagem, tipo ou categoria de aeronave corresponde ao conjunto de aeronaves que possuem mesmo desempenho nas posições estratégicas utilizadas na modelagem – segmento de aproximação final para pouso e táxi para decolagem. Por exemplo, Boeing 737, Fokker 100 e Airbus 320 pertencem a uma mesma categoria de aeronaves – possuem praticamente mesmo desempenho no táxi e na aproximação final para pouso.

Para uma categoria de aeronaves é possível criar um modelo – *A* decolando e *A* pousando. Para duas categorias é possível criar quatro modelos – *A* decolando e *A* pousando, *B* decolando e *B* pousando, *A* decolando e *B* pousando, *B* decolando e *A* pousando. Para três categorias de aeronaves é possível criar nove modelos, ou seja, a máxima quantidade de modelos de tomada de decisão é diretamente proporcional ao quadrado do número de diferentes categorias de aeronaves.

Para uma possível implantação de um sistema automatizado que contemple estes modelos, é necessário identificar todas as categorias de aeronaves que trafegam naquele aeródromo e produzir seus respectivos modelos para posterior implementação e implantação.

Passo 5 – Escolha do grupo de especialistas

Faz-se necessário designar um grupo especial de controladores de tráfego aéreo, identificado como *grupo de especialistas*. Este grupo tem a finalidade de ajudar em etapas específicas que necessitam de uma atenção mais apurada por parte do controlador de tráfego aéreo. Estas etapas se destinam à extração de conhecimento técnico e especialista que são compostas por: definição dos conjuntos fuzzy tipo 2, construção da tabela de decisão e validação do sistema.

Para escolher os membros deste grupo foram usados os seguintes critérios:

- 1 – Ser controlador de tráfego aéreo do aeródromo alvo do projeto;
- 2 – Ter no mínimo cinco e no máximo quinze anos de experiência em controle de tráfego aéreo de torre de controle²⁷.

Estas medidas são propostas para tentar ao máximo escolher profissionais que tenham uma experiência considerável e conhecimento da área de controle do aeródromo proposto. Mesmo um controlador experiente de outra localidade, ao chegar a um novo órgão de controle, deve passar por uma fase de adaptação para adquirir conhecimento da área e adequação de suas competências para os novos parâmetros do local. A limitação de tempo de serviço em quinze anos visa eliminar os casos em que haja controladores de tráfego aéreo desgastados pela profissão e que muitas vezes já não usam sua capacidade cognitiva por completo.

Uma característica importante que cada membro deste grupo deve ter é o cumprimento e comprometimento do item 10.1.1 da ICA 100-12, cujo texto instrui os controladores de tráfego aéreo a controlarem as aeronaves para que haja um tráfego seguro, ordenado e rápido (BRASIL, 2006).

Passo 6 – Definição das variáveis lingüísticas

Esta etapa consiste em escolher quais as variáveis lingüísticas que serão utilizadas no modelo. Para isso, primeiramente, é necessário listar todos os elementos que são utilizados pelos controladores de tráfego aéreo para a tomada de decisão do cenário em questão. Também é necessário identificar qual a variável que corresponde à saída do sistema, ou seja, o

²⁷ Em geral, no Brasil, um controlador de tráfego aéreo trabalha no máximo 30 anos.

resultado do processo de tomada de decisão. Estes elementos são extraídos do formulário criado no passo 1 e preenchido no passo 2.

Após a listagem, selecionam-se os primeiros ou todos os itens. Neste ponto é importante fazer uma análise de viabilidade de utilização dos elementos envolvidos, pois nem sempre o uso de todos será factível, seja pela impossibilidade de coleta de dados ou por limitações computacionais de processamento (WU; TAN, 2005), como por exemplo, sistemas que usam centenas de variáveis de entrada para gerar uma saída em tempo real.

Também é importante definir nesta etapa o universo de discurso para cada variável lingüística do modelo. Esta informação pode ser obtida através de informações dos formulários criados no passo 1.

Passo 7 – Classificação dos termos lingüísticos

Uma variável lingüística pode possuir diversos termos. O projetista é livre para escolher a quantidade de termos de cada variável (MENDEL, 2001, p. 80), porém esta escolha deve ser cuidadosa, pois quantidades excessivas de termos podem afastar o modelo do que ele representa, tornando-o inconsistente. Esta quantidade deve ser a mais próxima possível da realidade, pois os controladores de tráfego aéreo, em outras fases, utilizarão estes termos para tomarem decisões. Além disso, os termos devem ser rotulados de acordo com a sua representatividade, como no exemplo mostrado em (40). Para ilustrar, *muito baixa* é um conjunto que contém valores de pressão que realmente são muito baixos, e assim por diante.

$$Pressão = \{ \textit{muito baixa}, \textit{baixa}, \textit{normal}, \textit{alta}, \textit{muito alta} \} \quad (40)$$

Poderíamos acrescentar infinitos termos, como *pouco acima do normal*, *pouco alta*, *excessivamente alta*, etc. Porém, devemos definir uma quantidade finita e com um menor número possível de termos, sem perder a significância do modelo, pois quanto maior for a quantidade de termos utilizados, maior será o tempo de resposta deste processamento.

Nesta etapa, com auxílio do grupo de especialistas, deverá ser feita a discriminação de todos os termos lingüísticos associados a cada variável definida no passo 6. Esta discriminação pode ser feita na forma de tabela ou por enumeração dos termos entre chaves, como apresentado em (40).

Passo 8 – Elaboração de formulários coletores para modelagem

Para a definição dos conjuntos fuzzy – que representam os termos lingüísticos – é necessária a criação de formulários para coletar dados característicos de cada função de pertinência definida para cada variável de entrada. Preferencialmente este formulário deve

conter quadros que representem as variáveis lingüísticas como exemplificado na Figura 20. A linha inferior do quadro representa o universo de discurso e a linha vertical esquerda representa a reta de graus de pertinência. Dentro de cada quadro o controlador de tráfego aéreo deverá desenhar os conjuntos fuzzy que representam todos os termos lingüísticos daquela variável.

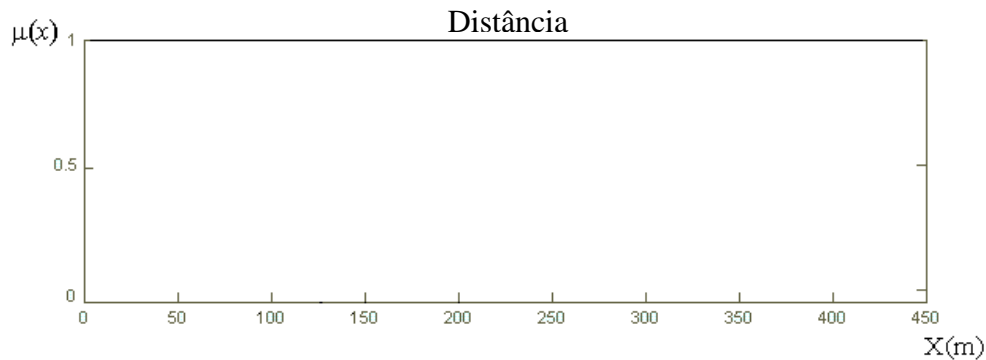


Figura 20. Quadro para preenchimento dos conjuntos fuzzy para a variável *Distância*

Outro formulário essencial para modelagem refere-se à tabela de decisão ou tabela de regras fuzzy (Tabela 1). Este formulário deverá ser confeccionado no formato de tabela, onde deve ser reservado uma coluna para cada variável fuzzy, sendo a última reservada para a variável do conseqüente. As células abaixo de cada variável serão preenchidas com termos lingüísticos que representam as decisões tomadas pelos controladores de tráfego aéreo especialistas sobre o cenário proposto.

Tabela 1. Exemplo de formato de tabela de regras fuzzy.

Nº	Condição (Antecedentes)				Conse- qüente
	Variável-1	Variável -2	...	Variável -n	
1					
2					
3					
4					

Passo 9 – Coleta de dados para modelagem

Todos os formulários criados no passo 8 devem ser preenchidos por controladores de tráfego aéreo do grupo de especialistas e, ao contrário do que ocorreu com os formulários iniciais, estes devem ser preferencialmente preenchidos no local de trabalho, pois a percepção dos limites dos conjuntos fuzzy e o processo de decisão estão intimamente ligados à visão real do cenário.

Antes do controlador de tráfego aéreo desenhar os conjuntos fuzzy, é importante explicar-lhe o que são conjuntos fuzzy, função de pertinência e dar-lhe um exemplo. Uma

sugestão é exemplificar o funcionamento de um sistema fuzzy aplicado no trânsito. O sistema tem como variável de entrada o fluxo de automóveis, e a saída é o tempo em que o sinal permanecerá com a luz verde. O fluxo de automóveis pode ser medido através de um sensor e seus termos podem ser identificados como *nenhum*, *baixo*, *normal* e *alto*, a unidade de medida seria automóveis por segundo (Figura 21). O tempo de permanência da luz verde pode ser classificado como: *nenhum*, *pouco*, *normal* e *muito*, medido em segundos.

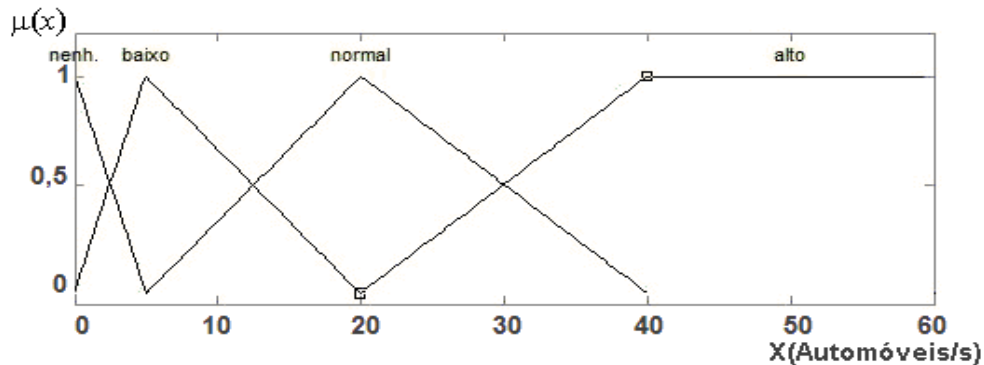


Figura 21. Descrição gráfica da variável velocidade – para automóveis

Também é importante falar das principais formas de conjuntos fuzzy e grau de pertinência. Citar alguns equipamentos e sistemas que usam fuzzy também é importante, pois mostrará que a lógica fuzzy não está tão distante de nós, e que possui grande aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento.

A coleta de dados através destes dois formulários deve ser feita, preferencialmente, durante o dia e no início do turno de serviço, a fim de eliminar os possíveis ruídos ocasionados pelo cansaço da jornada de trabalho.

Passo 10 – Modelagem do sistema

De forma geral, a modelagem de um sistema de inferência fuzzy compreende as seguintes etapas:

1 – Definição das variáveis lingüísticas de entrada e saída, assim como seus termos – realizadas nos passos 6 e 7. Também é necessário a definição dos universos de discurso para cada variável, utilizando informações coletadas nos passos 2 e 3;

2 – Definição dos conjuntos fuzzy para cada variável, através dos dados coletados no passo 9, assim como suas formas geométricas;

3 – Definição das regras fuzzy, através das informações coletadas do grupo de especialistas, realizada no passo 9;

4 – Escolha do modelo de sistema fuzzy tipo 2 apropriado;

5 – Escolha do método de inferência;

6 – Escolha do método de redução de tipo;

7 – Escolha do método de defuzzificação.

Passo 11 – Implementação

De acordo com o modelo de sistema escolhido um *framework* deverá ser utilizado ou adaptado para tal sistema, levando em consideração suas particularidades de modelagem, descritas no passo anterior. O *framework* criado para o estudo de caso proposto é detalhado na seção 4.3 e pode ser utilizado como base para o desenvolvimento de outros sistemas com características diferentes – outros modelos de sistemas, outros métodos de inferência, outro redutor de tipo ou outro método de defuzzificação.

Passo 12 – Coleta de dados para validação

Para a validação do modelo, propõe-se checar as decisões resultantes da saída do sistema com as reais decisões tomadas pelos controladores de tráfego aéreo. Para isso é necessário coletar os dados utilizados na tomada de decisão – valores das variáveis de entrada, assim como as decisões tomadas pelos controladores de tráfego aéreo e respostas do sistema – valores da variável de saída. Este formulário pode ser criado no formato de tabela e deve conter, além das informações citadas, a data e os tipos das aeronaves envolvidas. É recomendável que o primeiro registro desta tabela seja um exemplo, para facilitar o entendimento do controlador de tráfego aéreo.

Passo 13 – Validação

Esta etapa consiste em checar o quanto similar são as decisões tomadas pelos controladores de tráfego aéreo e os resultados obtidos pelo modelo, dadas as mesmas condições de ambiente – valores idênticos das informações utilizadas na tomada de decisão. Para esta avaliação, é necessário acompanhar os controladores de tráfego aéreo especialistas em operação para análise da tomada de decisão. Para isto, a seguinte metodologia deve ser adotada:

1 – Registrar a situação que envolve a tomada de decisão, anotando os valores numéricos citados a seguir (velocidade da aeronave que irá decolar, distância desta ao ponto de espera, velocidade da aeronave que se aproxima para pouso e distância desta à cabeceira da pista), levando em consideração todas as restrições de operação definidas na seção 5.2;

A – Velocidade da aeronave que está por decolar – esse valor pode ser obtido através da leitura da velocidade indicada em radar de solo, ou na inexistência deste, através de uma rápida pergunta ao piloto, em momento oportuno;

B – Distância da aeronave que está por decolar ao ponto de espera – o valor pode ser obtido através da avaliação visual tomando como base marcos terrestres como luzes de pista ou outras *taxiways*;

C – Velocidade da aeronave que se aproxima para pouso – o valor pode ser obtido através de equipamento de visualização radar, ou outro dispositivo aplicável, como o Terminal Radar de Imagem Sintética (TARIS)²⁸;

D – Distância da aeronave que se aproxima para pouso à cabeceira da pista – esta informação também pode ser obtida através de equipamento de visualização radar, ou outro dispositivo aplicável, como o TARIS.

2 – Registrar a decisão tomada pelo controlador de tráfego aéreo em questão, completando assim, um caso de tomada de decisão;

3 – Registrar a máxima quantidade possível de casos. Para se obter uma considerável representatividade de situações, sugere-se, empiricamente, pelo menos cem casos;

4 – Realizar comparações dos resultados obtidos pelo sistema fuzzy tipo 2 e por outros sistemas, como por exemplo, sistemas fuzzy tipo 1 de cada especialista. Tal comparação visa identificar qual sistema mais se aproxima das decisões reais dos controladores de tráfego aéreo²⁹. Deve-se registrar se houve similaridade, desvios ou contradições nas respostas.

Cabe ressaltar que ainda não existe qualquer tipo de sistema que possa ser utilizado para comparar com o modelo fuzzy tipo 2 para avaliação de autorização de decolagem do cenário proposto. Por este motivo sugere-se utilizar os sistemas fuzzy tipo 1 criados a partir dos conjuntos fuzzy tipo 1 desenhados por cada especialista no passo 9.

Os controladores de tráfego aéreo que farão parte desta fase de validação devem ser os mesmos componentes do grupo de especialistas selecionados. É importante salientar que este método de validação tenta evitar ao máximo interferências na tomada de decisão do controlador avaliado. Os valores das variáveis deverão ser coletados da forma mais discreta possível para que o controlador de tráfego aéreo não perceba tal procedimento e não seja influenciado nas decisões de controle.

²⁸ Equipamento que possibilita o controlador de tráfego aéreo a visualizar os tráfegos, por repetição de imagem radar, facilitando a busca visual dos mesmos, auxiliando no planejamento global das tarefas de controle de tráfego aéreo (AEROESPAÇO, 2006). Foto 3 no Anexo 2.

²⁹ Para esta metodologia, considera-se que todas as autorizações emitidas pelos controladores de tráfego aéreo foram bem sucedidas. O objeto de avaliação é qual o modelo que melhor representa as autorizações reais: o fuzzy tipo 2 ou fuzzy tipo 1 de algum dos especialistas.

Passo 14 – Ajuste do modelo

Verificou-se na literatura relacionada que é uma prática comum ocorrer a re-análise e remodelagem de variáveis lingüísticas e regras fuzzy. Esta etapa destina-se a esta revisão e ajustes dos valores semânticos e das regras fuzzy do modelo a partir dos resultados gerados com avaliações preliminares. Após isto, é necessário realizar uma validação do modelo.

Passo 15 – Finalização

Esta etapa é destinada à análise dos resultados obtidos na validação e discussão do sistema. A criação de tabelas e gráficos auxilia no entendimento das informações a serem mostradas. A superfície de solução³⁰ do sistema também é um recurso que pode ser usado para mostrar graficamente parte do sistema, respeitadas as limitações dimensionais.

4.3. Framework

Existem muitas ferramentas de implementação para sistemas fuzzy tradicional, como UNFUZZY[®], FUZZYTECH[®], NRC Fuzzy[®] para Java e *toolbox* para o SCILAB[®] e para o MATLAB[®]. Porém, não existe, até o momento, nenhuma ferramenta completa para sistemas fuzzy tipo 2. Entretanto, o MATLAB[®] tem sido o ambiente de desenvolvimento de sistemas fuzzy tipo 2 mais utilizado por pesquisadores, a exemplo Homaifar et al. (2001), Innocent et al. (2001), Castillo e Melin (2003), Kaur e Wilson (2004), Wu e Tan (2004b), Sepúlveda et al. (2005) e Astudillo et al. (2006). Mendel (2001) disponibilizou algumas funções³¹ fuzzy tipo 2 para MATLAB[®] que podem ser utilizadas para construção de sistemas fuzzy tipo 2. Cabe salientar que não são sistemas completos e também não contemplam todas as variações da lógica fuzzy tipo 2. Portanto, houve a necessidade da criação deste *framework* para ser utilizado no estudo de caso. Para esta criação, algumas funções de Mendel foram utilizadas como guia de desenvolvimento.

4.3.1. A arquitetura do *framework*

O *framework* é composto por um conjunto de funções e rotinas que definem um sistema fuzzy tipo 2 TSK de ordem 0 intervalar, como é justificado no capítulo 5. A estrutura que representa a sua arquitetura é ilustrada na Figura 22.

³⁰ Superfície gráfica usada para mostrar a dependência de uma variável de saída sobre uma ou mais variáveis de entrada (THE MATHWORKS INC, 1999).

³¹ Estas funções podem ser obtidas através do site [http:// sipi.usc.edu/~mendel/software](http://sipi.usc.edu/~mendel/software).

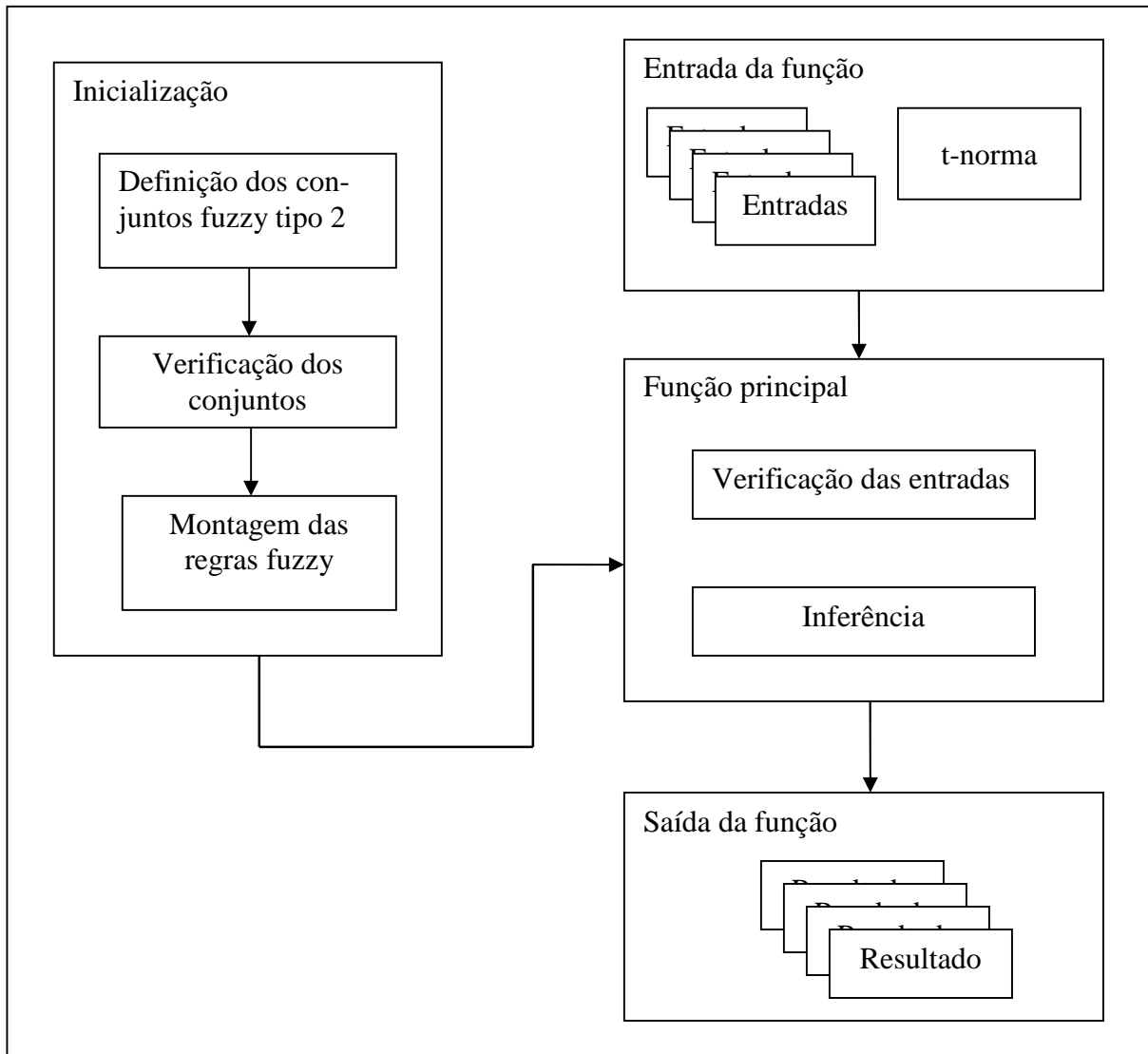


Figura 22. Arquitetura do *framework*

Na entrada do sistema são encontrados dois argumentos: Uma coleção de dados de entrada em forma de matriz, em que cada linha contém valores das variáveis de entrada, e o segundo argumento é uma t-norma que será utilizada pela operação *meet* no processo de inferência.

No arquivo de inicialização são realizadas três rotinas: definição dos conjuntos fuzzy tipo 2, verificação dos conjuntos e montagem das regras fuzzy.

A definição dos conjuntos é feita através da declaração de variáveis reais na forma de vetor que contém os vértices dos trapézios que representam os conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares trapezoidais. Com base na Figura 23, cada vetor deve ser declarado com a seguinte ordenação genérica: [A1 B1 C1 D1 A2 B2 C2 D2]. Onde o índice 1 representa pontos do trapézio externo e o índice 2 representa os pontos do trapézio interno.

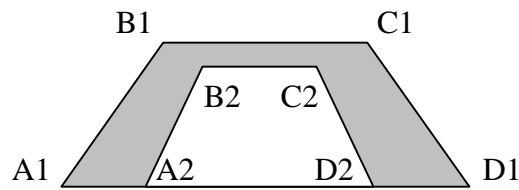


Figura 23. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal

Conjuntos fuzzy tipo 2 triangulares também podem ser contemplados nesta definição de conjuntos trapezoidais. Um triângulo pode ser definido como um trapézio degenerado, onde os vértices B e C são coincidentes (Figura 24).

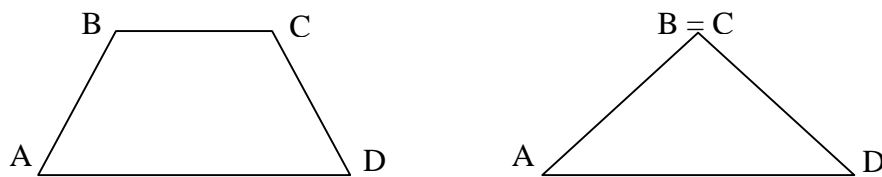


Figura 24. Triângulo como trapézio degenerado

Em algumas circunstâncias, para modelar a realidade do comportamento de variáveis lingüísticas, é necessário que o grau de pertinência máximo de um conjunto seja menor que um. Em um triângulo isto é feito através de um trapézio com os vértices B e C invertidos (JANG, 2002), como na Figura 25.

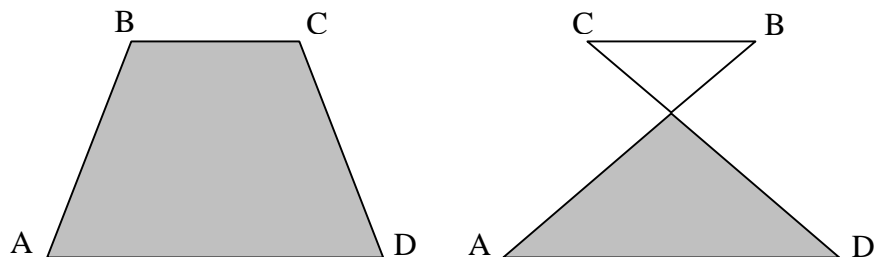


Figura 25. Triângulo com grau de pertinência máximo menor que 1

Através destas propriedades mencionadas, é possível tratar vários tipos de trapézios e triângulos, como descritos a seguir:

Caso 1 – Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal completo (Figura 26). Os parâmetros seguem a seqüência: $[A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2]$.

