

# MODELO DE PREVISÃO METEOROLÓGICA BASEADO EM SISTEMAS DE INFERÊNCIA DIFUSA

Jorge Martinho Ribeiro



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2008



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Jorge Martinho Ribeiro, N° 1030345, [1030345@isep.ipp.pt](mailto:1030345@isep.ipp.pt)

Orientação científica: Profª. Isabel Jesus, [