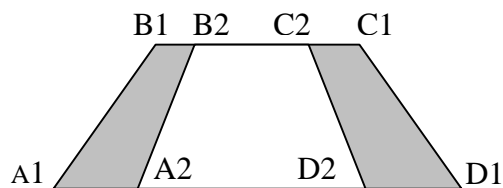


Figura 26. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal completo

Caso 2 – Conjunto fuzzy tipo 1 trapezoidal (Figura 27). Neste caso, este conjunto pode ser interpretado como um conjunto fuzzy tipo 2 degenerado, onde $A1 = A2$, $B1 = B2$, $C1 = C2$ e $D1 = D2$. Portanto, a declaração do vetor fica na forma $[A1, B1, C1, D1, A1, B1, C1, D1]$.

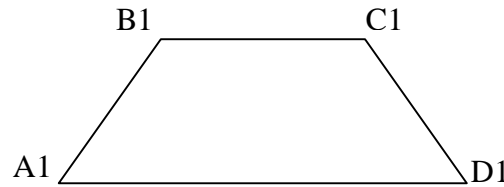


Figura 27. Conjunto fuzzy tipo 1 trapezoidal

Caso 3 – Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar triangular (Figura 28). Neste caso, fazendo os pontos $B1 = B2 = C1 = C2$, o trapézio intervalar torna-se um triângulo intervalar. Os parâmetros do vetor podem ser declarados como: $[A1, B1, C1, D1, A2, B1, C1, D2]$.

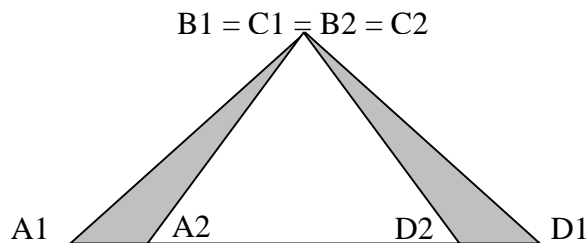


Figura 28. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar triangular

Caso 4 – Conjunto fuzzy tipo 1 triangular (Figura 29). Este conjunto pode ser interpretado como um trapézio degenerado, com $B1 = C1 = B2 = C2$, e com os pontos de índice 2 igual aos de índice 1. Os parâmetros podem ser: $[A1, B1, C1, D1, A1, B1, C1, D1]$.

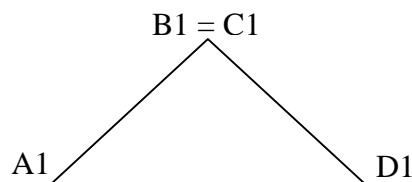


Figura 29. Conjunto fuzzy tipo 1 triangular

Caso 5 – Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal com um lado vertical (Figura 30). Neste caso, $B1$ e $B2$ são coincidentes e sua projeção no eixo X é coincidente com os pontos $A1 = A2$. Os parâmetros podem ser declarados como: $[A1, B1, C1, D1, A1, B1, C2, D2]$.

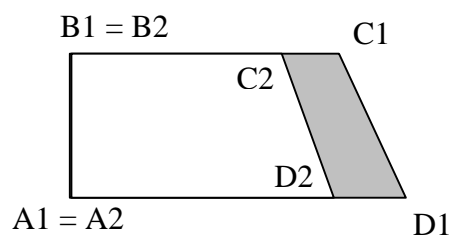


Figura 30. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal com um lado vertical

Caso 6 – Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar triangular com um lado vertical (Figura 31). Os pontos B_1, B_2, C_1 e C_2 são coincidentes e suas projeções no eixo X são coincidentes com os pontos $A_1 = A_2$. Os parâmetros do vetor podem ser declarados como: $[A_1, B_1, C_1, D_1, A_1, B_1, C_1, D_2]$.

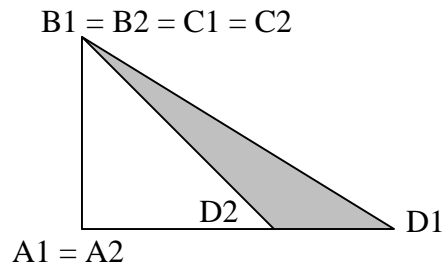


Figura 31. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar triangular com um lado vertical

Caso 7 – Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal com a função inferior degenerada para triângulo (Figura 32). A principal característica deste caso é a inversão de posição dos pontos B_2 e C_2 . Esta inversão provoca uma torção no trapézio interno criando dois triângulos. O triângulo com base no eixo X é o que terá validade no sistema como função de pertinência inferior. Outra característica deste caso é o formato pontiagudo das extremidades. Este efeito é criado através da igualdade $A_1 = A_2$ e $D_2 = D_1$ e pode ocorrer independentemente da função interna ser triangular. Os parâmetros do vetor podem ser declarados como $[A_1, B_1, C_1, D_1, A_1, B_2, C_2, D_1]$, com $C_2 \leq B_2$.

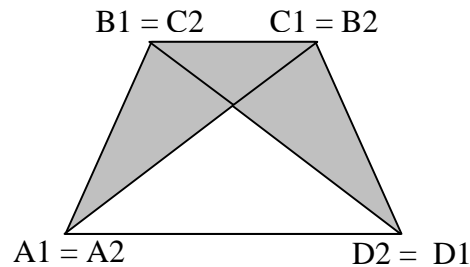


Figura 32. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal com extremidades agudas e função inferior triangular.

Estes foram os principais tipos de conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares trapezoidais e suas degenerações. Outros formatos também podem ser utilizados por este sistema, desde que se configurem casos degenerados do caso 1.

A verificação dos conjuntos é uma rotina do arquivo de inicialização que verifica a validade matemática dos conjuntos previamente definidos. Com base na Figura 23, os conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares trapezoidais devem satisfazer as seguintes condições:

$$A_1 \leq B_1, C_1 \leq D_1, A_2 \leq B_2 \text{ e } C_2 \leq D_2 \quad (41)$$

$$A_1 \leq A_2, B_1 \leq B_2, C_2 \leq C_1 \text{ e } D_2 \leq D_1 \quad (42)$$

Se a condição mostrada em (41) não for satisfeita, o trapézio poderá ter a base superior maior que a inferior, o que é infactível para representação de conjuntos fuzzy. A condição mostrada em (42) é necessária para separar o que é o trapézio externo e o que é o trapézio interno de um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar. Como já mencionado, é admissível que $C1$ seja menor que $B1$ e que $C2$ seja menor que $B2$, possibilitando a utilização de triângulos para representar tais conjuntos fuzzy.

Caso algum dos conjuntos fuzzy tipo 2 não satisfaça as condições (41) e (42), não será possível dar continuidade ao processamento do sistema, então o sistema exibirá uma mensagem informando o tipo de erro e solicitação para o correto ajuste.

A última parte do arquivo de inicialização é a montagem das regras fuzzy. Ela é feita pelo usuário de modo bem simples, como mostrado na Tabela 2.

As regras estão contidas em uma variável do tipo vetor, com dimensões $(m \times 8 \cdot n + 1)$, onde m é o número de regras e n é o número de variáveis de entrada. O número 8 representa a quantidade de pontos representativos de cada conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal e o número 1 contabiliza a constante no conseqüente, considerando que foi utilizado um modelo TSK tipo 2 de ordem 0.

As palavras que representam os conjuntos fuzzy tipo 2 devem estar em uma ordem lógica, pois o processo de fuzzificação depende desta ordem para calcular o grau de pertinência dos valores de entrada do sistema. Portanto, a seguinte ordem de preenchimento deve ser estabelecida:

Tabela 2. Tabela de regras fuzzy.

	antecedentes				conseqüente
	variável 1	variável 2	...	variável n	variável saída
regra 1:					
regra 2:					
regra 3:					
regra 4:					
...					
regra m					

Em seguida é apresentado um exemplo de utilização do arquivo de inicialização. Considere que as variáveis fuzzy de entrada sejam a distância e a velocidade de um ciclista que está prestes a se chocar com um carro, e a variável de saída seja a pressão que ele deve empregar sobre os freios, desgastando-os o menos possível.


```

% Exemplo de aplicação do arquivo inicilizacao.m
% Definição de conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares trapezoidais

% Distância
perto = [0 0 4 12 0 0 4 10]
longe =[0 10 20 20 4 10 20 20]

% Velocidade
lento = [0 0 20 36 0 0 18 30]
veloz = [0 30 40 40 12 30 40 40]

% Pressão sobre os freios
fraco = 2
médio = 5
forte = 8

% rotina de verificação dos conjuntos
% de acordo com as condições mostradas em (41) e (42)

% Montagem das regras

Regras = [      perto      lento      médio
           perto      veloz      forte
           longe      lento      fraco
           longe      veloz      médio]

```

Figura 33. Exemplo do arquivo de inicialização

A leitura das regras fuzzy se faz de modo bem próxima ao entendimento humano, facilitando a compreensão do conhecimento especialista. Para o exemplo dado e considerando as entradas x_1 e x_2 , a leitura das regras fuzzy é feita da seguinte forma:

Se x_1 é perto e x_2 é lento, então freio será médio
 Se x_1 é perto e x_2 é veloz, então freio será forte
 Se x_1 é longe e x_2 é lento, então freio será fraco
 Se x_1 é longe e x_2 é veloz, então freio será médio

O exemplo dado representa então a configuração do arquivo de inicialização.

Continuando a descrição da arquitetura do sistema, a próxima parte consiste na função principal, que possui 2 rotinas. A primeira delas é a verificação das entradas, onde cada valor que entra no sistema é checado se está contido no universo de discurso de cada variável fuzzy. Caso negativo, uma mensagem de erro é exibida e a execução do sistema é interrompida. A outra rotina consiste na inferência do sistema. Nesta etapa as entradas são processadas e combinadas com as regras fuzzy a fim de originar uma saída, como descrito na seção 2.2.3. Portanto, na saída são encontrados valores resultantes de todo o processamento fuzzy sobre as entradas. Cada vetor de entradas origina três valores na saída: o limite esquerdo e direito do conjunto fuzzy tipo 1 intervalar e valor médio destes valores. O valor médio da saída é exibido para o usuário e representa a autorização sugerida pelo sistema, conforme é

apresentado na Tabela 6 do Capítulo 5. Detalhes deste *framework* são apresentados no próximo tópico.

4.3.2. Funções do *framework*

A maioria das funções disponibilizadas por Mendel referem-se a conjuntos fuzzy tipo 2 gaussianos. Uma adaptação foi necessária para que estas funções utilizem conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares trapezoidais – tipo de conjunto utilizado no projeto.

O trecho de código mostrado em (43) representa a chamada da função *TSK_TYPE2* desenvolvida por Mendel. Esta função serviu de base para a criação da função principal utilizada no *framework*.

$$[R1, R2, R] = TSK_TYPE2(X, M1, M2, sigma, C, S); \quad (43)$$

Esta função computa as saídas de um sistema fuzzy TSK tipo 2 onde os antecedentes são conjuntos fuzzy tipo 2 e os conseqüentes são conjuntos fuzzy tipo 1. Os conjuntos fuzzy tipo 2 são intervalares com função primária gaussiana com média incerta. X é uma matriz de entradas, ou seja, os valores numéricos das variáveis lingüísticas do sistema. $M1$, $M2$ e $sigma$ são matrizes $m \times n$ que contém as médias e dispersão dos antecedentes – m regras, com n antecedentes em cada regra. C e S são matrizes $m \times (n + 1)$ que representam o centro e a dispersão dos parâmetros dos conseqüentes. $R1$, $R2$ são matrizes que contém os limites esquerdo e direito dos conjuntos fuzzy tipo 1 resultantes do sistema e R é a média aritmética destes limites. $R1$ e $R2$ representam os limites da faixa de valores admissíveis como resposta da inferência. Caso a aplicação do sistema necessite de um único valor, então R é utilizado como resultado.

Seguindo a metodologia adotada por Mendel, uma função para um sistema TSK tipo 2 intervalar para conjuntos trapezoidais teria a seguinte forma:

$$[R1, R2, R] = TSK_TYPE2(X, A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, C, S); \quad (44)$$

Onde as matrizes $A1$, $A2$, $B1$, $B2$, $C1$, $C2$, $D1$ e $D2$ representariam os vértices dos trapézios externos e internos dos conjuntos fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidais (Figura 34), C e S representariam matrizes dos centro e das dispersões dos parâmetros dos conseqüentes.

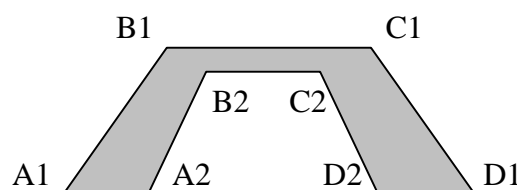


Figura 34. Ordem dos vértices de um trapézio fuzzy tipo 2 intervalar

As regras fuzzy estariam distribuídas ordenadamente entre as matrizes de pontos dos trapézios. Tal procedimento atrela as regras às formas dos conjuntos fuzzy tipo 2, o que dificulta o entendimento do sistema e também se demonstra desnecessário, uma vez que as regras fuzzy são partes do sistema que somente são modificadas em caso de remodelagem.

Com o intuito de facilitar a compreensão do sistema de inferência e torná-lo mais prático, foi realizada uma modificação na interface da função principal. Ao invés de se usar inúmeros argumentos, foram usados apenas dois: uma matriz de entradas e o método de inferência a ser usado. As outras informações – como regras fuzzy e definição dos conjuntos fuzzy tipo 2 – são usadas pelo sistema através da leitura de um arquivo auxiliar, dispensando a inserção na chamada de função.

Outra modificação realizada foi a simplificação de um sistema TSK de ordem 1 para ordem 0, por ser mais adequado ao problema proposto, onde as saídas do sistema são valores constantes. Para dar mais generalidade e flexibilidade à nova função, foi dada ao usuário a oportunidade de escolher o método de inferência que será utilizado pela operação *meet* no sistema: mínimo ou produto. A nova sintaxe da função é mostrada em (45).

$$[R1, R2, R] = TSK_TYPE2_0(X, tnorm) \quad (45)$$

A função $TSK_TYPE2_0(X, tnorm)$ computa a saída de um sistema TSK tipo 2 intervalar de ordem 0, onde os antecedentes são conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares trapezoidais ou triangulares e os conseqüentes são constantes. X é uma matriz ($L \times n$) onde L é a quantidade de casos³² a serem processados e n é o número de variáveis de entrada. $tnorm$ é a t-norma usada no processo de inferência do sistema (*meet*), e admite os seguintes valores: 0 (zero) para produto, ou qualquer valor diferente de zero para mínimo. $R1$, $R2$, e R são vetores que guardam os limites esquerdo e direito do conjunto fuzzy tipo 1 intervalar e a média aritmética entre eles, para cada linha da matriz X .

Foi necessária a criação de algumas funções para dar suporte à função $TSK_TYPE2_0(X, tnorm)$. Este procedimento foi importante para modularizar a função principal e dar mais legibilidade ao programa. Estas funções são descritas a seguir.

A função $TRAP_TYPE2(x, Params)$

Os conjuntos fuzzy tipo 2 a serem usados no projeto são todos trapezoidais ou triangulares. A função $TRAP_TYPE2(x, Params)$ calcula os graus de pertinência superior e

³² Um caso corresponde a uma utilização do sistema. Exemplo: Considerando o sistema da Figura 33 e os números a seguir sendo valores das variáveis lingüísticas, a entrada $X = [4, 15]$ corresponde a um caso, enquanto que $X = [2, 18; 5, 14; 18, 35]$ corresponde a três casos, ou seja, três avaliações do sistema.

inferior de um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal ou triangular. Esta função leva em consideração qualquer tipo de trapézio tipo 2 intervalar e suas degenerações, descritos na seção 4.3.1. A função $TRAPMF(x, Params)$ do MATLAB[®] serviu de base para a criação desta nova função.

A função possui a seguinte sintaxe:

$$[u, l] = TRAP_TYPE2(x, Params) \quad (46)$$

Onde:

u é o grau de pertinência superior.

l é o grau de pertinência inferior.

x é a variável do universo de discurso a ser avaliada.

$Params$ é um vetor com 8 elementos que correspondem aos vértices dos trapézios externos e internos respectivamente (Figura 35) ou alguma de suas degenerações, conforme abordado anteriormente. A ordem de entrada destes pontos é fundamental para o correto funcionamento da função e segue o padrão $[A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2]$.

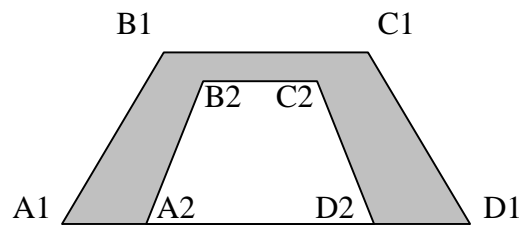


Figura 35. As oito constantes de um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal.

A função $CHK_ENTRIES(X)$

Esta função é usada internamente pela função $TSK_TYPE2_0(X, tnorm)$ para verificar se todos os valores da matriz de entradas X são válidos, tomando como referência os universos de discurso associados a cada variável lingüística, definidos internamente no arquivo desta função.

Esta função possui a seguinte sintaxe:

$$chk = CHK_ENTRIES(X) \quad (47)$$

Onde:

chk retorna 1 se todos os valores da matriz X estão corretos, ou retorna 0 se pelo menos um dos valores da matriz X não está contido no universo de discurso de sua variável lingüística.

X é uma matriz ($n \times 4$) onde cada linha contém os valores de cada uma das quatro variáveis lingüísticas de entrada do sistema (neste caso a função já foi configurada para usar a

quantidade de variáveis utilizadas para o estudo de caso proposto). n é a quantidade de casos a serem avaliados.

A função $CHK_TRAP_TYPE2(vet)$

Esta função verifica se o vetor de entrada é um trapézio ou um triângulo que represente um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar. Seu objetivo é verificar as restrições apresentadas em (41) e (42). Todas as variantes de trapézios e triângulos apresentadas na seção 4.3.1 são reconhecidas por esta função.

Esta função possui a seguinte sintaxe:

$$r = CHK_TRAP_TYPE2(vet) \quad (48)$$

Onde:

r retorna 1 se verdadeiro, senão retorna 0.

vet é um vetor que contém os parâmetros que representam o conjunto fuzzy tipo 2 intervalar trapezoidal, ou uma de suas degenerações, descritas na seção 4.3.1. Deve-se levar em consideração a ordem de inserção dos pontos, conforme também mencionado naquela seção.

5. Estudo de Caso

Neste capítulo é apresentada a aplicação da metodologia definida na seção 4.2 sobre o cenário proposto, apresentado na seção 3.3 (tomada de decisão em controle de tráfego aéreo do Aeroporto Internacional de Salvador). O *framework* desenvolvido neste trabalho, apresentado na seção 4.3, é utilizado para a implementação deste estudo de caso. No final deste capítulo são apresentadas as restrições identificadas quanto à aplicabilidade deste modelo.

5.1. Aplicação da metodologia

A seguir será descrita toda a execução dos passos indicados na seção 4.2, que apresenta a metodologia de desenvolvimento de sistemas de inferência fuzzy para aplicar ao estudo de caso proposto.

Passo 1 – Elaboração de questionários iniciais

O questionário Q1 (APÊNDICE 1) foi utilizado para entrevistar os controladores de tráfego aéreo. No início deste questionário constam campos de identificação, local de trabalho e tempo de experiência. Na primeira seção do questionário constam perguntas relacionadas à faculdade de tomada de decisão referentes a autorizações de decolagens com aeronave na aproximação final para pouso. Finalizando, na última seção, são abordadas questões gerais de controle de tráfego aéreo relacionadas à tomada de decisão, mas não diretamente ligadas ao cenário do problema.

Para entrevistar os pilotos foi utilizado o questionário Q2 (APÊNDICE 2). Na primeira parte deste questionário constam campos de identificação do piloto e de sua experiência profissional. Na primeira seção são abordadas questões relacionadas à aeronave em procedimentos de decolagem. Já na segunda seção são abordadas questões relacionadas ao pouso de aeronaves. Para finalizar, na última seção são abordadas questões gerais de navegação aérea, mas que também têm relação com o problema proposto.

Passo 2 – Entrevista com controladores de tráfego aéreo

As entrevistas com os controladores de tráfego aéreo foram realizadas em Salvador – aeródromo alvo do estudo – e também em Brasília. Decidiu-se entrevistar controladores de tráfego aéreo de uma segunda localidade para verificar se os critérios utilizados por eles para tomar uma decisão de decolagem são os mesmos, e também para verificar se uma modelagem

genérica poderia ser feita para atender as duas localidades. Estas entrevistas foram realizadas basicamente em sala reservada e em local da torre de controle com menos ruído.

O escopo do problema delimita-se à operação das duas aeronaves do cenário, ignorando-se as diversas situações que podem ocorrer em simultâneo com o cenário, como por exemplo, aeronave em emergência, chuva, vento forte, ou outro fator, como descrito na seção 5.2. Através deste levantamento foi possível coletar os critérios que os controladores de tráfego aéreo utilizam para tomar decisão de decolagem de aeronaves. Além disso, foi possível perceber que um controlador de tráfego aéreo com mais experiência tende a tomar decisões com menor possibilidade de conflitos ou incidentes.

Percebeu-se também que um modelo genérico, aplicável a todos os aeroportos, para apoio a tomada de decisão não seria possível pois as disposições físicas³³ das *taxiways* são diferentes. Conseqüentemente as modelagens seriam diferentes, pois as variáveis lingüísticas de distância e velocidade dependem da extensão e formato das *taxiways*. Por isso, ficou definido que o modelo fuzzy desenvolvido abrangeria somente a localidade de Salvador.

Passo 3 – Entrevista com pilotos

As entrevistas com pilotos ocorreram nas dependências do Aeroporto Internacional de Salvador Deputado Luís Eduardo Magalhães e nas cabines das aeronaves em vôo (exceto durante os procedimentos de pouso e decolagem).

Através destas entrevistas ficou constatado que:

- Turbulência afeta na estabilidade e velocidade das aeronaves em aproximação para pouso;
- Chuva e nebulosidades em geral interferem na aproximação para pouso;
- Pista úmida ou molhada praticamente não interfere durante o táxi;
- A velocidade máxima em táxi de uma aeronave do porte Boeing 737, Fokker 100 ou Airbus 320 é de 20 nós. Alguns fabricantes admitem até 35 nós, mas as empresas aéreas restringem a velocidade de operação para 20 nós por medida de segurança;
- Para aeronaves do porte Boeing 737, Fokker 100 ou Airbus 320, a velocidade mínima e máxima durante uma aproximação final para pouso são de 120 e 200 nós, respectivamente.
- Prolongadas esperas para decolagem incomodam tripulantes e passageiros, podendo causar estresse e até tumulto dentro da aeronave;

³³ Comprimento, curvatura e distância ao ponto de espera.

- Uma aeronave do tipo Boeing 737, Fokker 100 ou Airbus 320 pode gastar até 20 kg de combustível por minuto no solo, com motores acionados;
- Devido ao grande fluxo de tráfego aéreo, uma aeronave pode ficar até 30 minutos no ponto de espera aguardando autorização para decolagem em aeroportos de grande movimento no Brasil, como em São Paulo;
- Quanto uma aeronave está próxima ao ponto de espera e recebe a autorização de decolagem, o piloto normalmente mantém a velocidade de táxi até a referida decolagem;

Passo 4 – Escolha da categoria de aeronaves

Através de uma consulta com os controladores de tráfego aéreo foi possível listar os tipos de aeronaves que mais trafegaram em Salvador no biênio 2005 – 2006. As aeronaves listadas foram: B733 (Boeing 737-300), A320 (Airbus 320), B737 (Boeing 737-700), F100 (Fokker 100), A319 (Airbus 319), B738 (Boeing 737-800), B735 (Boeing 737-500), B734 (Boeing 737-400), E110 (Bandeirante), PA32 (Minuano) e PA28 (Carioca). Para efeito deste estudo de caso, apenas uma classe de aeronaves foi estudada. A classe analisada foi genericamente identificada como a *classe dos Boeing 737*. Este grupo contém aeronaves que possuem desempenho semelhante ao Boeing 737 no que diz respeito ao táxi para a decolagem e à aproximação final para pouso. As aeronaves envolvidas neste grupo são: B733, B734, B735, B737, B738, F100, A319 e A320. O grupo recebeu este nome pois o Boeing 737 é o principal representante do grupo, sendo também o tipo de aeronave que mais trafega em Salvador.

Passo 5 – Escolha do grupo de especialistas

Obedecendo-se aos critérios estabelecidos e considerando-se a quantidade reduzida de controladores de tráfego aéreo de Salvador, foram selecionados apenas cinco profissionais.

Passo 6 – Definição das variáveis lingüísticas

Com auxílio do Questionário Q1 foi possível identificar quais os critérios utilizados pelos controladores de tráfego aéreo para a tomada de decisão do cenário proposto:

- Tipo da aeronave que está por decolar;
- Tipo da aeronave que está por pousar;
- Distância da aeronave, que está por decolar, ao ponto de espera;
- Velocidade da aeronave que está por decolar;
- Distância da aeronave, que está por pousar, à cabeceira da pista;
- Velocidade da aeronave que está por pousar;

- Condições de vento;
- Nebulosidade na reta final de aproximação;
- Condições da pista – se seca, úmida ou molhada;
- Existência de precipitação atmosférica;
- Nível de cansaço do controlador de tráfego aéreo;
- Condições psicológicas do controlador de tráfego aéreo;

Os seis primeiros itens representam as variáveis mais importantes e que estão diretamente relacionadas ao desempenho das aeronaves e efetivamente possuem influência direta no problema da tomada de decisão. Desta forma, estas são as variáveis de entrada consideradas para o modelo de inferência fuzzy. Os itens restantes não serão inseridos no escopo da modelagem pois farão parte das restrições de uso do sistema (seção 5.2) e, além disso, contribuiriam para uma elevação substancial da complexidade e tamanho do modelo. Ficou definido então que o modelo aplicar-se-á somente a aeronaves da classe dos Boeing 737, respeitadas as restrições definidas na seção 5.2.

Diante destas informações, a estrutura geral (entradas e saída) de modelo proposta para o sistema de inferência fuzzy está apresentada na Figura 36.

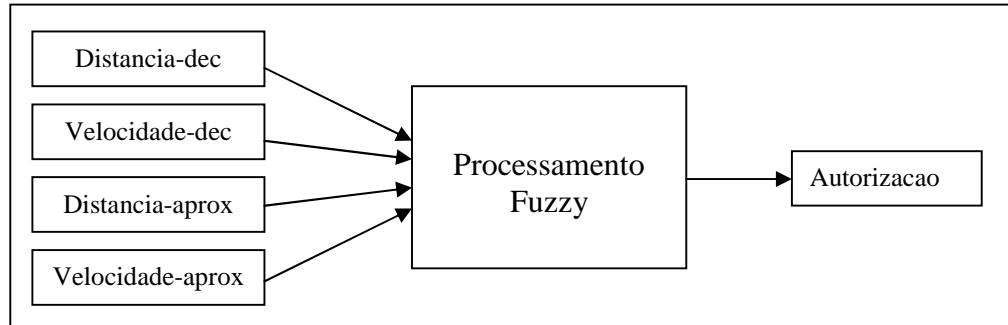


Figura 36. Estrutura do sistema fuzzy

Foram definidas quatro variáveis de entrada (distancia-dec, velocidade-dec, distancia-aprox, velocidade-aprox) e uma de saída (autorizacao), todas elas aplicáveis à classe dos Boeing 737. Outro ponto importante é a definição da pista a ser utilizada para o estudo, pois os termos das variáveis identificadas, assim como seus universos de discurso também podem variar de acordo com a pista de pouso/decolagem. Para este estudo foi escolhida a pista 10 por ser a mais utilizada pelos controladores de tráfego aéreo de Salvador³⁴. As variáveis estão descritas a seguir e a definição dos seus conjuntos fuzzy faz parte do próximo passo deste trabalho. As unidades de medida utilizadas para as variáveis lingüísticas no modelo são as

³⁴ Em Salvador existem duas pistas físicas (de asfalto), porém, para efeito de tráfego aéreo, são consideradas quatro, onde cada sentido de pouso/decolagem corresponde a uma pista. Atualmente elas são identificadas pelos números 10, 28, 17 e 35.

mais comumente utilizadas pelos controladores de tráfego aéreo brasileiros.

Distancia-dec – É a distância que a aeronave que está por decolar se encontra em relação ao ponto de espera, medida em metros. Para esta variável foi necessário utilizar a planta de aeródromo para extrair dados do trajeto que as aeronaves seguirão para decolagem (ANEXO 4). Esta distância varia de 0 a 450 metros a partir do ponto de espera. Distâncias além de 450 metros do ponto de espera não fazem parte do escopo, pois são raros os casos em que uma aeronave fica pronta para decolagem a uma distância tão longe. Nestes casos, o controlador de tráfego aéreo prefere aguardar que a aeronave se aproxime do ponto de espera para efetuar a avaliação.

Velocidade-dec – É a velocidade empregada pela aeronave que está por decolar, durante seu táxi em direção ao ponto de espera, medida em nós (KT)³⁵. Através do questionário Q2 (APÊNDICE 2) e de dados coletados em equipamento de visualização radar, foi possível identificar quais as velocidades máximas em táxi das aeronaves da classe dos Boeing 737, alvo desta pesquisa. A velocidade máxima para a maioria destas aeronaves se limita a 20 KT e a mínima a 0 KT. Não foram admitidas velocidades negativas e nem muito altas, devido a questões de segurança e comportamento real do movimento de aeronaves em aeródromos controlados, apesar de existirem aeronaves que possam realizar a “marcha ré” e também empregarem altas velocidades.

Distancia-aprox – É a distância entre a cabeceira da pista e uma aeronave que se aproxima para pouso, medida em milhas náuticas (NM)³⁶. Considerando somente aeronaves da classe dos Boeing 737, o grupo especialista definiu que:

- Quando a aeronave que se aproxima para pouso estiver a uma distância maior que 8 NM da cabeceira da pista, a aeronave que está por decolar sempre será autorizada a decolar;
- Quando a aeronave que se aproxima para pouso estiver a uma distância menor que 3 NM da cabeceira da pista, a aeronave que está por decolar nunca será autorizada a decolar;
- O trecho entre 3 NM e 8 NM da cabeceira da pista fica identificado como *segmento de indecisão*, sendo, portanto, o universo de discurso desta variável.

Velocidade-aprox – É a velocidade empregada pela aeronave que está em aproximação para pouso, medida em nós (KT). A velocidade máxima para as aeronaves da classe dos Boeing 737 se limita a 200 KT e a mínima a 120 KT. Normalmente, velocidades abaixo de 120 KT podem constituir risco para a operação de aproximação, pois a aeronave

³⁵ *Knot* (KT) – Unidade de medida de velocidade. Um nó corresponde a uma milha náutica por hora, isto é, 1 KT \cong 1,852 Km/h. (BRASIL, 1999, p. 1-5).

³⁶ *Nautical Mile* (NM) – Unidade de medida de distância. Uma milha náutica corresponde a aproximadamente 1,852 Km (BRASIL, 1999, p. 1-5).

pode perder sustentação e cair, dependendo do tipo da aeronave e de seu peso – incluindo carga e pessoas. Estes limites foram coletados através de perguntas direcionadas aos pilotos.

Variável de saída:

Autorizacao – É a variável que guarda os valores de autorização emitidos pelos controladores de tráfego aéreo em relação à aeronave que está por decolar – que serão apresentados no próximo passo.

Passo 7 – Classificação dos termos lingüísticos

Os termos lingüísticos são representados por conjuntos fuzzy e sua nomenclatura está associada diretamente ao seu significado. Na Tabela 3 são listadas as variáveis fuzzy do modelo e seus termos lingüísticos. O detalhamento de cada conjunto fuzzy está apresentado no passo 10.

Tabela 3. Variáveis lingüísticas do modelo proposto e seus termos lingüísticos.

Variável lingüística	Termos lingüísticos
<i>Distancia-dec</i>	<i>no-ponto, perto, longe</i>
<i>Velocidade-dec</i>	<i>zero, baixa, normal, alta</i>
<i>Distancia-aprox</i>	<i>perto, longe</i>
<i>Velocidade-aprox</i>	<i>normal, alta</i>
<i>Autorizacao</i>	<i>não-decola, decola-imediato, decola</i>

Passo 8 – Elaboração de formulários coletores para modelagem

O formulário Q3 (APÊNDICE 3) foi criado para coletar informações a respeito dos termos lingüísticos de cada variável de entrada do sistema. Neste formulário, cada variável lingüística possui um quadro destinado ao desenho dos conjuntos fuzzy pertinentes. Acima de cada quadro está discriminado o nome da variável, os termos lingüísticos associados e a unidade de medida, como no exemplo da Figura 37.

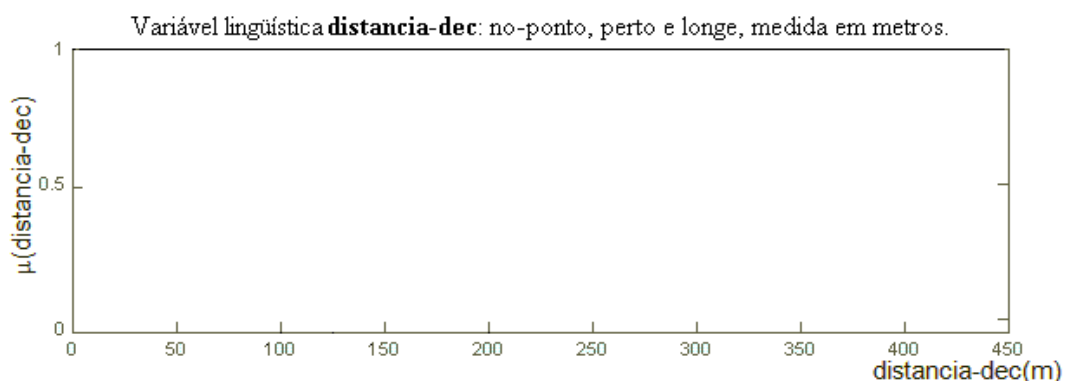


Figura 37. Exemplo de quadro para coleta de dados da variável lingüística *distancia-dec*

Para a tabela de decisão foi criado o formulário Q4 que comporta as regras fuzzy do sistema (APÊNDICE 4).

As primeiras colunas (antecedentes) são utilizadas para serem preenchidas com termos das variáveis lingüísticas de entrada. A última coluna (conseqüente) é utilizada como resposta da implicação dos antecedentes. Esta coluna comporta a variável lingüística relacionada com a autorização de decolagem e pode possuir os valores: *não-decola*, *decola-imediato* e *decola*.

Passo 9 – Coleta de dados para modelagem

O preenchimento do formulário Q3 foi feito durante entrevista com o grupo de especialistas, realizado na torre de controle do aeroporto de Salvador. Esta entrevista foi executada individualmente para cada membro do grupo, durante o dia e em início de turno.

Antes do controlador de tráfego aéreo desenhar os conjuntos fuzzy do formulário Q3, foi dada uma breve explicação da lógica fuzzy, seus fundamentos, necessidade e aplicações. Esta explicação durou em média 15 minutos para cada controlador de tráfego aéreo e foi importante para que o entrevistado entendesse a sua importância em um ambiente fuzzy de tomada de decisões. Após a explicação, foi feito o preenchimento do formulário, que durou em média 20 minutos. Durante o preenchimento, várias questões foram levantadas pelos controladores de tráfego aéreo, como formato do conjunto fuzzy e inclinações dos lados dos conjuntos desenhados.

Quanto à tabela de regras fuzzy, foi utilizado o mesmo conjunto de regras utilizado no trabalho de Lima e Amorim (2007) (APÊNDICE 5), uma vez que as regras de um sistema fuzzy tipo 1 podem ser utilizadas para um sistema fuzzy tipo 2 (MENDEL, 2001). Neste caso, fica explícito que a incerteza dos limites dos conjuntos reside somente nos antecedentes, uma vez que os conseqüentes são representados por apenas valores constantes (decisões expressas por números, apresentados no próximo passo). Esta característica, portanto, identifica o modelo TSK como de ordem zero. Uma abordagem mais robusta seria a investigação e utilização da incerteza associada também aos conseqüentes – proposta abordada com detalhes no capítulo 7. Para esta nova proposta, o formulário Q4 também serviria para entrevistar os controladores de tráfego aéreo para o levantamento das regras.

Passo 10 – Modelagem do sistema

A modelagem do sistema compreende várias etapas, como descrito no passo 10 da seção 4.2. Porém, algumas foram implicitamente realizadas em passos anteriores. A definição das variáveis lingüísticas de entrada e saída, a classificação dos termos lingüísticos e a definição dos universos de discurso para cada variável foram realizados nos passos 6 e 7.

Conforme registrado anteriormente, o modelo de sistema escolhido foi o Takagi-Sugeno-Kang (TSK) de ordem 0 intervalar pois a variável de saída do sistema é composta de três termos lingüísticos que podem ser representados por 3 constantes numéricas de valores diferentes. O modelo TSK intervalar, além da perfeita adequação às características do problema em estudo e à natureza das informações coletadas, é também apropriado para sistemas que necessitam de respostas rápidas (HAGRAS, 2004a), e a rapidez é uma dos princípios básicos do controle de tráfego aéreo (BRASIL, 2006).

A definição das regras fuzzy foi realizada no passo 9 e sua listagem completa pode ser vista no Apêndice 5. Quanto ao método de inferência, a literatura não tem diferenciado qual é o melhor método – *mínimo* ou *produto*. Porém, estes são os mais utilizados não existindo um critério universal de escolha (MENDEL, 2001) que poderá, em certos casos, servir como parâmetro de sintonia ou ajuste do modelo.

Para o problema proposto, foi realizado um teste entre os dois métodos de inferência sobre cem casos de tomadas de decisão. Na Tabela 4 é mostrado o resultado da comparação entre estes dois métodos com dados de decisões reais dos controladores de tráfego aéreo.

Tabela 4. Comparação entre métodos de inferência

MÉTODO	GRAU DE CONCORDÂNCIA
<i>mínimo</i>	97%
<i>produto</i>	93%

O operador *mínimo* foi selecionado por ser o método que obteve maior grau de concordância entre as saídas do sistema e as decisões reais dos controladores de tráfego aéreo. Em virtude do modelo de sistema ser TSK tipo 2, a fase de redução de tipo não é aplicável, e devido ao modelo ser de ordem 0, a defuzzificação é feita através da média aritmética entre os limites esquerdo e direito do conjunto fuzzy tipo 1 resultante.

Para a definição dos conjuntos fuzzy tipo 2 – que representam os termos de cada variável lingüística – foi necessário utilizar os desenhos do formulário Q3, coletados no passo 9. Para cada conjunto fuzzy que será mostrado a seguir, existem desenhos de até cinco figuras geométricas – triângulos e/ou trapézios. Estas figuras representam os conjuntos individuais gerados a partir das entrevistas com os especialistas em controle de tráfego aéreo. O eixo horizontal representa o universo de discurso da variável lingüística associada e o eixo vertical define o grau de pertinência. É admitida a possibilidade de coincidência de lados das figuras, pois os especialistas podem ter a mesma percepção do conjunto estudado. As figuras que seguem imediatamente representam o resultado final da sobreposição destes conjuntos, isto é,

a transformação de vários conjuntos fuzzy tipo 1 em um conjunto fuzzy tipo 2 intervalar. A área azulada representa o FOU de cada conjunto e os vértices são representados conforme abordado na seção 4.3.1.

Conjuntos intervalares para a variável *distancia-dec*

no-ponto – Representa o ponto de espera, ou próximo a ele. O ponto de espera é o marco zero para a medição das distâncias desta variável. A forma básica escolhida pelos especialistas foi a triangular (Figura 38), e a representação da sobreposição destes conjuntos fuzzy tipo 1 é mostrada na Figura 39, na forma de conjunto fuzzy tipo 2.

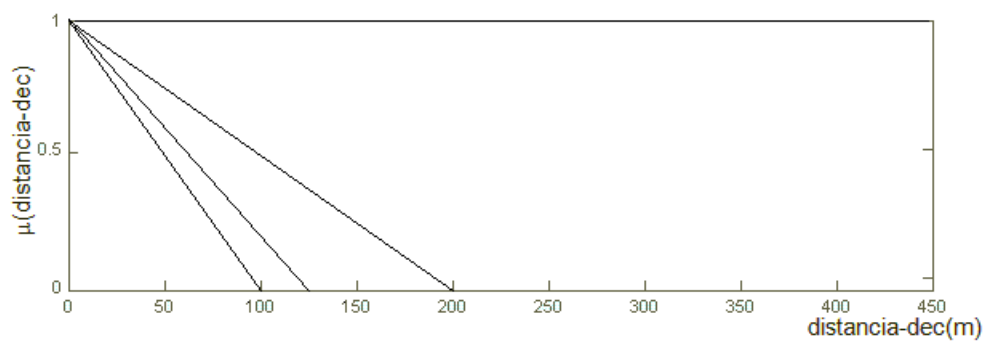


Figura 38. Conjuntos fuzzy *no-ponto* para *distancia-dec*

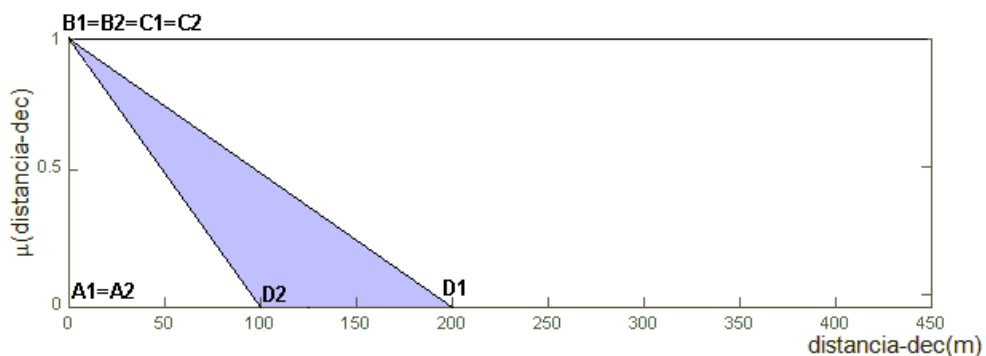


Figura 39. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *no-ponto* para *distancia-dec*

perto – A forma escolhida por todos os especialistas foi a triangular (Figura 40), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 41.

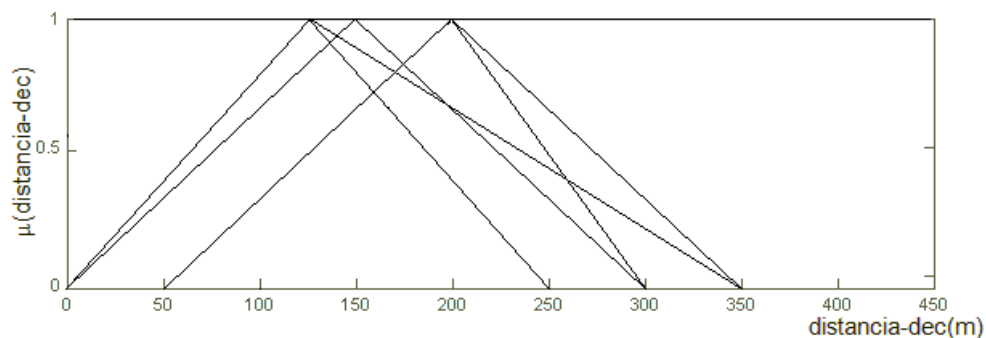


Figura 40. Conjuntos fuzzy *perto* para *distancia-dec*

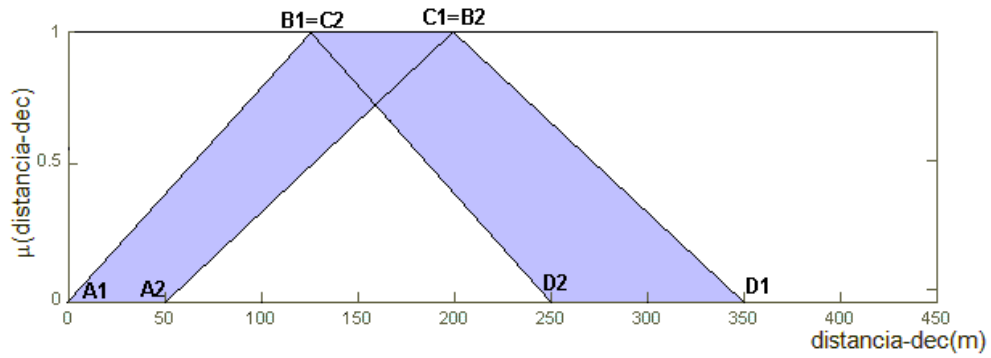


Figura 41. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *perto* para *distancia-dec*

longe – A forma escolhida por todos os especialistas foi a trapezoidal (Figura 42), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 43.

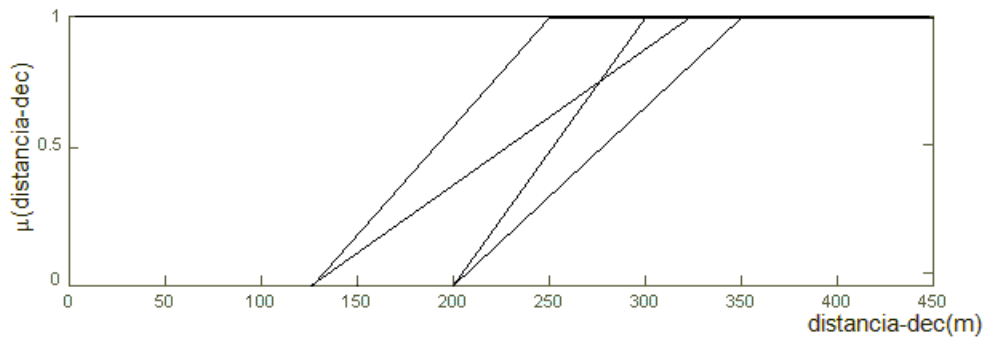


Figura 42. Conjuntos fuzzy *longe* para *distancia-dec*

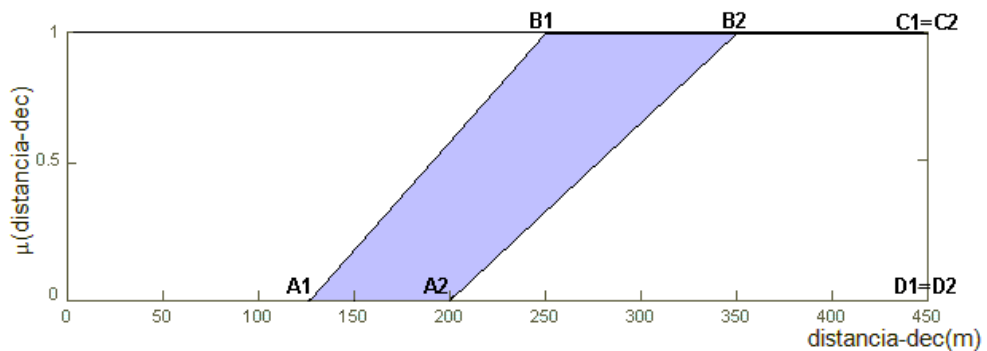


Figura 43. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *longe* para *distancia-dec*

Conjuntos intervalares para a variável *velocidade-dec*

zero – Conjunto fuzzy que representa velocidades iguais a zero e positivas próximas de zero. A forma escolhida por todos os especialistas foi a triangular (Figura 44), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 45.

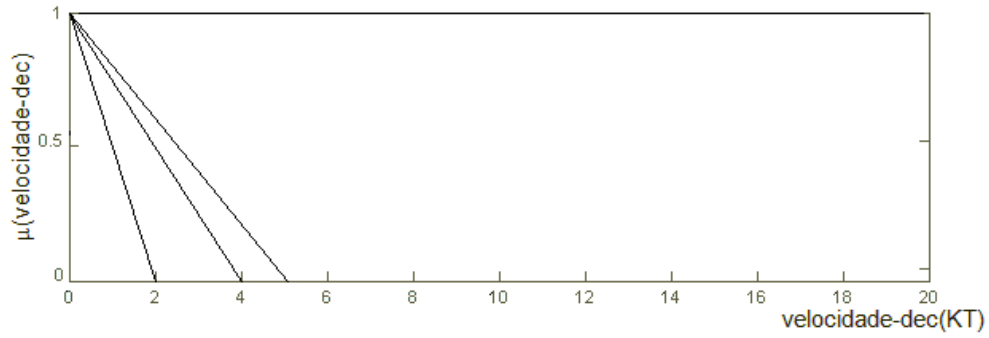


Figura 44. Conjuntos fuzzy zero para *velocidade-dec*

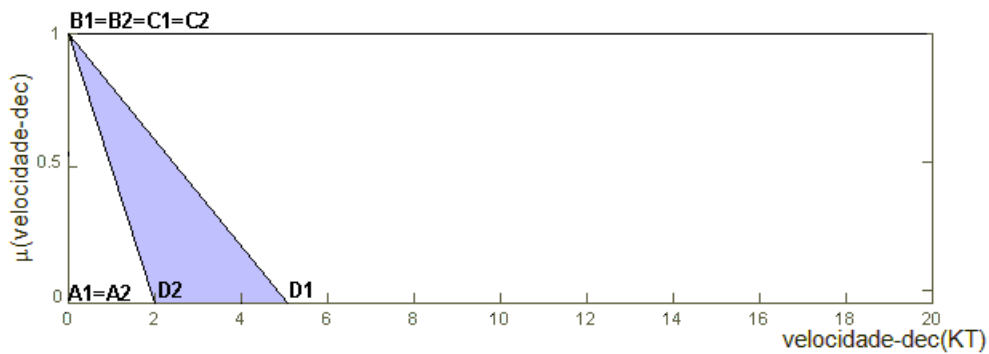


Figura 45. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar zero para *velocidade-dec*

baixa – A forma escolhida por quatro especialistas foi a triangular e um especialista escolheu trapezoidal (Figura 46). O conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 47.

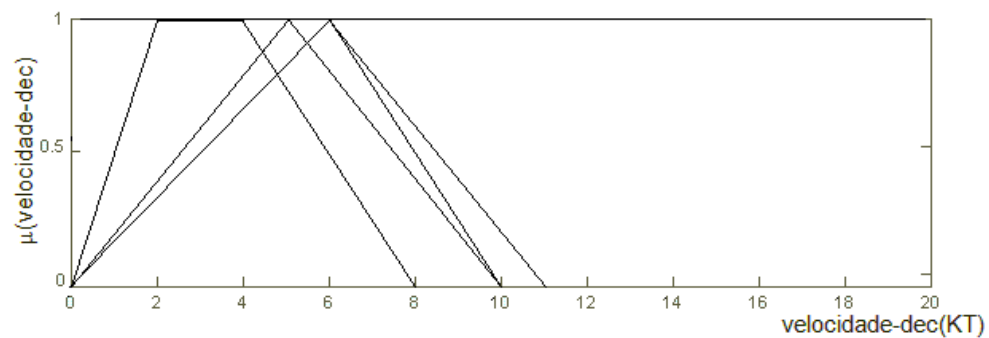


Figura 46. Conjuntos fuzzy *baixa* para *velocidade-dec*

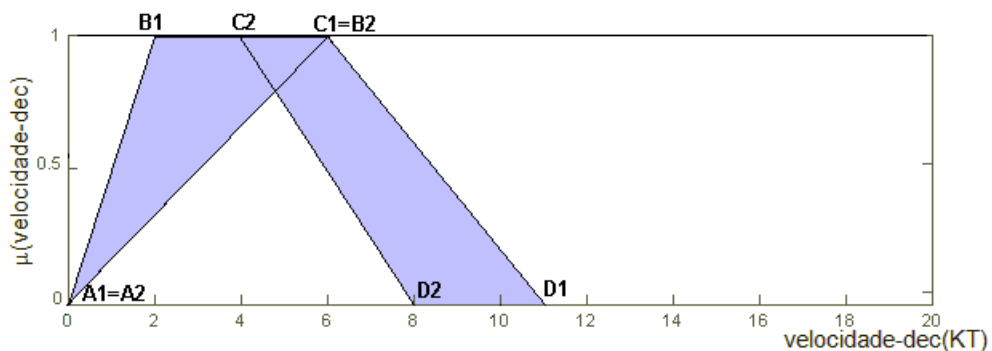


Figura 47. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *baixa* para *velocidade-dec*

normal – Três especialistas escolheram a forma triangular e dois especialistas escolheram a forma trapezoidal (Figura 48), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 49.

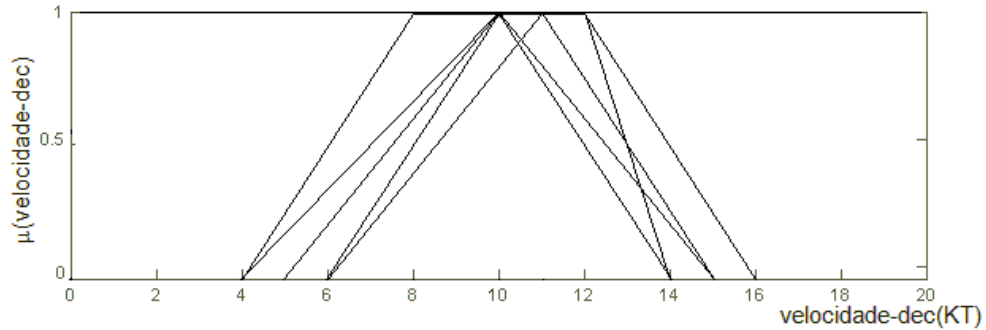


Figura 48. Conjuntos fuzzy *normal* para *velocidade-dec*

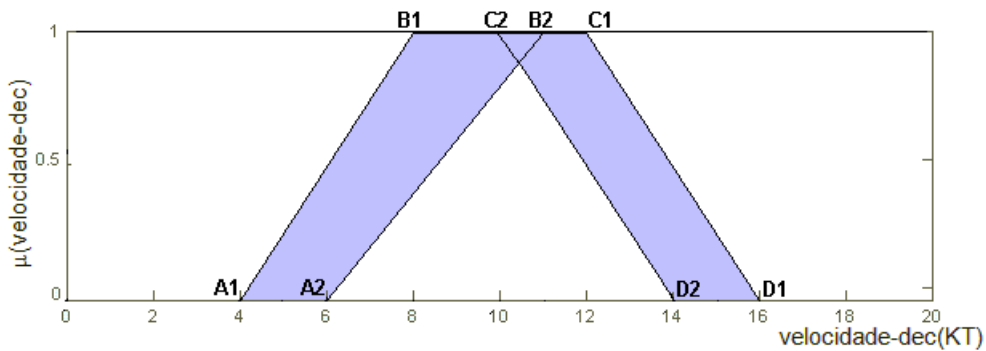


Figura 49. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *normal* para *velocidade-dec*

alta – A forma escolhida por todos os especialistas foi a trapezoidal (Figura 50), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 51.

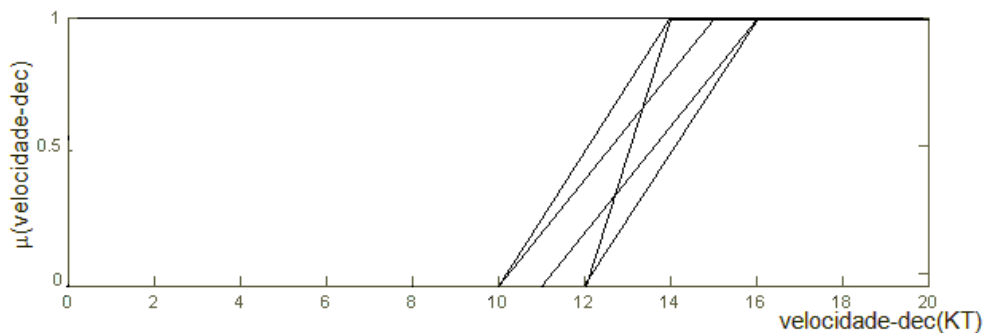


Figura 50. Conjuntos fuzzy *alta* para *velocidade-dec*

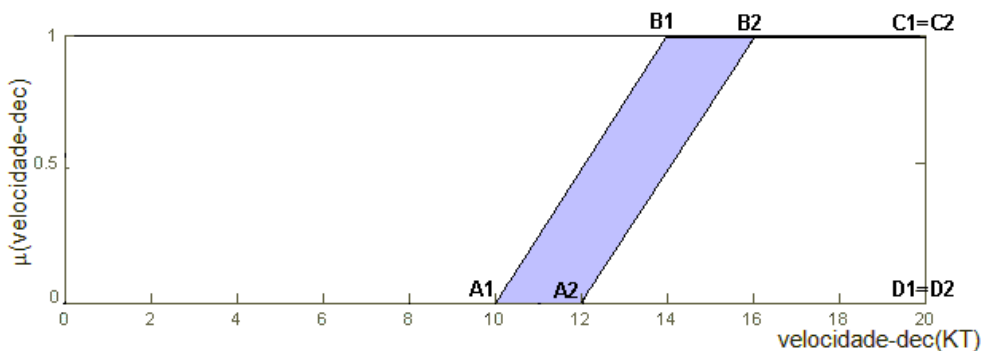


Figura 51. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *alta* para *velocidade-dec*

Conjuntos intervalares para a variável *distancia-aprox*

perto – Conjunto caracterizado pelas distâncias inferiores do segmento de indecisão. A forma escolhida por todos os especialistas foi a trapezoidal (Figura 52), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 53.

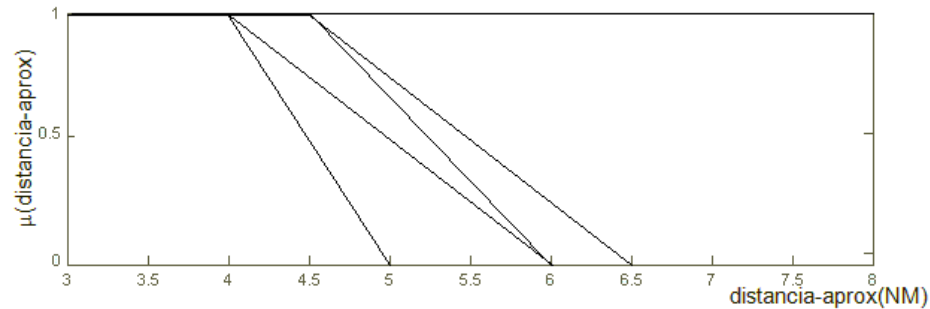


Figura 52. Conjuntos fuzzy *perto* para *distancia-aprox*

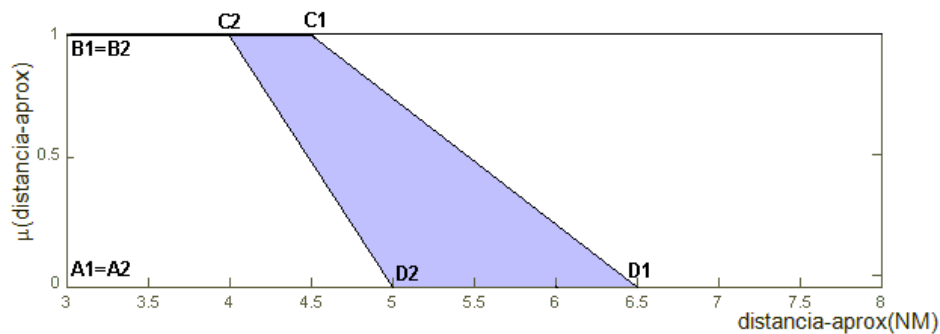


Figura 53. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *perto* para *distancia-aprox*

longe – Conjunto caracterizado pelas distâncias superiores do segmento de indecisão. A forma escolhida por todos os especialistas foi a trapezoidal (Figura 54), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 55.

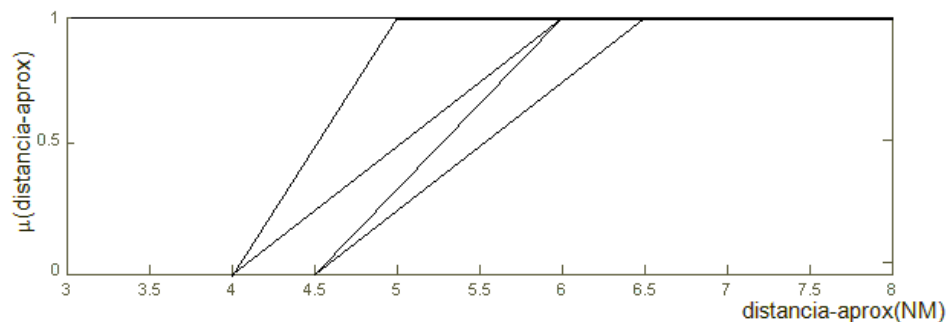


Figura 54. Conjuntos fuzzy *longe* para *distancia-aprox*

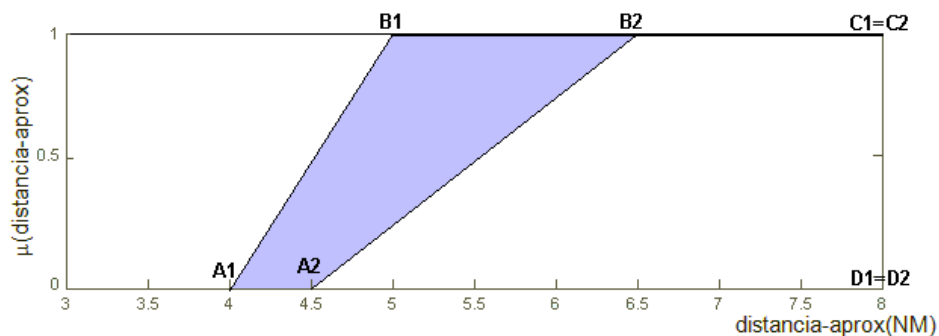


Figura 55. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *longe* para *distancia-aprox*

Conjuntos intervalares para a variável *velocidade-aprox*

normal – A forma escolhida por todos os especialistas foi a trapezoidal (Figura 56), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 57.

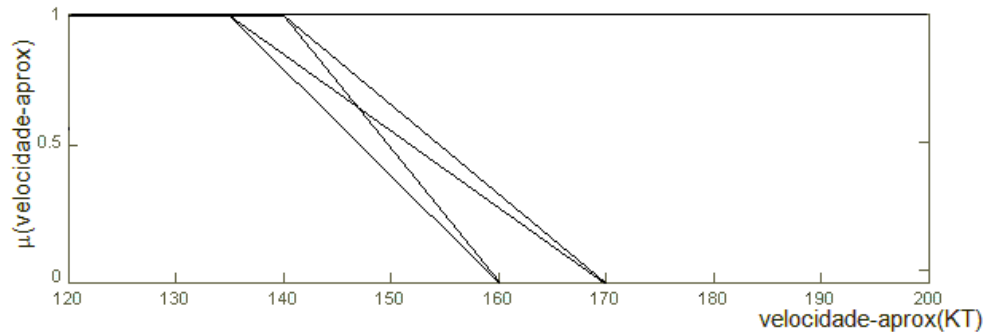


Figura 56. Conjuntos fuzzy *normal* para *velocidade-aprox*

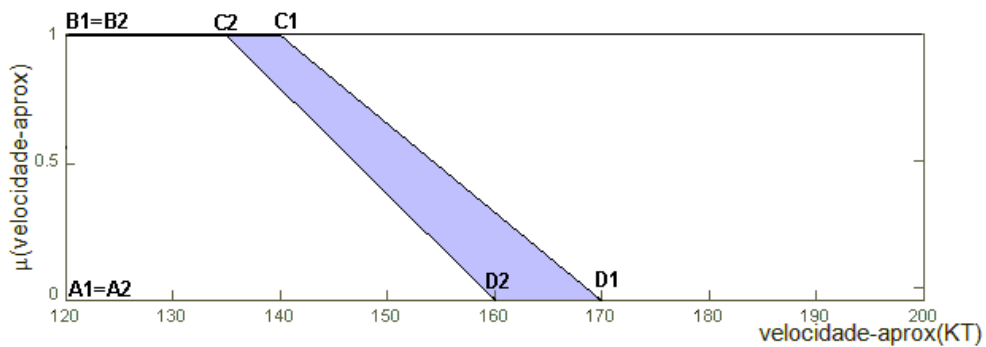


Figura 57. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *normal* para *velocidade-aprox*

alta - A forma escolhida por todos os especialistas foi a trapezoidal (Figura 58), e o conjunto fuzzy tipo 2 correspondente é mostrado na Figura 59.

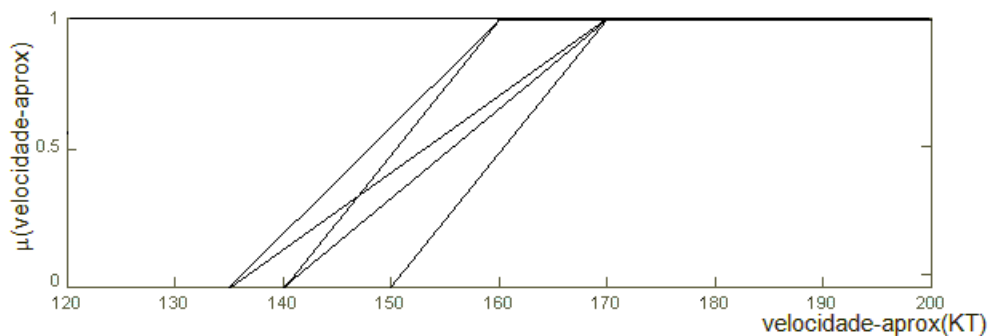


Figura 58. Conjuntos fuzzy *alta* para *velocidade-aprox*

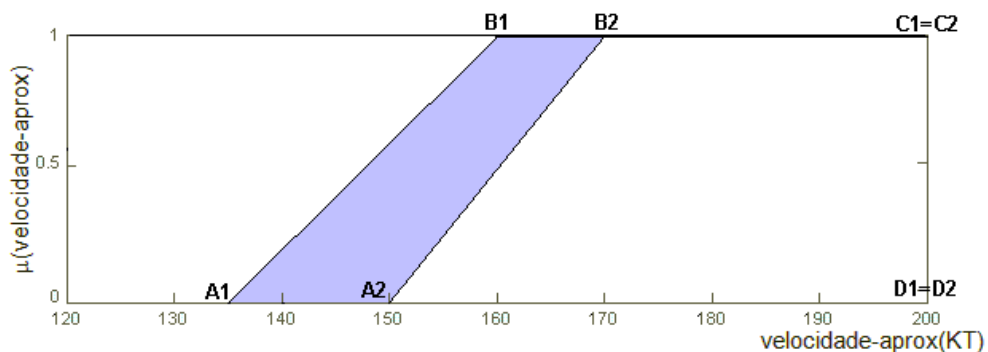


Figura 59. Conjunto fuzzy tipo 2 intervalar *alta* para *velocidade-aprox*

Conjuntos para a variável *autorizacao*

A saída do sistema é composta por três termos lingüísticos que correspondem às autorizações emitidas por controladores de tráfego aéreo:

nao-decola – Termo que corresponde à proibição de decolagem da aeronave naquele momento, isto é, a aeronave deverá manter posição no ponto de espera, aguardando posteriores instruções da torre de controle;

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 de tráfego aéreo 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. Ao emitir esta autorização, o controlador de tráfego aéreo admite a possibilidade de redução de velocidade da aeronave (por parte do piloto) ao ingressar na pista para decolagem, tão como uma possível parada na cabeceira da pista (antes da decolagem)³⁷.

Estes três conjuntos são representados por três constantes, que também podem ser interpretadas como uma degeneração de conjuntos fuzzy tipo 2 para tipo 0. Atualmente não há nenhuma técnica ou dispositivo que mensure tais termos, sendo então necessário adotar valores para estes termos. Levando em consideração que estes valores devem obedecer a uma ordem lógica que representa a possibilidade de decolagem, empiricamente haviam sido escolhidos os valores 1, 3 e 5 para *nao-decola*, *decola- imediato* e *decola*, respectivamente. Porém, através de alguns testes com amostras de casos de tomada de decisão, uma outra combinação de constantes reproduziu melhor o comportamento real das autorizações. Estes novos valores estão apresentados na Tabela 5 e a metodologia utilizada para esta escolha está descrita no passo 14.

Tabela 5. Constantes dos termos da variável *autorizacao*.

termo	constante
<i>nao-decola</i>	1
<i>decola- imediato</i>	4
<i>decola</i>	5

³⁷ Alguns pilotos levam alguns segundos parados na cabeceira da pista a fim de realizar alguns procedimentos pré-decolagem.

A saída do sistema, portanto, será um número real do intervalo contínuo [1, 5]. A associação desta saída com o termo lingüístico dar-se-á pela proximidade com os valores descritos na Tabela 5. Então, se o sistema resultar o valor 2,8, irá corresponder a *decola-imediato*, pois está mais próximo do 4 do que do 1. Na Tabela 6 são descritas as correspondências entre a saída numérica do sistema e a autorização a ser emitida para a aeronave que está por decolar.

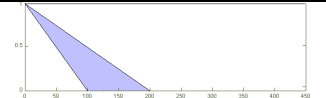
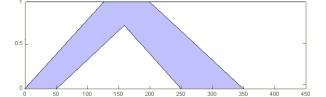
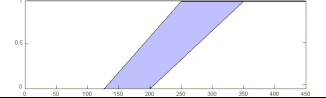
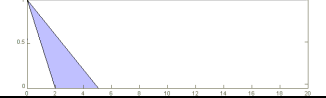
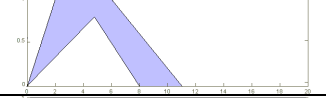
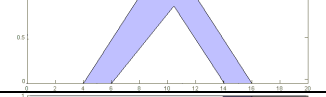
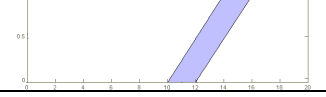
Tabela 6. Correspondência entre a saída numérica do sistema e a autorização.

Saída do sistema	autorizacao
[1 , 2,5[<i>nao-decola</i>
[2,5 , 4,5[<i>decola-imediato</i>
[4,5 , 5]	<i>decola</i>

Passo 11 – Implementação

Como explicado na seção 4.3, um *framework* foi criado para processar a tomada de decisão proposta neste trabalho. A função principal, *TSK_TYPE2_0()* tem como entradas uma matriz de valores das variáveis de entradas e uma constante que determina o método de inferência a ser utilizado. A função também foi projetada para ler um arquivo de dados – *INICIALIZACAO.M* – que contém os parâmetros de todos os conjuntos fuzzy tipo 2 envolvidos e também as regras fuzzy do sistema. Os parâmetros dos conjuntos fuzzy tipo 2 foram definidos a partir das figuras de seus conjuntos, definidos no passo anterior, e podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros dos conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares.

	Nome do conjunto	Parâmetros	Formato
<i>Distancia-dec</i>	<i>no-ponto</i>	[0 0 0 200 0 0 0 100]	
	<i>perto</i>	[0 125 200 350 50 200 125 250]	
	<i>longe</i>	[125 250 450 450 200 350 450 450]	
<i>velocidade-dec</i>	<i>zero</i>	[0 0 0 5 0 0 0 2]	
	<i>baixa</i>	[0 2 6 11 0 6 4 8]	
	<i>normal</i>	[4 8 12 16 6 11 10 14]	
	<i>alta</i>	[10 14 20 20 12 16 20 20]	

<i>distancia-aprox</i>	<i>perto</i>	[3 3 4,5 6,5 3 3 4 5]	
	<i>longe</i>	[4 5 8 8 4,5 6,5 8 8]	
<i>velocidade-aprox</i>	<i>normal</i>	[120 120 140 170 120 120 135 160]	
	<i>alta</i>	[135 160 200 200 150 170 200 200]	
<i>Autorizacao</i>	<i>nao-decola</i>	1	
	<i>decola-imediato</i>	4	
	<i>decola</i>	5	

Passo 12 – Coleta de dados para validação

Para a validação do modelo foi criado o formulário Q5 (APÊNDICE 6). Ele é composto de uma área informativa – para lembrar as restrições e o cenário da tomada de decisão – e uma área de preenchimento de dados referente à tomada de decisão.

Para realizar esta coleta de dados, foi feito um acompanhamento com os controladores de tráfego aéreo especialistas em operação durante turnos de serviço diurnos durante o ano de 2007. O formulário Q5 foi utilizado para registrar as informações necessárias para a tomada de decisão de decolagem das aeronaves que faziam parte do escopo do projeto.

Apesar da maioria das aeronaves da classe dos Boeing 737 estudadas serem de companhias que utilizam o serviço de plano de vôos repetitivos³⁸, praticamente todas partiam ou chegavam em horários não repetitivos – mesmo que por alguns minutos. Fato que impossibilitou a previsão dos horários que poderiam ser utilizados para a coleta de informações para a validação – o que só é possível quando ocorre o cenário definido: uma aeronave por decolar e outra por pousar, e quando se situarem dentro dos seus espaços correspondentes (valores de distâncias dentro de seus respectivos universos de discurso). Por isso houve dias em que se pode coletar cinco casos em uma hora, mas também houve dias em que não foi possível registrar nenhum caso. Esta coleta de informações se encerrou ao atingir uma quantidade de cem casos.

Passo 13 – Validação

Foi necessária a criação de sistemas fuzzy tipo 1 para cada especialista, com base nas figuras dos conjuntos fuzzy tipo 1 criadas por eles no passo 9, para representar o modelo

³⁸ Plano de vôo repetitivo é o plano de vôo relativo a uma série de vôos regulares, *charters*, fretamento e da rede postal, autorizados pela ANAC, que se realizam, pelo menos, uma vez por semana, perfazendo um total de no mínimo dez vôos e quando houver previsão para uma utilização mínima de dois meses (BRASIL, 2008).

cognitivo individual de tomada de decisão no cenário proposto. Os cem casos de decisões (dados listados no Apêndice 7) foram utilizados para avaliar o grau de concordância nas decisões entre estes modelos individuais e o modelo fuzzy tipo 2. O grau de sucesso do modelo está diretamente associado ao grau de concordância da saída sugerida pelo modelo com a decisão real dos controladores de tráfego aéreo (cem casos). Ainda foi criado um modelo fuzzy tipo 1 médio para a avaliação. Os conjuntos fuzzy deste modelo são aqueles que correspondem com a média entre a função de pertinência superior e inferior de cada conjunto. Os resultados estão apresentados no capítulo 6.

Passo 14 – Ajuste do modelo

Inicialmente o modelo foi projetado para utilizar as constantes 1, 3 e 5 como valores dos termos da variável de saída, esta escolha foi feita de modo empírico. Diante da pouca quantidade de dados coletados, foram gerados 900 casos sobre os 100 coletados para validação. Estes dados adicionais foram gerados através da inserção de um valor aleatório de até 10% do valor original de cada variável de entrada, conservando-se a mesma saída.

Foram feitos testes com os grupos de saída (1, 3, 5) e (1, 4, 5). Na Tabela 8 são mostrados os graus de concordância do modelo de inferência fuzzy para cada um destes grupos, com base nos 900 casos de tomada de decisão.

Tabela 8. Percentual de acerto para grupos de parâmetros diferentes da variável de saída.

Grupo de parâmetros da variável de saída	Percentagem de concordância
Saídas (1, 3, 5)	85,00 %
Saídas (1, 4, 5)	90,44 %

O grupo de parâmetros (1, 4, 5) indicou uma melhor opção para representar os termos lingüísticos da variável de saída. O maior grau de concordância para o grupo (1, 4, 5) poderia ter ocorrido devido à proximidade real da semântica dos termos *decola-imediato* e *decola*. Pode ser que haja uma outra combinação de números, que possa representar de modo mais fiel a modelagem da variável de saída. Porém, para este trabalho, será considerado como satisfatório o grupo (1, 4, 5) e um possível ajuste nestes valores será dado como um trabalho futuro.

Passo 15 – Finalização

Com o sistema pronto foi possível realizar análises das relações entre as variáveis de entrada e a variável de saída através de superfícies de solução – ou superfícies de saída. Para

um sistema fuzzy de quatro entradas e uma saída, a superfície de solução é um hiperespaço pentadimensional. Para poder visualizá-lo é necessário degenerá-lo, por exemplo, para uma superfície tridimensional, bastando escolher duas das variáveis de entrada para permanecerem constantes, criando-se então uma visão parcial da superfície de solução geral. No capítulo 6 estão apresentadas e discutidas algumas destas visões de superfície de solução do sistema.

5.2. Restrições e hipóteses para aplicação do modelo

O sistema fuzzy tipo 2 criado foi modelado para ser usado especificamente no Aeroporto Internacional de Salvador para a pista 10, pois as variáveis utilizadas para tomada de decisão do cenário variam de acordo com o aeródromo e com a pista. Além disso, como descrito no passo 6 da seção 5.1, outras variáveis poderiam ser utilizadas na tomada de decisão do cenário proposto. Neste sentido, os itens seguintes destacam condições ambientais e estruturais que especificam e delimitam o cenário de utilização do modelo desenvolvido.

- Somente aeronaves da classe do Boeing 737 são consideradas;
- O vento deverá ser calmo ou fraco, pois ventos fortes de cauda e perpendiculares interferem nos pousos das aeronaves e podem constituir uma nova variável de entrada no sistema. Os dados coletados para a validação do modelo foram obtidos de cenários com vento calmo ou com intensidade máxima de 10 nós de proa³⁹;
- Não poderá haver turbulência no segmento final de aproximação para pouso;
- Não poderá haver precipitações ou nebulosidades abaixo de 1.500 pés sobre o aeroporto e na reta final de aproximação para pouso. Nuvens abaixo desta altura, chuva, nevoeiro e poeira, dependendo da intensidade e duração, podem constituir variáveis que influenciam nas tomadas de decisões;
- Nenhuma das aeronaves envolvidas deverá estar em nível de prioridade (emergência, missão de defesa aeroespacial, em transporte de enfermo ou lesionado em estado grave ou órgão vital para transplante em corpo humano, em operação de busca e salvamento, transportando o presidente da República, ou em operação militar)⁴⁰. Nestes casos os controladores de tráfego aéreo poderiam não priorizar a fluidez do tráfego aéreo para dar atenção especial às aeronaves destes casos;
- Nenhuma das aeronaves envolvidas esteja sendo alvo de interferência ilícita (seqüestro, suspeita de bomba a bordo, etc.);

³⁹ De frente.

⁴⁰ Esta lista refere-se às aeronaves em prioridade para pouso e decolagem, listadas em Brasil (2006, p. 123).

– A pista não poderá estar molhada. O grau de umidade da pista também poderá constituir uma variável de entrada;

– Considera-se que os pilotos deverão cumprir corretamente as autorizações de decolagem emitidas pelos controladores de tráfego aéreo. Caso isto não ocorra, o modelo não será aplicável, pois não haverá compatibilidade com as regras definidas no sistema fuzzy, além de constituir infração de tráfego aéreo.

Esta última consideração explicita a importância do ser humano à frente de sistemas críticos de tomada de decisão, onde as ferramentas automatizadas servem de apoio à tomada de decisão e não de substituição do homem. Já houve casos em que controladores de tráfego aéreo identificaram interferência ilícita em aeronaves através de certas atitudes dos pilotos, que só poderiam ser identificadas através da percepção de um contexto macro em que a aeronave está inserida.

Estas foram as restrições identificadas para este ambiente. Porém, podem existir outras restrições que não foram contempladas no cenário.

6. Discussão do Modelo e Resultados Obtidos

Neste capítulo é apresentada uma discussão das propriedades do modelo, resultados obtidos na validação e também uma análise do modelo através de superfícies de solução.

6.1. Modelo e conjuntos fuzzy tipo 2

De uma forma geral, o modelo proposto neste trabalho possui as seguintes características:

- Modelo de sistema: Fuzzy tipo 2 TSK;
- Ordem do sistema TSK: zero;
- Característica dos conjuntos fuzzy tipo 2: intervalares, com função de pertinência primária triangular ou trapezoidal;
- Método de inferência: mínimo;
- Método de defuzzificação: média aritmética;
- Variáveis lingüísticas: 4 de entrada e 1 de saída;
- Conjuntos fuzzy dos antecedentes: todos do tipo 2;
- Conjuntos fuzzy dos conseqüentes: todos do tipo 0, ou seja, constantes;
- Regras fuzzy: 48 regras, listadas no Apêndice 5;

As Figuras 60 a 63 apresentam os conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares propostos para cada variável de entrada do modelo.

É provável que, com um número maior de especialistas participando da modelagem, os FOU's dos conjuntos intervalares adquiram áreas sutilmente maiores que as apresentadas nas Figuras de 60 a 63, pois muitos dos novos conjuntos fuzzy tipo 1 estariam contidos nos FOU's existentes. Isto ocorre devido a uma concordância generalizada entre os especialistas a respeito de grande parte da área dos conjuntos fuzzy, porém, os limites destes conjuntos são delineados de forma particular, de acordo com o julgamento de cada especialista. Estes limites de conjuntos podem ser coincidentes entre os especialistas, mas na maioria das vezes são próximos uns dos outros, e quando combinados formam o FOU do conjunto fuzzy tipo 2 associado àqueles conjuntos fuzzy tipo 1 particulares.

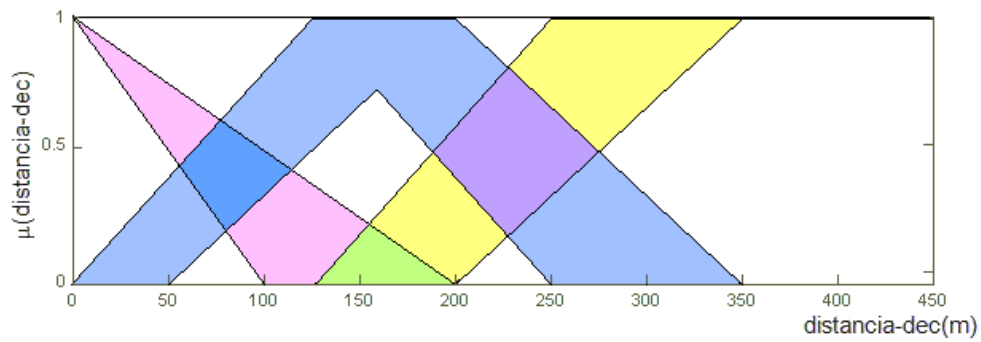


Figura 60. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável *distância-dec*: *no-ponto*, *perto* e *longe*, da esquerda para a direita.

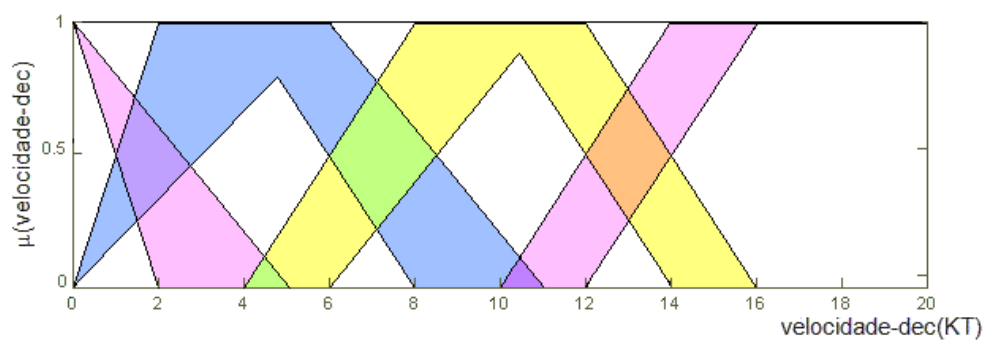


Figura 61. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável *velocidade-dec*: *zero*, *baixa*, *normal* e *alta*, da esquerda para a direita.

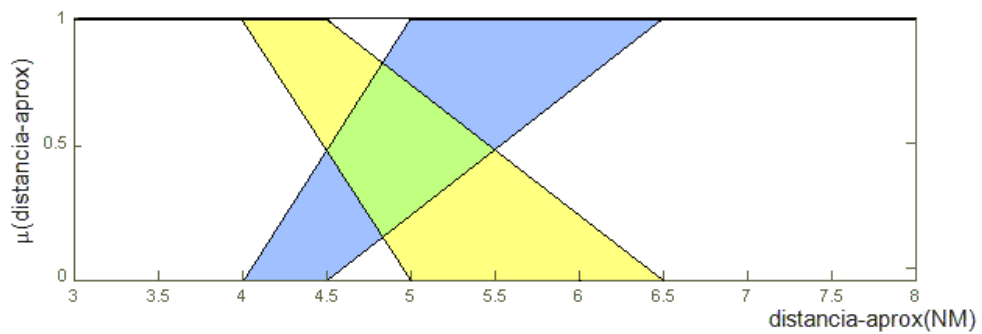


Figura 62. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável *distância-aprox*: *perto* e *longe*, da esquerda para a direita.

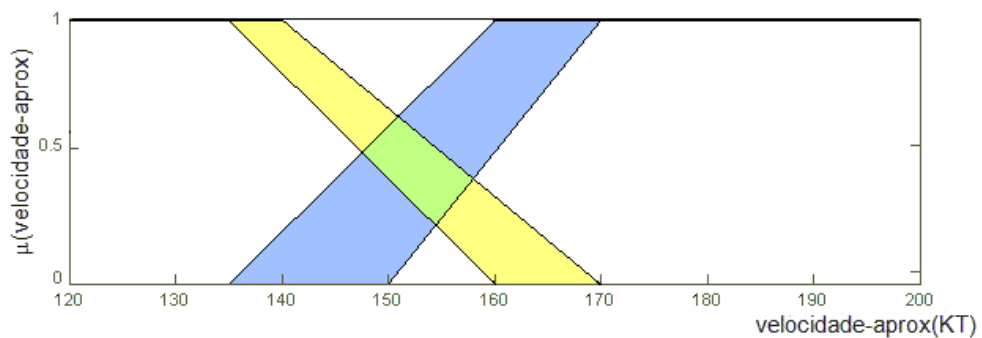


Figura 63. Conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares para a variável *velocidade-aprox*: *normal* e *alta*, da esquerda para a direita.

Através das Figuras 60 a 63, é possível perceber, visualmente e sem formalismo matemático, que o conjunto fuzzy que teve maior consenso na modelagem foi o *normal* da variável *velocidade-aprox* (Figura 63), pois as retas da função de pertinência superior e inferior estão mais próximas, motivo que reduz a incerteza sobre os limites deste conjunto. Já os conjuntos que tiveram menor consenso foram os *perto* e *longe* da variável *distancia-dec*, *baixa* de *velocidade-dec* e *perto* e *longe* da variável *distancia-aprox*.

6.2. Resultados obtidos

Como mencionado anteriormente, não há, até o momento, nenhuma técnica ou sistema que possa avaliar a qualidade das decisões tomadas pelos controladores de tráfego aéreo com base nas restrições impostas (hipóteses do modelo). Um aspecto importante na tomada de decisão é a sua contribuição para a maior fluidez do tráfego aéreo e, neste sentido, vale ressaltar que o modelo identificado armazena as características dos especialistas entrevistados. Não há garantia que estes especialistas sejam os melhores, tendo-se, inclusive, a possibilidade de algum novo especialista prover maior fluidez ao tráfego aéreo, isto é, autorizar com segurança mais aeronaves a decolar, antes que outras pousem.

Para a avaliação de desempenho do modelo fuzzy tipo 2, também foram avaliados modelos fuzzy tipo 1 de cada especialista, criados a partir dos conjuntos fuzzy individuais levantados no passo 9 da metodologia. Tomando-se por base as regras levantadas pelo grupo de especialistas e os cem casos de tomada de decisão coletados para validação, a medida de eficácia de cada um dos modelos foi realizada comparando-se as decisões recomendadas (provenientes dos sistemas de inferência fuzzy tipos 1 e 2) com as decisões reais do grupo de especialistas. Ou seja, a qualidade dos modelos identificados, nesta primeira etapa, foi avaliada verificando-se a capacidade de reprodução das decisões efetivamente tomadas. Os dados utilizados para esta validação foram coletados ao longo do ano de 2007, durante o dia, e respeitados as restrições descritas na seção 5.2. O resultado das avaliações está apresentado na Figura 64.

Percebe-se que os modelos fuzzy tipo 1 dos controladores 2, 3, 4 e 5 alcançaram cerca de 90% de concordância das autorizações reais dadas por eles mesmos, enquanto que o sistema do especialista 1 obteve o pior resultado, alcançando apenas 67%. Para o sistema fuzzy tipo 2 proposto, houve um grau de 97% de concordância nas tomadas de decisão, fato que corrobora a aplicabilidade da lógica fuzzy tipo 2 em situações que hajam informações de mais de um indivíduo e que muitas vezes são incertas e não-coincidentes.

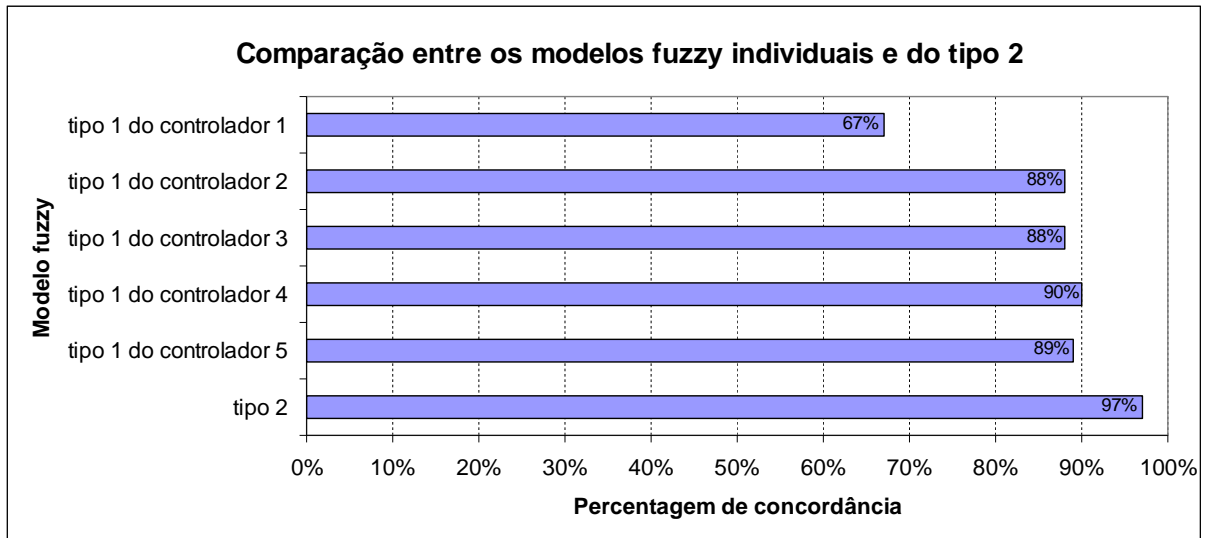


Figura 64. Percentagem de concordância entre os modelos avaliados e os casos reais de tomada de decisão.

Uma possível razão para o modelo proposto não ter chegado a 100% de concordância, seria a dificuldade de algum especialista em representar seus conjuntos fuzzy de modo mais apropriado para o cenário. Apesar de ter sido criada uma metodologia para coletar este tipo de informação (desenhos de conjuntos fuzzy), pode ter existido a dificuldade do especialista em traduzir mais fielmente seus conhecimentos técnicos em conjuntos fuzzy equivalentes.

Também existe a possibilidade de algumas decisões reais não terem sido realizadas de modo mais eficaz, ou seja, alguma decisão real poderia ter sido tomada em desacordo com as regras fuzzy estabelecidas, fazendo com que os modelos perdessem credibilidade, uma vez que se baseiam nas mesmas regras fuzzy. Tal atitude pode ter ocorrido por motivos de fadiga, estado emocional adverso, estresse, ou até mesmo utilização de outras condicionantes para a tomada de decisão (possivelmente outras variáveis lingüísticas).

Outra hipótese seria a necessidade dos controladores de tráfego aéreo em utilizar mais variáveis lingüísticas para tomar as decisões do cenário. Os modelos avaliados contemplam apenas as quatro principais variáveis de entrada, enquanto que na realidade os controladores podem estar utilizando mais, mesmo que inconscientemente. Algumas destas possíveis variáveis são descritas no passo 6 da seção 5.1.

Por fim, o modelo também poderia contemplar incerteza nos conseqüentes, pois poderia haver respostas diferentes de especialistas diferentes para mesmas variáveis de entrada. Tais conjuntos dos conseqüentes poderiam ser representados por conjuntos fuzzy tipo 1 intervalares.

Um outro estudo realizado foi a comparação do sistema fuzzy tipo 2 com o sistema fuzzy tipo 1 médio dos especialistas. Este modelo médio foi gerado adotando-se conjuntos

fuzzy tipo 1 médio entre os especialistas, ou seja, a função de pertinência de cada conjunto fuzzy foi calculada através da média aritmética entre as funções de pertinência superior e inferior do seu respectivo conjunto fuzzy tipo 2 intervalar. Os resultados obtidos através do teste com os cem casos de decisão indicaram que o sistema fuzzy tipo 2 continua sendo o melhor (Figura 65), mesmo verificado que o novo sistema fuzzy 1 médio seja melhor que os modelos individuais. Esta diferença de 5% entre os resultados de desempenho dos modelos é significativa, pois, em se tratando de uma área crítica como o controle de tráfego aéreo, qualquer aumento de concordância nas decisões são relevantes, aumentando o grau de confiança do modelo.

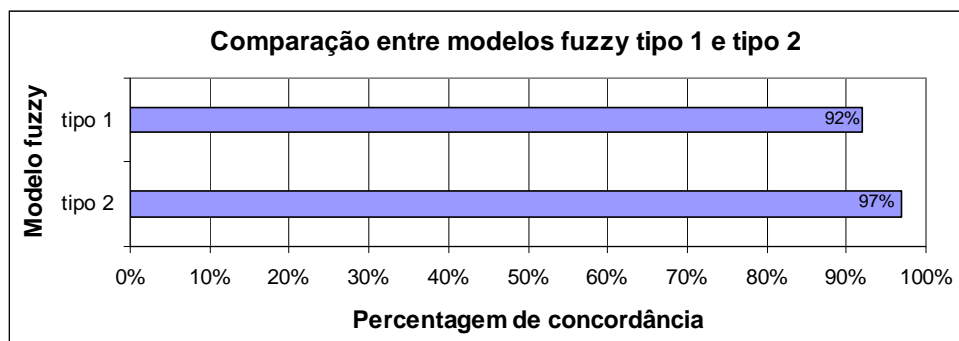


Figura 65. Percentagem de concordância entre os modelos fuzzy (tipo 1 médio e tipo 2) e os casos reais de tomada de decisão.

Uma outra análise realizada foi a investigação dos casos que não ocasionaram concordância na Figura 64. Neste sentido, excetuando-se os casos de concordância nas respostas de autorizações (discutido anteriormente). A qualidade das decisões sugeridas pelos modelos foi verificada com base em outros dois aspectos, quais sejam a *fluidez* e a *precaução*. A fluidez nesta análise é definida como a tendência em autorizar mais aeronaves a decolarem, e a precaução é a tendência de manter aeronaves no solo ou de decolar de imediato. Por exemplo, considere um cenário em que é bem possível que uma aeronave decole de imediato antes do pouso de outra. Se o controlador de tráfego aéreo não autorizar a decolagem ele estará sendo precavido, mas se ele autorizar a decolagem e os eventos se realizarem de modo seguro, ele estará dando fluidez ao tráfego aéreo. A caracterização de concordância, fluidez e precaução é realizada através da comparação da decisão real e da saída do sistema. Se a saída coincidir com a decisão real dada pelo controlador, então fica caracterizada a concordância do modelo. Se a saída do sistema resultar em um valor⁴¹ maior que a decisão real, então o

⁴¹ A hierarquia dos valores das saídas é definida logicamente como: nao-decola < decola-imediato < decola, onde um valor alto caracteriza uma possibilidade maior de decolagem, enquanto que um valor baixo caracteriza uma possibilidade menor de decolagem. Os valores dos termos da variável de saída são descritos no passo 10 do capítulo 5.

sistema estará dando mais fluidez ao tráfego aéreo, mas se a saída do sistema resultar em um valor menor que a decisão real, então o sistema está sendo mais precavido nas decisões. Estas relações são propostas e mostradas na Tabela 9.

Tabela 9. Caracterização de concordância, fluidez e precaução de modelos.

Decisão real	Saída do modelo	Indicação do modelo
<i>nao-decola</i>	<i>nao-decola</i>	concordância
<i>nao-decola</i>	<i>decola-imediato</i>	fluidez
<i>nao-decola</i>	<i>decola</i>	fluidez
<i>decola-imediato</i>	<i>nao-decola</i>	precaução
<i>decola-imediato</i>	<i>decola-imediato</i>	concordância
<i>decola-imediato</i>	<i>decola</i>	fluidez
<i>decola</i>	<i>nao-decola</i>	precaução
<i>decola</i>	<i>decola-imediato</i>	precaução
<i>decola</i>	<i>decola</i>	concordância

Tomando por base os dados reais das autorizações de decolagem (cem casos coletados) e considerando que elas sejam as ideais, pode-se traçar um gráfico detalhado de comparações entre estas autorizações reais e aquelas indicadas pelos modelos fuzzy, levando em consideração a fluidez e a precaução. Na Figura 66 é apresentado este gráfico onde os modelos fuzzy comparados são os do tipo 1 de cada controlador, o modelo fuzzy tipo 1 médio e o modelo fuzzy tipo 2.

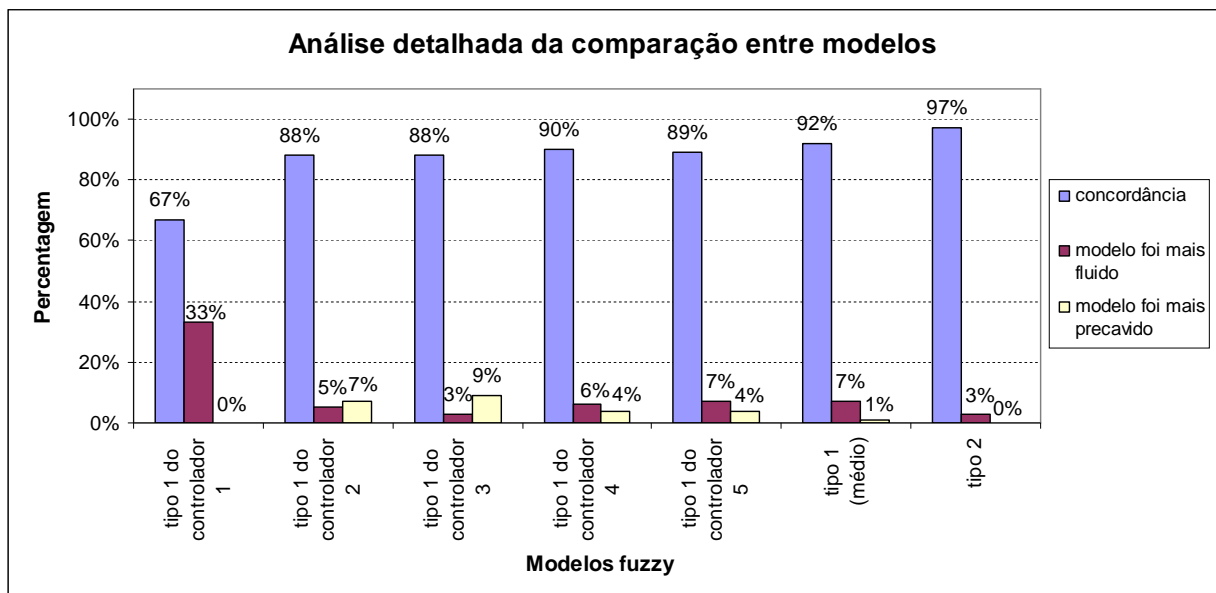


Figura 66. Análise de fluidez e precaução dos modelos fuzzy

Através da Figura 66, verifica-se que todos os modelos apresentaram algum aspecto de discordância em relação à decisão real efetivamente tomada. A indicação de fluidez dos modelos sugere uma tomada de decisão no sentido de autorizar a decolagem da aeronave em espera. Vale ressaltar, entretanto, que a característica de fluidez nos modelos não é um fator

necessariamente desejável, pois representa, como nos casos da Figura 66 em que há discordância modelo/realidade, autorizações de decolagens que o especialista humano não as emitiu. Esta fluidez poderia ser benéfica, desde que haja certeza de que a decolagem e pouso das aeronaves se realizem de modo seguro, mas também poderia constituir risco para o tráfego aéreo, pois a aeronave que pousa poderia se encontrar muito próximo da pista que a outra aeronave estaria utilizando para decolar, constituindo um risco potencial para um incidente ou acidente aéreo. Esta diferenciação dos dois tipos de fluidez não foi objeto de pesquisa deste trabalho, pois está intimamente relacionada à experiência e percepções humanas, sendo impraticável validá-las em um ambiente real devido ao risco inerente de colisão entre as aeronaves. Portanto, verifica-se a necessidade da criação de um simulador para avaliar a potencialidade efetiva das decisões em que o modelo apresentou fluidez, sem prejuízo ao tráfego aéreo real. Se as indicações de fluidez dos modelos forem comprovadas como benéficas, o modelo fuzzy tipo 1 do controlador 1 seria o mais adequado para ser explorado, pois seu nível de fluidez (33%) poderia acarretar consideráveis ganhos para a fluidez do tráfego aéreo. Independentemente da análise de fluidez, constatou-se que o modelo fuzzy tipo 2 foi o melhor quanto à *representação do conhecimento especialista* neste contexto de decisões.

Já a indicação de precaução na Figura 66 corresponde a uma cautela nas respostas do modelo diante das decisões reais. Os modelos que apresentaram maior índice de precaução foram os do tipo 1 dos controladores 2 e 3, enquanto que os modelos do tipo 1 do controlador 1 e o do tipo 2 não apresentaram qualquer situação de decisão caracterizada como precavida conforme a classificação estabelecida na Tabela 9.

Com esta análise é possível perceber que os modelos fuzzy tipo 1 individuais de todos os controladores poderiam ser ajustados para possibilitar o aumento de seus graus de concordância em relação às decisões reais. Estes ajustes poderiam também elevar o grau de concordância do sistema fuzzy tipo 2, uma vez que este depende da modelagem dos conjuntos fuzzy tipo 1 individuais.

6.3. Superfícies de solução

Um modo de analisar um sistema fuzzy, independentemente de tipo, modelo ou ordem, é através de superfícies de solução. Através destas superfícies pode-se analisar a relação das variáveis de entrada com a variável de saída do sistema. Tal análise é importante para se perceber a coerência das decisões modelo com as decisões da realidade.

Uma vez que o sistema deste trabalho é composto por quatro variáveis de entrada e uma de saída, a superfície geral de solução é um hiperespaço de cinco dimensões e, portanto, impossível de ser visualizado graficamente. Por este motivo, são fixadas duas constantes para duas variáveis de entrada para possibilitar a visualização da superfície em três dimensões. Em seguida são apresentadas algumas situações que representam cenários de tomadas de decisão e suas superfícies de solução que representam aquele momento.

Considere um cenário onde a aeronave que intenciona decolar esteja parada (*velocidade-dec* = 0 KT) e a aeronave que se aproxima para pouso esteja a 120 KT (*velocidade-aprox* = 120 KT). A superfície de solução deste cenário é apresentada na Figura 67. A área em vermelho escuro (e suas gradações) representa os casos em que é dada autorização de decolagem, a área em laranja (e suas gradações) representa os casos de decolagem de imediato e a área em azul escuro (e suas gradações) representa os casos de proibição de decolagem naquele momento. Para um exemplo, se *distancia-dec* = 200 m e *distancia-aprox* = 7 NM, a solução é representada por um ponto alaranjado, ou seja, *decola-imediato*, que representa a autorização de decolagem de imediato da aeronave (o ponto está mais próximo da área laranja que do vermelho escuro ou azul escuro). Ainda nesta superfície pode-se analisar qualquer combinação de *distancia-dec* x *distancia-aprox* (dentro de seus universos de discurso) e sua respectiva resposta no eixo Z, representado pela variável *autorizacao* (os valores correspondentes aos termos de *autorizacao* foram apresentados na Tabela 6).

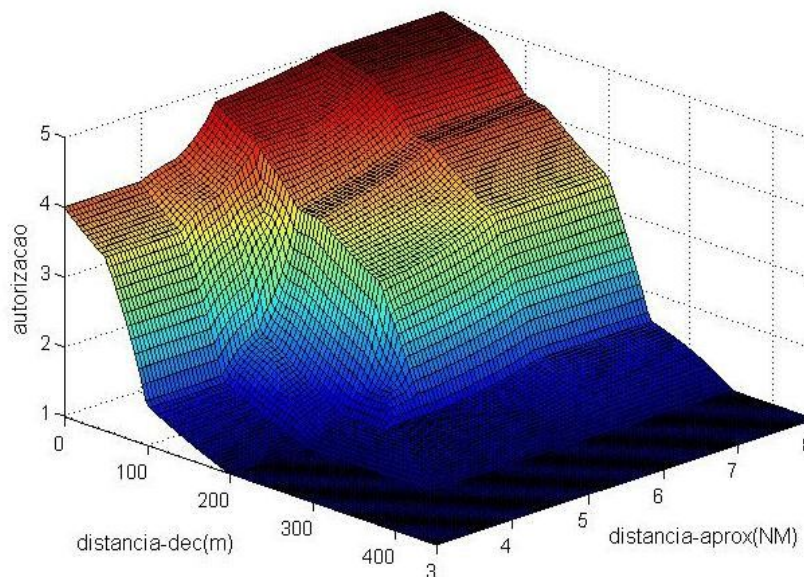


Figura 67. Superfície de solução para *velocidade-dec* = 0 KT e *velocidade-aprox* = 120 KT.

Considere agora *velocidade-aprox* = 160 KT e *velocidade-dec* permanecendo igual a 0 KT. A superfície sofre um rebaixamento generalizado (Figura 68). Isto se deve ao fato da

aeronave que está por pousar ter uma maior velocidade, diminuindo as possibilidades de decolagem da outra aeronave.

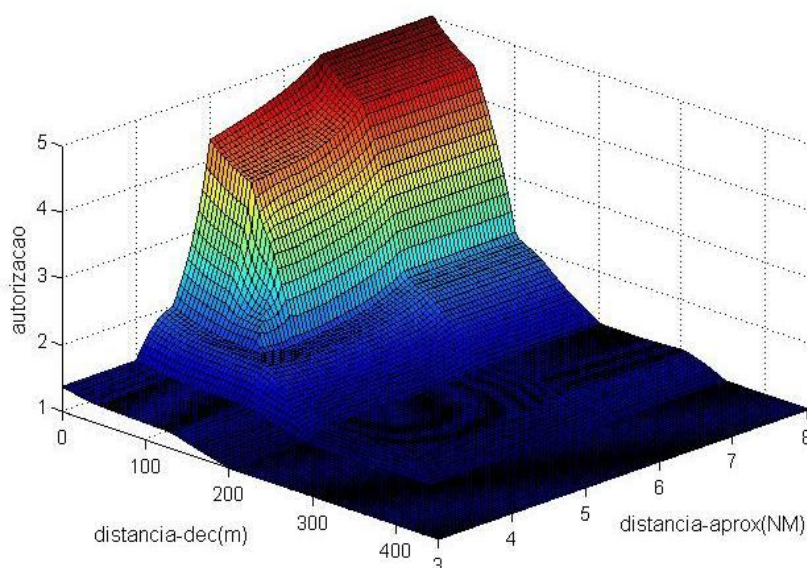


Figura 68. Superfície de solução para *velocidade-dec* = 0 KT e *velocidade-aprox* = 160 KT.

Considere agora *velocidade-dec* aumentada para 10 KT e *velocidade-aprox* permanecendo igual a 160 KT. A superfície se eleva em várias partes e em graus diferentes (Figura 69), algumas são drasticamente elevadas como a área próxima a 300 m e 7 NM (de *nao-decola* para *decola-imediato*). Isto se deve ao fato de que o aumento dado à variável *velocidade-dec* (10 KT) é muito relevante para as regras do modelo, ocasionando mais possibilidades de autorização de decolagem, fato que contribui para a fluidez do tráfego aéreo.

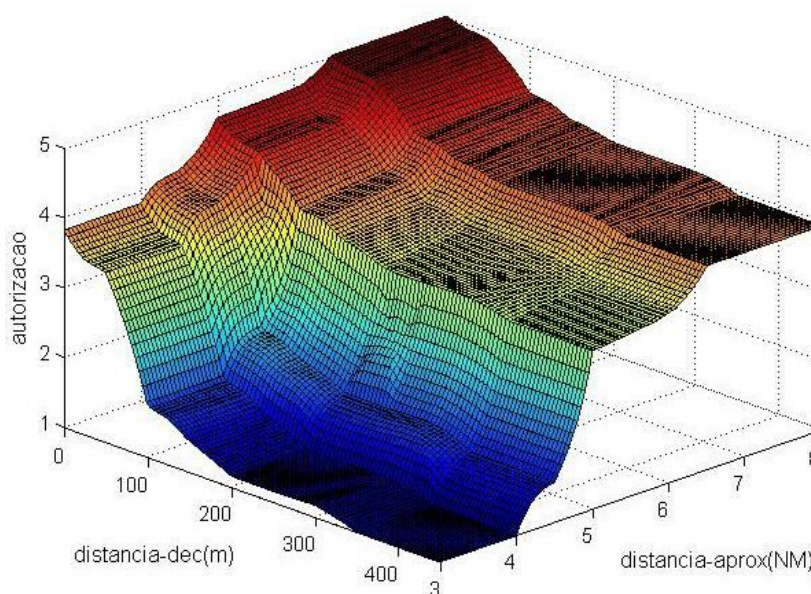


Figura 69. Superfície de solução para *velocidade-dec* = 10 KT e *velocidade-aprox* = 160 KT.

Até o momento foram apresentadas superfícies com as variáveis *velocidade-dec* e *velocidade-aprox* constantes. Porém, outras combinações de variáveis podem ser realizadas para análise da superfície, como por exemplo, na Figura 70, onde *distancia-dec* = 250 m e *distancia-aprox* = 6,8 NM. Neste cenário, o sistema indicará *decola* para os casos em que *velocidade-dec* estiver entre 10 e 20 KT e *velocidade-aprox* estiver entre 120 e 150 KT. A área alaranjada indica os casos de *decola-imediato*, quando *velocidade-dec* estiver entre 10 e 20 KT e *velocidade-aprox* estiver entre 150 e 200 KT. Para a aeronave do solo parada (*velocidade-dec* = 0 KT), ela nunca seria indicada a decolar, independentemente da velocidade (*velocidade-aprox*) da aeronave que está por pousar (para verificar basta seguir no gráfico a linha azul correspondente *velocidade-dec* = 0), esta resposta é obtida ainda levando em consideração *distancia-dec* = 250 m e *distancia-aprox* = 6,8 NM. Diversas outras análises poderiam ser realizadas sobre uma mesma superfície. É importante também perceber que a cada mudança dos valores das variáveis estabelecidas como constantes, uma nova superfície é gerada.

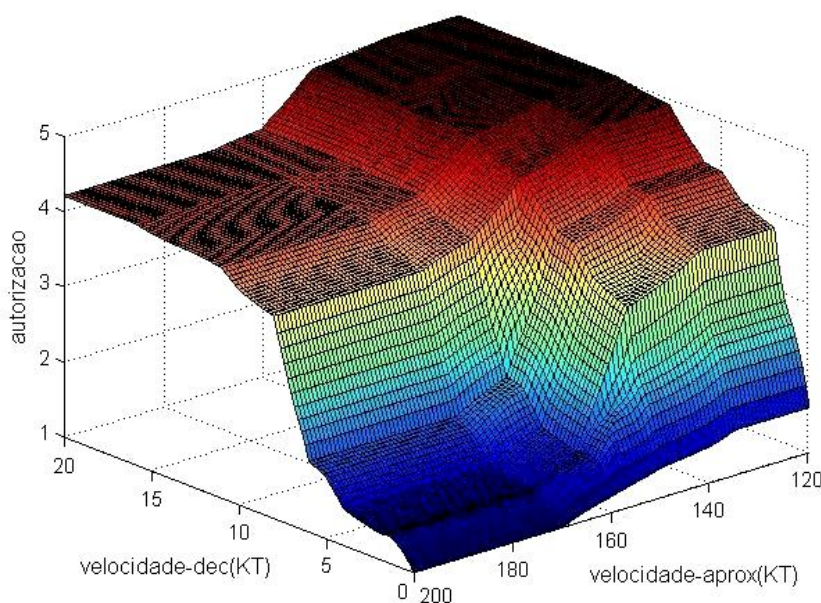


Figura 70. Superfície de solução para *distancia-dec* = 250 m e *distancia-aprox* = 6,8 NM.

Pela razão do modelo fuzzy tipo 2 ser TSK intervalar, a inferência do sistema sempre resulta um conjunto fuzzy tipo 1 intervalar. A saída do sistema é obtido através da média aritmética entre os limites esquerdo e direito deste conjunto. Na figura 71 são apresentadas superfícies de solução para o caso *distancia-aprox* = 5,5 NM e *velocidade-aprox* = 162 KT. Em (a) é levado em consideração apenas as funções de pertinência inferior do sistema, em (b) é levado em consideração apenas as funções de pertinência superior e em (c) é apresentado a

média entre as superfícies (a) e (b), isto é, a superfície utilizada como resposta final do sistema. Em (d) são apresentadas as superfícies de (a) e (b) em um mesmo espaço. Em (e) são apresentadas simultaneamente as superfícies de (a), (b) e (c), isto é, as superfícies inferior, superior e média do sistema. O padrão de cores das superfícies de (d) e (e) foram alteradas para possibilitar uma melhor identificação das superfícies.

As superfícies de solução podem ser interpretadas como um elemento de autoconhecimento, no qual os especialistas podem obter uma visão parcial de suas atitudes em relação à tomada de decisão do cenário definido.

Muitos outros cenários poderiam ser esboçados, mas o importante é perceber a quantidade e complexidade dos cálculos que devem ser realizados para gerar apenas um número, que corresponderá à decisão final. Tal decisão, para um controlador de tráfego aéreo experiente, é realizada de forma bem natural e ela se agrega a inúmeras outras em seu cotidiano. Também é importante salientar que para todos os casos deste sistema, as possíveis superfícies de solução geradas são não-lineares, validando as afirmações de Lee (2005) e Jamshidi (2006), que classificam os sistemas de tráfego aéreo como de grande complexidade.

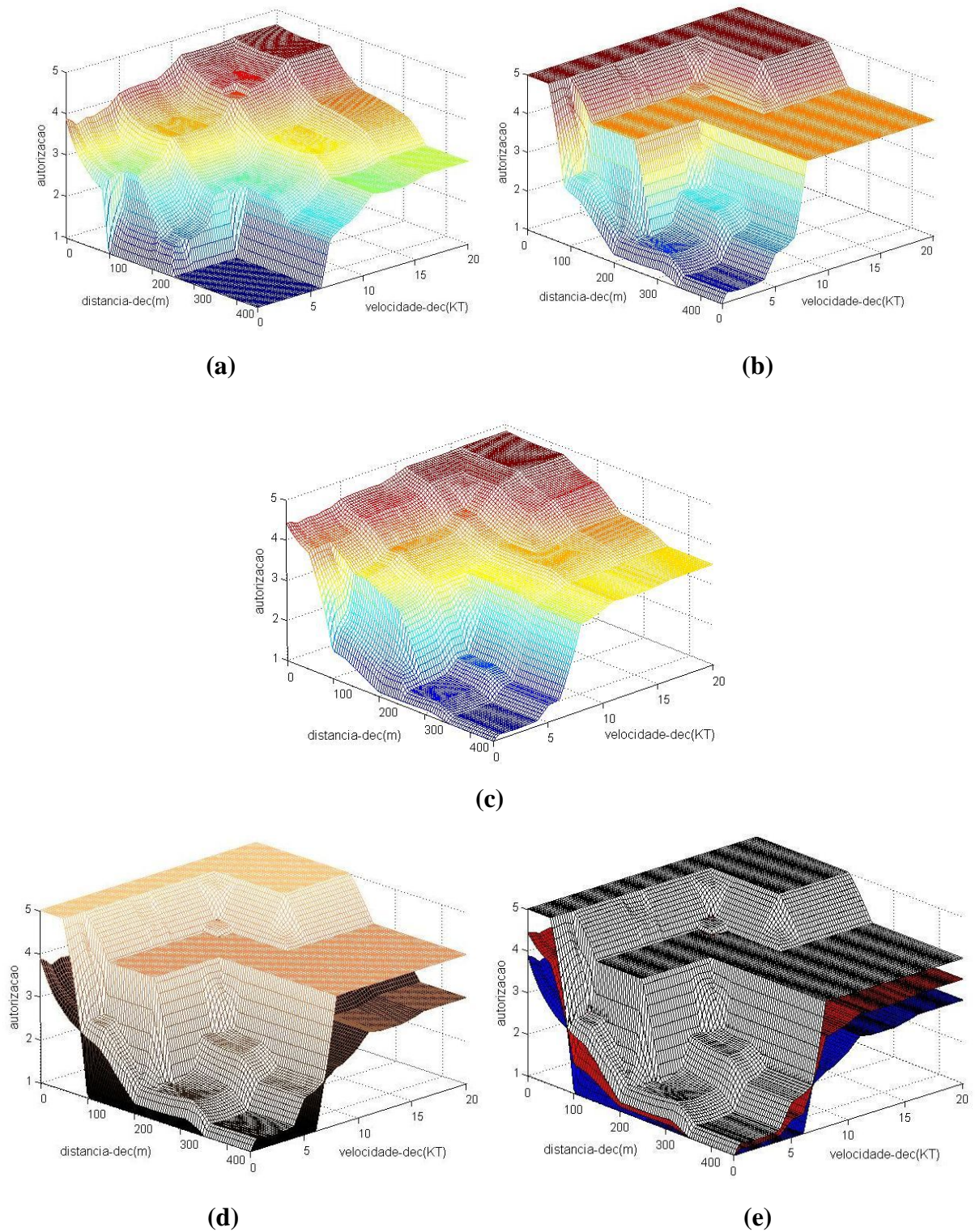


Figura 71. Superfície de solução para $distancia\text{-}aprox = 5,5$ NM e $velocidade\text{-}aprox = 162$ KT. (a) superfície para funções de pertinência inferior. (b) superfície para funções de pertinência superior. (c) média entre as superfícies inferior e superior. (d) superfícies inferior e superior em um mesmo espaço. (e) superfícies inferior, superior e média em um mesmo espaço.

7. Conclusões

A lógica fuzzy tipo 2 é uma extensão da lógica fuzzy tradicional que viabiliza o tratamento de certos tipos de incertezas que a lógica tradicional não contempla, tais como limites incertos de conjuntos, graus de pertinência imprecisos ou incerteza do formato das funções de pertinência. A incerteza dos limites dos conjuntos fuzzy muitas vezes é dada pelas definições oriundas de informações de especialistas, e também é dada pelo ruído de coleta ou aquisição de dados utilizados nos sistemas 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. Para o estudo de caso, foi necessária a criação de uma metodologia para modelar sistemas fuzzy para este contexto específico. Também foi desenvolvido um *framework* para validação deste modelo. Um cenário de tomada de decisão no controle de tráfego aéreo do Aeroporto Internacional de Salvador 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.

Em linhas gerais, a metodologia desenvolvida e adotada facilitou o trabalho investigativo da lógica fuzzy em tráfego aéreo. Foram adotados passos nos quais cada tarefa foi claramente descrita e exemplificada quando pertinente. Os registros de dados e informações do trabalho foram feitos de modo a padronizar e facilitar o resgate de informações de forma sistemática.

O *framework* desenvolvido possibilitou a aplicação dos conceitos da lógica fuzzy tipo 2 sobre o estudo de caso. Além disso, detalhes do seu desenvolvimento e configuração foram mostrados para possibilitar modificações para criação de outros modelos.

Através dos resultados obtidos em vários tipos de comparações de modelos fuzzy tipo 1, foi possível identificar que o modelo fuzzy tipo 2 foi a melhor proposta de reprodução das tomadas de decisões em tráfego aéreo para o cenário definido. Este fato não apenas aponta para o sucesso da metodologia proposta, como também para uma possível consolidação do uso do sistema de inferência desenvolvido para apoiar a tomada de decisão, servindo, inclusive, como plataforma de reciclagem e/ou treinamento de operadores.

Foi realizada uma análise sobre a fluidez e precaução, contudo esta análise não foi conclusiva, mas abre portas para novos aperfeiçoamentos e estudos em pesquisas sobre o

tema. Portanto a atenção foi direcionada para os casos de concordância entre as decisões reais e as indicadas pelo modelo.

Uma das principais dificuldades encontradas para a realização do trabalho foi a falta de uma ferramenta pronta adequada para a construção do sistema estudado. Por isso, houve a necessidade de construir um *framework* para tal fim. A fase mais demorada foi a de levantamento de dados para validação, que ocorreu em paralelo com o desenvolvimento do *framework* e redação da dissertação. Houve dias em que puderam ser coletados até cinco casos de tomada de decisão, enquanto que houve dias em que não foi possível coletar nenhum caso, pois nem sempre o cenário estudado era estabelecido. Muitas vezes ocorreram grandes seqüências de aeronaves para pouso sem nenhuma aeronave por decolar e vice-versa, e era bem comum ocorrer casos em que alguma das aeronaves encontrava-se fora do universo de discurso do modelo.

Como sugestão para trabalhos futuros, alguns aspectos podem ser estudados, como:

- A necessidade de um ajuste mais fiel para os valores dos termos da variável de saída do sistema (1, 4, 5). Este ajuste poderia ser realizado através de alguma técnica de otimização, como algoritmos genéticos, colônia de formigas, *swarm bee* ou enxame de partículas;

- Investigação e utilização das incertezas também associadas aos consequentes, onde a incerteza seria representada por conjuntos fuzzy tipo 1 intervalares. Esta abordagem admite decisões diferentes para controladores diferentes sob mesmos antecedentes das regras fuzzy;

- Aplicar a mesma metodologia de desenvolvimento deste modelo, porém utilizar conjuntos fuzzy tipo 2 não intervalares, tais como gaussianos. Para isso o grupo de especialistas deve ser maior e mais treinado a respeito dos conjuntos fuzzy tipo 2 a serem modelados, pois nesta modalidade o grau de pertinência secundário não tem necessariamente o valor 1 ao longo da função de pertinência primária;

- Uma ferramenta mais desenvolvida do sistema que contemple a conexão de sensores para captar automaticamente as variáveis de entrada do sistema;

- Uma abordagem mais robusta do modelo para seu uso em tempo real, onde o modelo estaria respondendo de acordo com a dinâmica das aeronaves envolvidas no cenário. O modelo desenvolvido neste trabalho é de certa forma estático, ou seja, avalia apenas as variáveis de entrada em um dado instante;

- O desenvolvimento de uma metodologia para melhor escolher os controladores de tráfego aéreo que proporcionam maior fluidez ao tráfego aéreo com segurança, pois durante o trabalho de campo foi percebido que até estagiários estavam proporcionando mais fluidez ao tráfego (em raras ocorrências). Também existem controladores de tráfego aéreo antigos que

não perderam suas habilidades cognitivas de fluidez e poderiam fazer parte da equipe de especialistas;

- O desenvolvimento de um simulador para a análise de sistemas como este e também para validação e medição de fluidez de tráfego, uma vez que não seria factível a realização de testes diretamente no ambiente operacional;

- Desenvolvimento de uma ferramenta gráfica para o *framework*, a fim de facilitar sua utilização em termos de amigabilidade e usabilidade.

REFERÊNCIAS

- AEROESPACÇO. **Informativo do Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA.** Nossos castelos estão seguros? Ano 3, nº 21, p. 20, 2006.
- AGÜERO, J. R.; VARGAS, A. **Calculating Functions of Interval Type-2 Fuzzy Numbers for Fault Current Analysis.** Fuzzy Systems, IEEE Transactions on. Vol. 15, Issue 1, p. 31-40, feb. 2007.
- ANAC – Agencia Nacional de Aviação Civil. **RVSM no Brasil: uma Realidade.** Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/RVSM.asp>>. Acesso em: 28 fev. 2008.
- ANAGNOSTAKIS, I.; CLARKE, J.-P. **Runway Operations Planning: a Two-stage Solution Methodology.** System Sciences, 2003. Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on. p. 12, Jan. 6-9, 2003.
- ANDRIOLE, S. J. **Handbook of Decision Support Systems.** Tab Publishers, Blue Ridge Summit, Penn., 1989.
- ASSOCIAÇÃO DOS CONTROLADORES DE TRÁFEGO AÉREO DE GUARULHOS. **Um Pouco de História ...** Disponível em: <<http://www.actagru.org.br/atc.htm>>. Acesso em: 01 jan. 2006.
- ASTUDILLO, L.; CASTILLO, O.; AGUILAR, L. T. **Intelligent Control of an Autonomous Mobile Robot Using Type-2 Fuzzy Logic.** Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana – México, 2006.
- BABIĆ O.; KRSTIĆ, T. **Airspace Daily Operational Sectorization by Fuzzy Logic.** Fuzzy Sets and Systems. Volume 116, Issue 1. Special Issue on Fuzzy Sets in Traffic and Transport Systems. p. 49-64, Nov. 2000.
- BOLES, T. **BAE Uses Fuzzy Logic to Make Wind Farms Vanish.** The Business, London. Jun. 29, 2005.
- BOROWSK E. J.; BORWEIN J. M. **Dizionario Collins della Matematica.** I Grandi Dizionari Economici. Ed. Gremese. 2004. 423 p.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Instituto de Cartografia da Aeronáutica. **ROTAER – Manual Auxiliar de Rotas Aéreas.** 3ª Edição, 04 nov. 1999.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Instituto de Cartografia da Aeronáutica. Programa Cartográfico Aeroportuário e de Proteção ao Vôo. **Aeroporto Internacional Dep. Luís Eduardo Magalhães Salvador / BA.** Convênio INFRAERO/DEPV – ICA - 2000. 1 mapa, folha 12, p & b, escala 1:1.875.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Meteorologia Aeronáutica para BCT:** Apostila. Escola de Especialistas de Aeronáutica. Guaratinguetá – SP, 2001.

- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Divisão de Informações Aeronáuticas. **ICA 100-12 – Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo**. Aprovada em 16 fev. 2006.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Divisão de Informações Aeronáuticas. **ICA 100-11 – Plano de Voo – 2008**. Publicado no BCA n°218 de 09 nov. 2007.
- CAMARGO JÚNIOR, J. B.; NASCIMENTO, R. L. **Simulação de Algoritmos Aplicados ao Controle de Tráfego Aéreo**. In: 10° Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, SIICUSP. Vol. 1, São Carlo, 2002.
- CASTILLO, O.; MELIN, P. **A New Hybrid Approach for Plant Monitoring and Diagnostics Using Type-2 Fuzzy Logic and Fractal Theory**. The 12th IEEE International Conference on FUZZ '03. Vol. 1, p. 102-107, May 25-28, 2003.
- CASTILLO, O.; MELIN, P. **Adaptive Noise Cancellation Using Type-2 Fuzzy Logic and Neural Networks**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Volume 2, p. 1093-1098, Jul. 25-29, 2004.
- CCI – Centre for Computational Intelligence. **CCI Events**. Disponível em: <<http://www.cci.dmu.ac.uk>>. Acesso em: 22 jun. 2008.
- CLYMER, J. R. **Induction of Fuzzy Rules for Air Traffic Control**. Proceedings – 1995 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Vancouver, British Columbia, Canada, p. 1495-1502, Oct. 1995.
- COUPLAND, S. **Type-2 Fuzzy Control of a Mobile Robot**. Centre for Computational Intelligence De Montfort University. The Gateway Leicester. United Kingdom, 2003, 29 p.
- COUPLAND, S.; JOHN, R. **A New and Efficient Method for the Type-2 Meet Operation**. Proceedings, IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Budapest, Hungary, vol. 2, p. 959-964, Jul. 25-29, 2004.
- COUPLAND, S.; JOHN, R. **Towards More Efficient Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on. P. 236-241, May 22-25, 2005.
- COUPLAND, S.; JOHN, R. **An Investigation into Alternative Methods for the Defuzzification of an Interval Type-2 Fuzzy Set**. Fuzzy Systems, IEEE International Conference on. P. 1425-1432, Jul. 16-21, 2006.
- COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems**. Londres: Academic, 1994, 623 p.
- DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Missão do DECEA**. Disponível em: <<http://www.decea.gov.br>>. Acesso em: 28 fev. 2008.
- DI LASCIO, L.; GISOLFI, A. **A Type-2 Fuzzy Residuated Algebra**. Fuzzy Information Processing Society. NAFIPS 2005. Annual Meeting of the North American. P. 525-527,

Jun. 26-28, 2005.

DI LASCIO, L.; GISOLFI, A.; NAPPI, A. **Medical Differential Diagnosis through Type-2 Fuzzy Sets**. Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on. P. 371-376, May 22-25, 2005.

DICIONÁRIO MÉDICO. Disponível: <<http://boasaude.uol.com.br/dic/index.cfm?Lookup=M&CurrentPage=3>>. Acesso: 23 fev. 2007.

DOCTOR, F.; HAGRAS, H.; CALLAGHAN, V. **A Type-2 Fuzzy Embedded Agent for Ubiquitous Computing Environments**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 1105-1110, Jul. 25-29, 2004.

DU, G.-N.; ZHU, Z.-Y. **Modelling Spatial Vagueness Based on Type-2 Fuzzy Set**. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. p. 250-256, 2006.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Operations on Fuzzy Numbers**. Int. J. Systems Science. Vol. 9, p. 613-626, 1978.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Operations in a Fuzzy-Valued Logic**. Information and Control. Vol. 43, p. 224-240, 1979.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications**. Academic Press, NY, 1980.

FERREIRA, A. L. G.; PARANHOS, J. P. de S. **Controle em Tempo Real por Lógica Fuzzy**. Resende: Faculdade de Engenharia de Resende, 2004.

FIGUEROA, J.; POSADA, J.; SORIANO, J.; MELGAREJO, M.; ROJAS, S. **A Type-2 Fuzzy Controller for Tracking Mobile Objects in the Context of Robotic Soccer Games**. Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on. P. 359-364, May 22-25, 2005.

GAO, H.; CHEN, L.; CHEN, D. **Air Traffic Fuzzy Control of The Single Airport Ground-Holding Problem**. The proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation System. P. 703-707, Oct. 2003.

GILBERT, G. **Historical Development of the Air Traffic Control System**. Communications, IEEE Transactions on [legacy, pre - 1988]. Vol. 21, Issue 5, p. 364-375, May 1973.

GU, L. **Web Shopping Expert Systems Using New Interval Type-2 Fuzzy Reasoning**. Master Thesis, College of Arts and Sciences. Georgia State University, 2005, 56 p.

HAGRAS, H. **A Type-2 Fuzzy Logic Controller for Autonomous Mobile Robots**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 965-970, 25-29 Jul. 2004a.

HAGRAS, H. A. **A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile Robots**. IEEE Transactions on fuzzy systems. Vol. 12, no. 4, Aug. 2004b.

- HAGRAS, H. **Comments on Dynamical Optimal Training for Interval Type-2 Fuzzy Neural Network (T2FNN)**. Systems, Man and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on. Vol. 36, Issue 5, p. 1206-1209, Oct. 2006.
- HICKS, T.; CRAWFORD, T.; WILSON, M. **A Fuzzy Logic System for Automated Short Term Aviation Weather Forecasts**. 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environment Science. CA, EUA, Feb. 11, 2003.
- HISDAL, E. **The IF-THEN ELSE Statement and Interval-Values Fuzzy Sets of Higher Type**. Int'l J. Man-Machine Studies. Vol. 15, p. 385-455, 1981.
- HOMAIFAR, A.; SHEN, Y.; STACK B. V. **Vibration Control of Plate Structures Using PZT Actuators and Type II Fuzzy Logic**. Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA, Jun. 25-27, 2001.
- HUANG, S.-H.; CHEN Y.-R. **VLSI Implementation of Type-2 Fuzzy Inference Processor**. Circuits and Systems, 2005. ISCAS 2005. IEEE International Symposium on. Vol. 4, p. 3307-3310, May 23-26, 2005.
- HUARNG, K.; YU, H.-K. **A Type 2 Fuzzy Time Series Model for Stock Index Forecasting**. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 353, p. 445-462, Aug. 1, 2005.
- HWANG, C.; RHEE, F. C-H. **An Interval Type-2 Fuzzy C Spherical Shells Algorithm**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 1117-1122, Jul. 25-29, 2004.
- INFRAERO. **Movimento nos Aeroportos**. Disponível em: <www.infraero.gov.br>. Acesso em: 28 fev. 2008.
- INNOCENT, P. R.; JOHN, R. I.; BELTON, I.; FINLAY, D. **Type 2 Fuzzy Representations of Lung Scans to Predict Pulmonary Emboli**. IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. Vol. 4, p.1902-1907, Jul. 25-28, 2001.
- INNOCENT, P. R.; JOHN, R. I. **Type-2 Fuzzy Diagnosis**. Fuzzy Systems, 2002. FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 1326-1330, May 12-17, 2002.
- JAMSHIDI, M. **System of Systems - From Definition to Architecture to Simulation to Space Applications**. IEEE IRI 2006 Keynote Speech(I). Information Reuse and Integration, 2006 IEEE International Conference on. p. ix-x, Sep. 2006.
- JANG R. (2002). Arquivo **TRAPMF.M**: Cálculo do grau de pertinência de um conjunto fuzzy trapezoidal. Copyright 1994-2002 The MathWorks, Inc. Revision: 1.22. For MATLAB®, Apr. 14, 2002, 22:21:13.
- JOHN, R.; COUPLAND, S. **Type-2 Fuzzy Logic: A Historical View**. Extensions to Type-1 Fuzzy Logic: Type-2 Fuzzy Logic and Uncertainty. IEEE Computational Intelligence Magazine. Cap. 5, p. 57-62, Feb. 2007.

- JOHN, R. I.; INNOCENT, P. R.; BARNES, M. R. **Neuro-fuzzy Clustering of Radiographic Tibia Image Data Using Type 2 Fuzzy Sets**. *Inf. Sci.* 125, n° 1-4, p. 65-82, 2000.
- JOHN, R.; LAKE, S. **Type-2 Fuzzy Sets for Modelling Nursing Intuition**. *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th.* Vol. 4, p. 1920-1925, Jul. 25-28, 2001.
- KARNIK, N. N.; 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, p.915-920, May 4-9, 1998.
- KARNIK, N. N.; MENDEL, J. M.; LIANG, Q. **Type-2 Fuzzy Logic Systems**. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* Vol. 7, n° 6, Dec. 1999.
- KARNIK, N. N.; MENDEL, J. M. **Applications of Type-2 Fuzzy Logic Systems: Handling the Uncertainty Associated with Surveys**. *Fuzzy Systems Conference Proceedings, 1999. FUZZ-IEEE '99.* 1999 IEEE International. Vol. 3, p. 1546-1551, Aug. 22-25, 1999.
- KARNIK, N. N.; MENDEL, J. M. **Operations on Type-2 Fuzzy Sets**. *Int'l. J. on Fuzzy Sets and Systems.* P. 327-348, 2000.
- KASABOV, N. K. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering**. 2. ed. Londres: Massachusetts Institute of Technology. 1998, 550 p.
- KAUR, D.; WILSON, D. A. **Trust Evaluation within a Type-2 Fuzzy Logic Framework**. *Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on.* Vol. 1, p. 203-207, Jul. 25-29, 2004.
- KESSINGER, C.; ELLIS, S.; ANDEL, J. V. **The Radar Echo Classifier: A Fuzzy Logic Algorithm for the WSR-88D**. *3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environment Science.* CA, EUA, Feb. 11, 2003.
- KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**. Londres: Prentice-Hall P. T. R., 1995.
- KUCHAR, J. K.; YANG L. C. **A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods**. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* Vol. 1, n° 4, p. 179-189, Dec. 2000.
- LEE, P. U. **Understanding Human-human Collaboration to Guide Human-computer Interaction Design in Air Traffic Control**. *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on.* Vol. 2, p. 1598-1603, Oct. 10-12, 2005.
- LEE, C.-H.; LIN, Y.-C. **Control of Nonlinear Uncertain Systems Using Type-2 Fuzzy Neural Network and Adaptive Filter**. *Networking, Sensing and Control, 2004 IEEE International Conference on.* Vol. 2, p. 1177-1182, 2004.
- LEE, C.-H.; CHANG, H.-H.; WANG, B.-H. **Decoupled Adaptive Type-2 Fuzzy Controller (DAT2FC) Design for Nonlinear TORA Systems**. *Fuzzy Systems, 2006 IEEE International Conference on.* P. 506-512, Jul. 16-21, 2006.

- LI, L.; LIN, W.-H.; LIU, H. **Type-2 Fuzzy Logic Approach for Short-term Traffic Forecasting**. Intelligent Transport Systems, IEE Proceedings. Vol. 153, Issue 1, p. 33-40, Mar. 2006.
- LIANG, Q.; KARNIK, N. N.; MENDEL, J. M. **Connection Admission Control in ATM Networks Using Survey-based Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Systems, Man and Cybernetics, Part C, IEEE Transactions on. Vol. 30, Issue 3, p. 329-339, Aug. 2000.
- LIANG, Q.; MENDEL, J. M. **Interval Type-2 TSK Fuzzy Logic Systems with Application to MPEG VBR Video Traffic Forecasting**. Submitted for publication, 2000.
- LIMA, M. P.; AMORIM, C. A. **Um Modelo Fuzzy para Apoio à Tomada de Decisão no Controle de Tráfego Aéreo**. REIC – Revista Eletrônica de Iniciação Científica. Sociedade Brasileira de Computação. Ano VII, n° 1, 2007.
- LINDHOLM, T. A. **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. p. 39, Nov. 2005.
- MAXWELL, R. L. **Automation Possibilities in Air Traffic Control**. Decision and Control including the 14th Symposium on Adaptive Processes, 1975 IEEE Conference on. Vol. 14, Part 1, p. 561-566, Dec. 1975.
- MEDINA, M. de H.; MENDEZ, G. M. **Modeling and Prediction of the MXNUSD Exchange Rate Using Interval Singleton Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Fuzzy Systems, 2006 IEEE International Conference on. P. 2305-2308, Jul. 16-21, 2006.
- MELGAREJO, M.; PEÑA-REYES, C. A.; GARCA, A. **Computational Model and Architectural Proposal for a Hardware Type-2 Fuzzy System**. From Proceeding (413) Neural Networks and Computational Intelligence. 2004a.
- MELGAREJO, M. A.; GARCIA, R. A.; PENA-REYES, C. A. **Pro-Two: a Hardware Based Platform for Real Time Type-2 Fuzzy Inference**. Fuzzy Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 977-982, Jul. 25-29, 2004b.
- MELIN, P.; CASTILLO, O. **A New Approach for Quality Control of Sound Speakers Combining Type-2 Fuzzy Logic and the Fractal Dimension**. Fuzzy Information Processing Society, 2003. NAFIPS 2003. 22nd International Conference of the North American. EUA, p. 38-43, Jul. 24-26, 2003a.
- MELIN, P.; CASTILLO, O. **A New Method for Adaptive Model-based Control of Non-linear Plants Using Type-2 Fuzzy Logic and Neural Networks**. The 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Vol. 1, p. 420-425, May 25-28, 2003b.
- MENCATTINI, A.; SALMERI, M.; BERTAZZONI, S.; LOJACONO, R.; PASERO, E.; MONIACI, W. **Local Meteorological Forecasting by Type-2 Fuzzy Systems Time Series Prediction**. Computational Intelligence for Measurement Systems and

- Applications, 2005. CIMSAs. 2005 IEEE International Conference on. P. 75-80, Jul. 20-22, 2005.
- MENDEL, J. M. **Fuzzy Logic Systems for Engineerings: A Tutorial**. IEEE. 1995.
- MENDEL, J. M. **Uncertain Rule-based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions**. Londres: Prentice-Hall P. T. R. 2001, 555 p.
- MENDEL, J. M. **Fuzzy Sets for Words: a New Beginning**. The IEEE International Conference on Fuzzy Systems. P. 37-42, 2003a.
- MENDEL, J. M. **Type-2 Fuzzy Sets: Some Questions and Answers**. IEEE Neural Networks Society. P. 10-13, Aug. 2003b.
- MENDEL, J. M. **Computing Derivatives in Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on. Vol. 12, Issue 1, p. 84-98, Feb. 2004.
- MENDEL, J. M.; JOHN, R. I. **A Fundamental Decomposition of Type-2 Fuzzy Sets**. IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. Vol. 4, p. 1896-190, Jul. 25-28, 2001.
- MENDEL, J. M.; JOHN, R. I. B. **Type-2 Fuzzy Sets Made Simple**. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 10, n° 2, Apr. 2002.
- MENDEL, J. M.; WU, H. **Centroid Uncertainty Bounds for Interval Type-2 Fuzzy Sets: Forward and Inverse Problems**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. p. 947-952, Jul. 25-29, 2004.
- MENDEZ, G. M.; LOPEZ-JUAREZ, I.; LEDUC, L. A.; SOTO, R.; CAVAZOS, A. **Temperature Prediction in Hot Strip Mill Bars Using a Hybrid Type-2 Fuzzy Algorithm**. International Journal of Simulation, Systems, Science & Technology. Special issue on: Intelligent Systems. 2005.
- MEYER, D. R.; ISAMINGER, M. A.; PROSEUS, E. A. **Study of Network Expansion LLWAS (LLWAS-NE) Fault Identification and System Warning Optimization Through Joint Use of LLWAS-NE and Tdwr Data**. American Meteorological Society 79th Annual Conference. Dallas, TX. Jan. 10-15, 1999.
- MIZUMOTO, M.; TANAKA, K. **Some Properties of Fuzzy Sets of Type-2**. Information and Control. Vol. 31, p. 312-340, 1976.
- MIZUMOTO, M.; TANAKA, K. **Fuzzy Sets of Type-2 Under Algebraic Product and Algebraic Sum**. Fuzzy Sets and Systems. Vol. 5, p. 277-290, 1981.
- NIEMINEM, J. **On the Algebraic Structure of Fuzzy Sets of Type-2**. Kybernetika. Vol. 13, n° 4, 1977.
- NIEMIADOMSKI, A. **On Two Possible Roles of Type-2 Fuzzy Sets in Linguistic Summaries**. In: Advances in Web Intelligence, p. 341-347, 2005.

- OACI – Organização de Aviação Civil Internacional. **About ICAO**. International Civil Aviation Organization. Disponível em: <www.icao.int/en/m_about.html#>. Acesso em: 09 abr. 2008.
- OWN, C-M.; YU, P-T.; TSAI, H-H.; LEE, Y-J. **Adaptive Type-2 Fuzzy Median Filters for Removal of Impulsive Noises [Image Denoising]**. Nonlinear Signal and Image Processing. NSIP 2005. Abstracts. IEEE-Eurasip, p. 24, May 18-20, 2005.
- OZEN, T.; GARIBALDI, J. M. **Investigating Adaptation in Type-2 Fuzzy Logic Systems Applied to Umbilical Acid-Base Assessment**. School of Computer Science and IT University of Nottingham. United Kingdom, 2003.
- PAREEK, U.; KAR, I. N. **Estimating Compressor Discharge Pressure of Gas Turbine Power Plant Using Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Fuzzy Systems, 2006 IEEE International Conference on. P. 649-654, Jul. 16-21, 2006.
- PERRY, T. S. **In Search of the Future of Air Traffic Control**. Spectrum, IEEE. Vol. 34, Issue 8, p. 18-35, Aug. 1997.
- PHOKHARATKUL, P.; PHAIBOON, S. **Mobile Propagation Path Loss Models for Suburban Areas Using Type-2 Fuzzy Logic Approximation**. Microwave and Millimeter Wave Technology, 2004. ICMMT 4th International Conference on, Proceedings. P. 158-162, Aug. 18-21, 2004a.
- PHOKHARATKUL, P.; PHAIBOON, S. **Mobile Robot Control Using Type-2 Fuzzy Logic System**. Robotics, Automation and Mechatronics, 2004 IEEE Conference on. Vol. 1, p. 296-299 Dec. 1-3, 2004b.
- PICCINELLI, G.; MONT, M. C. **Fuzzy-Set Based Information - Retrieval for Advanced Help Desk**. Internet Business Management Department HP Laboratories Bristol. 1998.
- PROFILLIDIS, V. A. **Econometric and Fuzzy Models for the Forecast of Demand in the Airport of Rhodes**. Journal of Air Transport Management. Vol. 6, n° 2, p. 95-100, Apr. 2000.
- QIU, Y. **Statistical Genetic Interval-valued Type-2 Fuzzy System and its Application**. College of Arts and Sciences. Master Thesis, Georgia State University, 2006.
- REHÁK, M.; PĚCHOUČEK, M.; BENDA, P. **Fuzzy Number Approach to Trust in Coalition Environment**. Center for Applied Cybernetics Czech Technical University Technick 2, Prague, Czech R., 2005.
- RHEE, F. C. H.; HWANG, C. **A Type-2 Fuzzy C-means Clustering Algorithm**. IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference. Joint 9th. Vol. 4, p. 1926-1929, Jul. 25-28, 2001.
- RHEE, F. C-H.; HWANG, C. **An Interval Type-2 Fuzzy Perceptron**. Fuzzy Systems. FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 1331-1335, May 12-17, 2002.

- ROBINSON III, J. E.; DAVIS, T. J.; ISAACSON, D. R. **Fuzzy Reasoning-Based Sequencing of Arrival Aircraft in The Terminal Area**. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. New Orleans – LA, Aug. 1997.
- RONG, J. **Intelligent Executive Guidance Agent for Free Flight**. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, Jan. 2002.
- SAIPHER ATC (2007). **Saipher Tower Management System**. Disponível em: <<http://www.saipher.com.br/stms.asp>>. Acesso em: 09 mar. 2007.
- SANDRI, S.; CORREA, C. V **Escola de Redes Neurais**. Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais. ITA, São José dos Campos – SP, p. c073-c090, 19 jul. 1999.
- SEIHWAN P.; LEE-KWANG, H. **A Designing Method for Type-2 Fuzzy Logic Systems Using Genetic Algorithms**. IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. Korea, vol. 5, p. 2567-2572, Jul. 25-28, 2001.
- SENSIS CORPORATION **Airport Surface Detection Equipment Model X (ASDE-X)**. Disponível em: <<http://www.sensis.com/docs/128/>>. Acesso em: 09 mar. 2007.
- SEPÚLVEDA, R.; CASTILLO, O.; MELIN, P.; RODRIGUEZ-DIAZ, A.; MONTIEL, O. **Handling Uncertainty in Controllers Using Type-2 Fuzzy Logic**. Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on. P. 248-253, May 22-25, 2005.
- SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1999.
- SHU, H.; LIANG, Q. (2005). **Wireless Sensor Network Lifetime Analysis Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on. P. 19-24, May 22-25, 2005.
- SIEWERDT, E. **Ferramentas de Apoio à Tomada de Decisão** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <lima.bct@gmail.com> em 23 nov. 2005.
- SILVA, A. N. **Gerenciamento Pró-Ativo de Redes de Computadores baseado em Agentes Móveis e Lógica Fuzzy**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2001.
- SINGH, M.; SRIVASTAVA, S.; GUPTA, J.R.P.; HANMANDLU, M. **A Type-2 Fuzzy Neural Model Based Control of a Nonlinear System**. Cybernetics and Intelligent Systems, 2004 IEEE Conference on. Vol. 2, p. 1352-1356, Dec. 1-3, 2004.
- TAHAYORI, H.; TETTAMANZI, A.G.B.; ANTONI, G.D. **Approximated Type-2 Fuzzy Set Operations**. Fuzzy Systems, IEEE International Conference on. P. 1910-1917, Jul. 16-21, 2006.
- TAN, D. W. W. W. **A Simplified Type-2 Fuzzy Logic Controller for Real-time Control**. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, 2006.

- TAN, W. W.; LAI, J. **Development of a Type-2 Fuzzy Proportional Controller**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 3, p. 1305-1310, Jul. 25-29, 2004.
- TANG, M.; ZHANG, Y.-Q.; ZHANG, G. **Type-2 Fuzzy Web Shopping Agents**. Web Intelligence, 2004. Proceedings. IEEE/WIC/ACM International Conference on. P. 499-503, Sep. 20-24, 2004.
- THEIL, K. **Report Of Committee A To The Conference, Eleventh Air Navigation Conference**. Montreal, 2003. Disponível em: <http://www.icao.int/icao/en/anb/meetings/anconf11/documentation/anconf11_wp190_en.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2006.
- THE MATHWORKS INC. **Fuzzy Logic Toolbox for use in Matlab User's Guide**. 2. versão, 1999. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/fuzzy/fp351dup8.html>>. Acesso em: 02 jan. 2006.
- TYPE2FUZZYLOGIC.ORG **Introduction, News, Events, Publications Database Statistics**. Type-2 Fuzzy Logic.org. Disponível em: <www.type2fuzzylogic.org>. Acesso em: 03 abr. 2008.
- UNCU, O.; TURKSEN, I. B. **A New Two-step Fuzzy Inference Approach Based on Takagi-Sugeno Inference Using Discrete Type-2 Fuzzy Sets**. Fuzzy Information Processing. NAFIPS 2003. 22nd International Conference of the North American Society. P. 32-37, Jul. 24-26, 2003.
- UNCU, O.; KILIC, K.; TURKSEN, I. B. **A New Fuzzy Inference Approach Based on Mamdani Inference Using Discrete Type-2 Fuzzy Sets**. Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on Systems. Vol. 3, p. 2272-2277, Oct. 10-13, 2004.
- WAN, T. W.; KAMAL, D. H. **On-line Learning Rules for Type-2 Fuzzy Controller**. Fuzzy Systems, 2006 IEEE International Conference on. P. 513-520, Jul. 16-21, 2006.
- WANG, C.; CHENG, C.; LEE T. **Dynamical Optimal Training for Interval Type-2 Fuzzy Neural Network (T2FNN)**. IEEE Trans. Systems, Man, Cybern. B, Cybern. Vol. 34, n. 3, p. 1462-1477, Jun. 2004.
- WU, H.; MENDEL, J. M. **Uncertainty Bounds and their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems**. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on. Vol. 10, Issue 5, p. 622-639, Oct. 2002.
- WU, H.; MENDEL, J. M. **Multi-category Classification of Ground Vehicles using Fuzzy Logic Rule-based Classifiers: Early Results**. Proceeding (385) Artificial Intelligence and Soft Computing. USA, 2003.
- WU, D.; TAN, W. W. **A Type-2 Fuzzy Logic Controller for the Liquid-level Process**. Fuzzy Systems. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2, p. 953-958, Jul. 25-29, 2004a.

- WU, D.; TAN, W. W. **A Simplified Architecture for Type-2 FLSs and its Application to Nonlinear Control**. Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. IEEE. Vol. 1, p. 485-490, Dec. 1-3, 2004b.
- WU, D.; TAN, W. W. **Computationally Efficient Type-Reduction Strategies for a Type-2 Fuzzy Logic Controller**. Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on. P. 353-358, May 22-25, 2005.
- ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets**. Information and Control. Vol. 8, p. 338-353, 1965.
- ZADEH, L. A. **The Concept of A Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning – 1**. Information Sciences. Vol. 8, p. 199-249, 1975.
- ZENG, J.; LIU, Z.-Q. **Type-2 Fuzzy Hidden Markov Models to Phoneme Recognition**. 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04). Vol. 1, p. 192-195, 2004.
- ZENG J.; LIU, Z.-Q. **Type-2 Fuzzy Markov Random Fields to Handwritten Character Recognition**. Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on. Vol. 1, p. 1162-65, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Formulário Q1

Pesquisa direcionada a Controladores de Tráfego Aéreo

Nome: _____
Contato: _____
Órgão: _____
Tempo de experiência: _____

Questões referentes à situação: Uma aeronave próxima ao ponto de espera e uma na aproximação final para pouso.

1 – Quais os critérios usados na avaliação para uma possível autorização de alinhamento e decolagem da aeronave que está próxima ao ponto de espera?

2 – Já se sentiu incomodado em não saber, de imediato, se autorizaria ou não a aeronave a alinhar e decolar antes da outra pousar?

Sim Não

3 – Com que frequência diária acontece essa situação (referente à questão anterior)?

- raramente
 1 vez, em média
 de 2 a 5, em média
 de 6 a 9, em média
 mais de 10 vezes, em média

4 – Dada a situação desta seção e aeronave autorizada a alinhar e decolar, já ordenou arremetida e/ou abortagem da decolagem da(s) aeronave(s) devido à avaliação mal-sucedida?

Sim Não

APÊNDICE 1 - Continuação

Questões Gerais:

5 – Quanto às funções das TWR's (item 10.1.1 da IMA 100-12), qual a seqüência de prioridade que segue?

- segurança
- ordenação
- rapidez

6 – Em sua opinião, qual é o valor de velocidade considerada normal para uma aeronave chegando no ponto de espera?

7 – É uma velocidade alta?

8 – A que distância uma aeronave que está por decolar deve estar para considerá-la perto do ponto de espera? (para autorizar uma decolagem)

9 – É longe? (para autorizar uma decolagem)

10 – Qual o seu nível de confiança em sistemas automatizados de controle de tráfego aéreo em geral?

- confio totalmente e me sinto seguro (não há necessidade de averiguações)
- confio totalmente mas sempre monitoro (quando for possível)
- confio em parte, por isso sempre monitoro (quando for possível)
- não confio e sempre fico atendo a possíveis falhas do sistema
- _____

APÊNDICE 2

Formulário Q2

Pesquisa direcionada a pilotos

Nome: _____

Contato: _____

Homologado(a) em voar aeronaves do tipo: _____

Tempo de vôo (por tipo de aeronave): _____

Na decolagem:

1 – Em média, qual a velocidade em relação ao solo empregada próximo ao ponto de espera?

2 – Essa velocidade próxima ao ponto de espera depende de algum fator meteorológico como vento, pressão, temperatura do ar, temperatura do ar na pista, etc?

3 – Qual a velocidade máxima em relação ao solo que já empregou no táxi próximo ao ponto de espera?

4 – Quando a TWR autoriza alinhar e decolar de uma pista e sua aeronave estiver empregando certa velocidade no táxi, qual o seu procedimento, normalmente, quanto à velocidade em relação ao solo de sua aeronave ao alinhar e iniciar decolagem?

- mantém a velocidade de táxi
- diminui a velocidade à medida que se aproxima da cabeceira da pista
- aumenta a velocidade à medida que se aproxima da cabeceira da pista
- pára a aeronave na cabeceira da pista e posteriormente decola
- outro _____

5 – Com que frequência se sente incomodado por não receber autorização da TWR para decolar e, pela sua experiência, saber que seria segura a sua decolagem antes do pouso de outra aeronave?

- Nunca
- Uma ou duas vezes por mês
- Uma ou duas vezes por ano
- Outra _____

APÊNDICE 2 – Continuação

6 – Qual foi o maior tempo que permaneceu parado no ponto de espera aguardando uma seqüência de aeronaves pousar?

7 – Sabe precisar qual a quantidade de combustível que sua aeronave gasta para cada minuto no ponto de espera? (Em caso afirmativo, especificar o valor)

8 – Já teve problemas com passageiros no ponto de espera devido à demora em decolar?

Sim Não

No pouso:

9 – A partir de quantas milhas da cabeceira o(a) Sr.(a) considera seguro que outra aeronave decole antes do seu pouso?

10 – Quais os fatores meteorológicos que afetam significativamente a aproximação final de sua aeronave? (colocar em ordem de relevância)

Geral:

11 – Qual a influência do vento forte quanto ao pouso e a decolagem (o tempo de pouso/decolagem aumenta ou diminui)?

12 – A partir de qual velocidade o(a) Sr.^(a) considera vento forte (que passa a interferir nos tempos de pouso/decolagem)?

13 – Na sua opinião, existe muita diferença nos critérios de autorização de TWR's nos vários aeródromos brasileiros, quanto à iniciativa de autorizar uma aeronave a alinhar e decolar antes que outra pouse?

14 – Qual o seu nível de confiança em sistemas automatizados em pilotagem e controle de tráfego aéreo em geral?

confio totalmente e me sinto seguro (não há necessidade de averiguações)

confio totalmente mas sempre monitoro (quando for possível)

confio em parte, por isso sempre monitoro (quando for possível)

não confio e sempre fico atendo a possíveis falhas do sistema

APÊNDICE 3



Universidade Federal da Bahia
PPGM – Programa de Pós-Graduação Em Mecatrônica



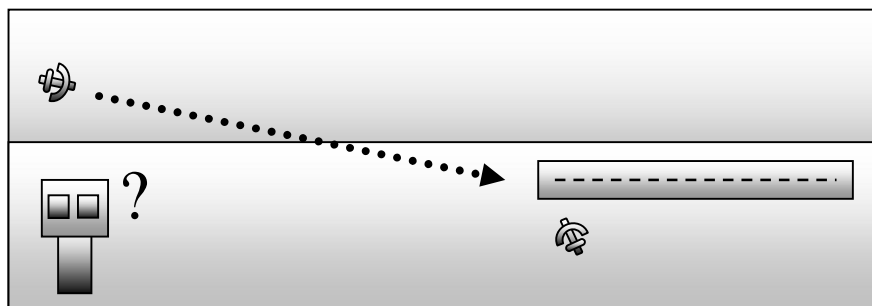
Formulário Q3

Formulário para coleta de informações dos controladores de tráfego aéreo especialistas do Aeroporto Internacional de Salvador

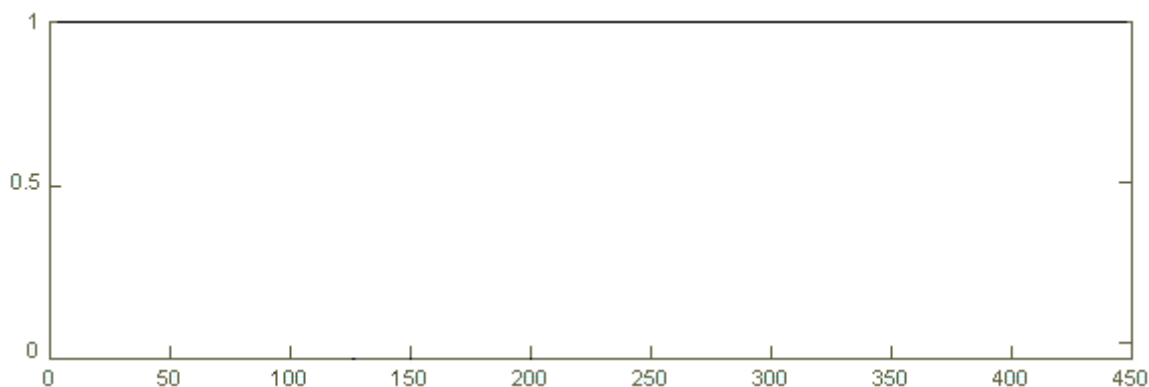
Controlador: _____ Data: ___/___/___

Definição da forma e dos limites dos conjuntos fuzzy tipo 2 para o projeto de mestrado “A Lógica Fuzzy tipo 2 e um estudo de caso aplicado no Controle de Tráfego Aéreo”.
Pesquisador Márcio P. Lima e orientadores prof. Dr. Cristiano Fontes e prof. Dr. Leizer.

Cenário do processo de tomada de decisão:

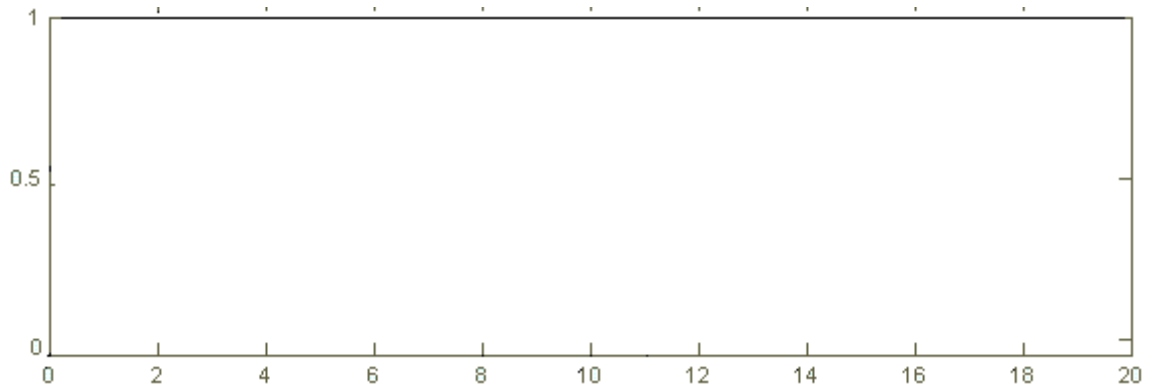


Variável lingüística **distância-dec**: no-ponto, perto e longe, medida em metros.

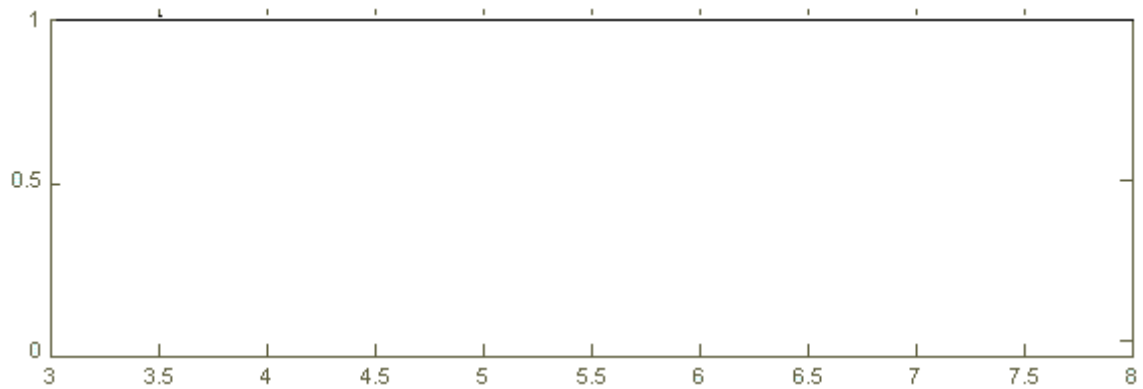


APÊNDICE 3 (Continuação)

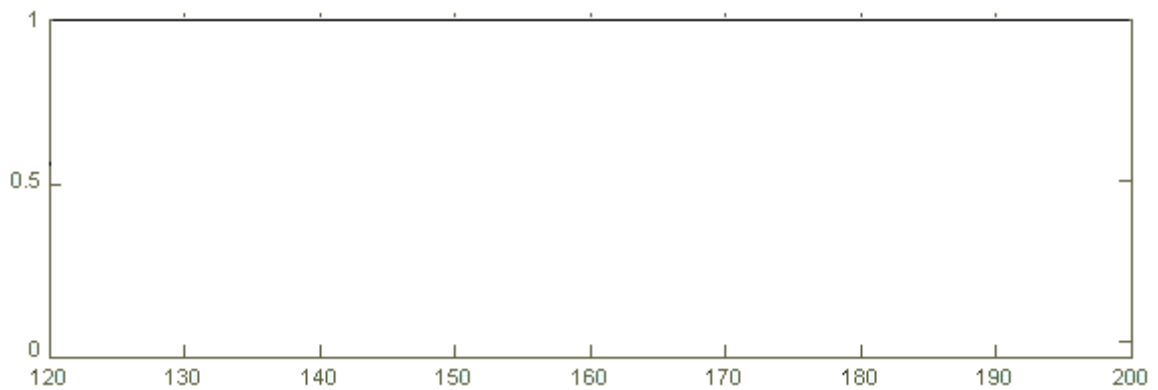
Variável lingüística **velocidade-dec**: zero, baixa, normal e alta, medida em nós.



Variável lingüística **distância-aprox**: perto e longe, medida em milhas náuticas.



Variável lingüística **velocidade-aprox**: normal e alta, medida em nós.



APÊNDICE 4

Formulário Q4

Tabela de Decisão

N°	Condição (Antecedentes)				Autorização (Consequente)
	Velocidade-dec	Distancia-dec	Velocidade-aprox	Distancia-aprox	
1	Zero	No-ponto	Normal	Perto	
2	Zero	No-ponto	Normal	Longe	
3	Zero	No-ponto	Alta	Perto	
4	Zero	No-ponto	Alta	Longe	
5	Zero	Perto	Normal	Perto	
6	Zero	Perto	Normal	Longe	
7	Zero	Perto	Alta	Perto	
8	Zero	Perto	Alta	Longe	
9	Zero	Longe	Normal	Perto	
10	Zero	Longe	Normal	Longe	
11	Zero	Longe	Alta	Perto	
12	Zero	Longe	Alta	Longe	
13	Baixa	No-ponto	Normal	Perto	
14	Baixa	No-ponto	Normal	Longe	
15	Baixa	No-ponto	Alta	Perto	
16	Baixa	No-ponto	Alta	Longe	
17	Baixa	Perto	Normal	Perto	
18	Baixa	Perto	Normal	Longe	
19	Baixa	Perto	Alta	Perto	
20	Baixa	Perto	Alta	Longe	
21	Baixa	Longe	Normal	Perto	
22	Baixa	Longe	Normal	Longe	
23	Baixa	Longe	Alta	Perto	
24	Baixa	Longe	Alta	Longe	
25	Normal	No-ponto	Normal	Perto	
26	Normal	No-ponto	Normal	Longe	
27	Normal	No-ponto	Alta	Perto	
28	Normal	No-ponto	Alta	Longe	
29	Normal	Perto	Normal	Perto	
30	Normal	Perto	Normal	Longe	
31	Normal	Perto	Alta	Perto	
32	Normal	Perto	Alta	Longe	
33	Normal	Longe	Normal	Perto	
34	Normal	Longe	Normal	Longe	
35	Normal	Longe	Alta	Perto	
36	Normal	Longe	Alta	Longe	

	Condição (Antecedentes)				
37	Alta	No-ponto	Normal	Perto	
38	Alta	No-ponto	Normal	Longe	
39	Alta	No-ponto	Alta	Perto	
40	Alta	No-ponto	Alta	Longe	
41	Alta	Perto	Normal	Perto	
42	Alta	Perto	Normal	Longe	
43	Alta	Perto	Alta	Perto	
44	Alta	Perto	Alta	Longe	
45	Alta	Longe	Normal	Perto	
46	Alta	Longe	Normal	Longe	
47	Alta	Longe	Alta	Perto	
48	Alta	Longe	Alta	Longe	

APÊNDICE 5

Tabela de regras fuzzy

Os antecedentes (*distancia-dec*, *velocidade-dec*, *distancia-aprox*, *velocidade-aprox*) são conjuntos fuzzy tipo 2 intervalares e o consequente (*autorizacao*) é representado por conjuntos fuzzy tipo 0, ou seja, constantes:

nao-decola 1
decola-imediato 4
decola 5

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*)
5. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
6. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *decola-imediato*)
7. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
8. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
9. If (*distancia-dec* is longe) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
10. If (*distancia-dec* is longe) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
11. If (*distancia-dec* is longe) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
12. If (*distancia-dec* is longe) and (*velocidade-dec* is zero) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
13. If (*distancia-dec* is no-ponto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *decola-imediato*)
14. If (*distancia-dec* is no-ponto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *decola*)
15. If (*distancia-dec* is no-ponto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
16. If (*distancia-dec* is no-ponto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *decola*)
17. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
18. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *decola*)
19. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *nao-decola*)
20. If (*distancia-dec* is perto) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is longe) and (*velocidade-aprox* is alta) then (*autorizacao* is *decola-imediato*)
21. If (*distancia-dec* is longe) and (*velocidade-dec* is baixa) and (*distancia-aprox* is perto) and (*velocidade-aprox* is normal) then (*autorizacao* is *nao-decola*)

APÊNDICE 7

Tabela 10. Dados utilizados para a validação do modelo.

distancia- dec (m)	velocidade- dec (KT)	distancia- aprox (NM)	velocidade- aprox (KT)	autorizacao
150,0	10,0	7,5	150,0	5
130,0	6,0	4,0	140,0	1
0,0	0,0	7,0	185,0	5
400,0	6,0	7,0	155,0	4
0,0	0,0	8,0	175,0	5
120,0	12,0	7,5	152,0	5
300,0	9,0	5,0	157,0	4
0,0	0,0	6,0	180,0	5
140,0	4,0	6,0	155,0	4
0,0	8,0	8,0	200,0	5
0,0	4,0	7,5	178,0	5
420,0	18,0	8,0	174,0	4
50,0	5,0	6,0	150,0	4
0,0	15,0	5,0	142,0	5
250,0	14,0	3,5	153,0	1
250,0	10,0	5,5	158,0	4
400,0	12,0	4,0	126,0	1
200,0	7,0	3,5	135,0	1
400,0	0,0	4,5	129,0	1
0,0	0,0	5,1	195,0	4
430,0	8,0	4,0	140,0	1
50,0	10,0	6,0	144,0	4
130,0	10,0	8,0	200,0	4
450,0	10,0	5,0	188,0	1
400,0	8,0	4,5	148,0	1
0,0	5,0	6,0	120,0	5
170,0	0,0	3,5	150,0	1
420,0	10,0	4,0	140,0	1
0,0	0,0	7,0	180,0	5
200,0	8,0	4,5	140,0	4
0,0	0,0	7,5	155,0	5
220,0	8,0	6,0	180,0	4
250,0	1,0	8,0	171,0	1
120,0	10,0	6,0	127,0	5
445,0	5,0	6,0	155,0	1
0,0	10,0	7,5	200,0	5
400,0	10,0	3,5	122,0	1
0,0	10,0	7,5	180,0	5
125,0	4,0	7,0	200,0	4
0,0	0,0	5,5	130,0	5
430,0	10,0	6,0	155,0	4
300,0	4,0	5,0	155,0	1
130,0	10,0	8,0	155,0	5
300,0	0,0	3,5	155,0	1
200,0	12,0	6,9	160,0	4
250,0	16,0	6,5	165,0	4
50,0	5,0	5,5	155,0	4

100,0	0,0	6,0	175,0	1
430,0	12,0	8,0	155,0	4
0,0	0,0	5,0	155,0	4
400,0	10,0	5,1	155,0	4
50,0	0,0	3,5	155,0	1
150,0	5,0	3,8	155,0	1
210,0	4,0	5,0	155,0	1
0,0	0,0	5,0	155,0	4
350,0	12,0	4,6	141,0	1
390,0	4,0	5,1	132,0	1
100,0	0,0	7,0	142,0	4
100,0	12,0	7,8	152,0	5
120,0	0,0	4,0	170,0	1
130,0	0,0	3,5	140,0	1
125,0	6,0	7,5	180,0	4
130,0	0,0	3,0	138,0	1
200,0	13,0	5,6	140,0	4
110,0	1,0	5,0	164,0	1
200,0	10,0	8,0	200,0	4
20,0	10,0	8,0	172,0	5
45,0	8,0	8,0	164,0	5
400,0	10,0	8,0	170,0	4
125,0	10,0	4,0	131,0	4
183,0	6,0	4,5	140,0	1
390,0	7,0	7,0	155,0	4
122,0	12,0	7,4	150,0	5
0,0	9,0	7,8	190,0	5
415,0	16,0	8,0	160,0	4
410,0	12,0	4,1	126,0	1
208,0	7,0	3,6	135,0	1
380,0	0,0	4,8	130,0	1
425,0	8,0	4,0	144,0	1
0,0	8,0	6,0	122,0	5
165,0	2,0	3,5	150,0	1
420,0	8,0	4,0	140,0	1
8,0	0,0	7,0	180,0	5
50,0	2,0	7,5	155,0	5
200,0	8,0	6,2	180,0	4
250,0	2,0	8,0	180,0	1
118,0	11,0	6,0	127,0	5
10,0	12,0	7,4	200,0	5
380,0	8,0	3,5	130,0	1
100,0	14,0	7,5	180,0	5
120,0	5,0	7,0	200,0	4
0,0	2,0	5,5	130,0	5
425,0	10,0	6,0	150,0	4
340,0	4,0	5,0	160,0	1
300,0	2,0	3,5	155,0	1
410,0	10,0	5,0	155,0	4
100,0	3,0	5,7	150,0	4
120,0	2,0	4,0	180,0	1
130,0	3,0	3,5	150,0	1
30,0	12,0	7,8	170,0	5

ANEXOS

ANEXO 1

Tabela 11. Propriedades dos conjuntos fuzzy sobre os operadores das t-normas.

Propriedade dos conjuntos		Mínimo		Produto	
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
Reflexiva	$\mu_{\bar{A}}(x) \leq \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	sim
Anti-simétrica	$\mu_{\bar{A}}(x) \leq \mu_{\bar{N}}(x), \mu_{\bar{N}}(x) \leq \mu_{\bar{A}}(x)$ $\Rightarrow \mu_{\bar{A}}(x) = \mu_{\bar{N}}(x)$	sim	sim	sim	sim
Transitiva	$\mu_{\bar{A}}(x) \leq \mu_{\bar{N}}(x), \mu_{\bar{N}}(x) \leq \mu_{\bar{O}}(x)$ $\Rightarrow \mu_{\bar{A}}(x) \leq \mu_{\bar{O}}(x)$	sim	sim	sim	sim
Idempotência	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{A}}(x) = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	não
	$\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{A}}(x) = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	não	não
Comutativa	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{N}}(x) = \mu_{\bar{N}}(x) \vee \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	sim
	$\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{N}}(x) = \mu_{\bar{N}}(x) * \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	sim
Associativa	$(\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{N}}(x)) \vee \mu_{\bar{O}}(x)$ $= \mu_{\bar{A}}(x) \vee (\mu_{\bar{N}}(x) \vee \mu_{\bar{O}}(x))$	sim	sim	sim	sim
	$(\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{N}}(x)) * \mu_{\bar{O}}(x)$ $= \mu_{\bar{A}}(x) * (\mu_{\bar{N}}(x) * \mu_{\bar{O}}(x))$	sim	sim	sim	sim
Absorção	$\mu_{\bar{A}}(x) * (\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{N}}(x)) = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	não	não
	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee (\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{N}}(x)) = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	não
Distributiva	$\mu_{\bar{A}}(x) * (\mu_{\bar{N}}(x) \vee \mu_{\bar{O}}(x)) =$ $(\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{N}}(x)) \vee (\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{O}}(x))$	sim	sim	sim	não
	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee (\mu_{\bar{N}}(x) * \mu_{\bar{O}}(x)) =$ $(\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{N}}(x)) * (\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{O}}(x))$	sim	sim	não	não
Involução	$\mu_{\bar{\bar{A}}}(x) = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	sim
Leis de De Morgan	$\overline{\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{N}}(x)} = \overline{\mu_{\bar{A}}(x)} * \overline{\mu_{\bar{N}}(x)}$	sim	sim	não	não
	$\overline{\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{N}}(x)} = \overline{\mu_{\bar{A}}(x)} \vee \overline{\mu_{\bar{N}}(x)}$	sim	sim	não	não
Identidade	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee 0 = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	sim
	$\mu_{\bar{A}}(x) * 1 = \mu_{\bar{A}}(x)$	sim	sim	sim	sim
	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee 1 = 1$	sim	sim	sim	sim
	$\mu_{\bar{A}}(x) * 0 = 0$	sim	sim	sim	sim
Operação com o complemento	$\mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{\bar{A}}}(x) \neq 1$	sim	sim	sim	sim
	$\mu_{\bar{A}}(x) * \mu_{\bar{\bar{A}}}(x) \neq 0$	sim	sim	sim	sim

Fonte: Karnik e Mendel (2000, p.336).

ANEXO 2

Fotos



Foto 1. Archie William League e sua “Torre de Controle” (Fonte: ASSOCIAÇÃO DOS CONTROLADORES DE TRÁFEGO AÉREO DE GUARULHOS, 2006).



Foto 2. Visão aérea do Aeroporto Internacional de Salvador Deputado Luís Eduardo Magalhães.

ANEXO 2 – Continuação

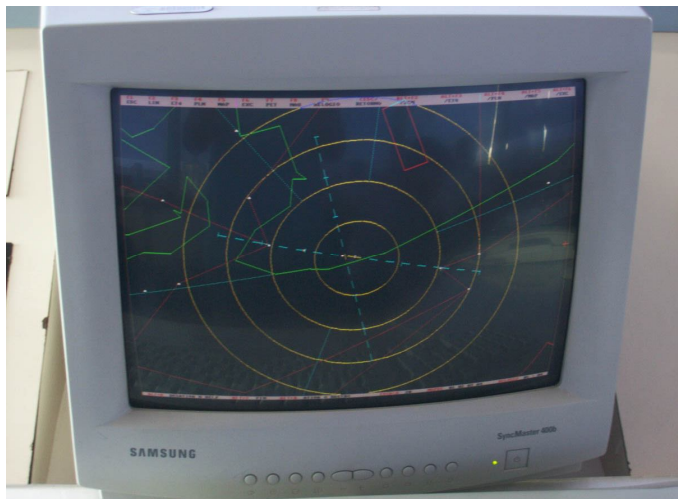


Foto 3. TARIS – Equipamento utilizado em algumas torres de controle para acompanhar o movimento das aeronaves próximas ao aeródromo.

ANEXO 3

Movimento em aeródromos brasileiros**Tabela 12. Movimento dos aeródromos mais movimentados do país referente ao triênio 2005 – 2007.**

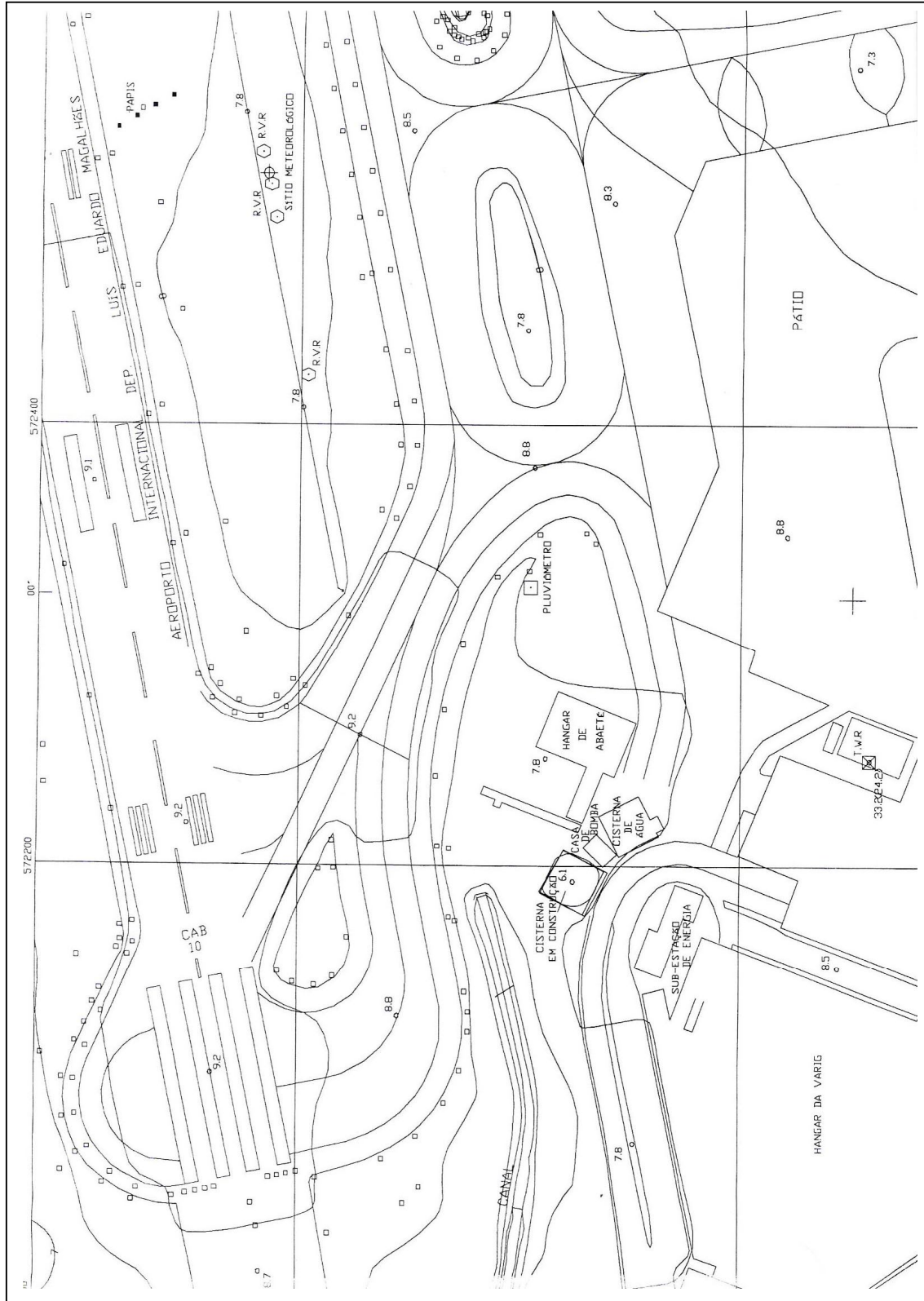
Aeródromo	2005	2006	2007
Congonhas – SP	228.110	230.995	205.564
Guarulhos – SP	154.339	154.948	187.960
Brasília – DF	130.885	126.427	126.853
Galeão – RJ	97.332	100.895	119.892
Campo de Marte – SP	83.447	85.158	93.452
Salvador – BA	78.271	91.414	90.989

Fonte: Infraero (2008).

Obs.: Vôos militares não computados.

ANEXO 4

Parte do Mapa do Aeroporto Internacional de Salvador Deputado Luís Eduardo Magalhães, utilizado para modelagem de variáveis.



Fonte: Brasil (2000).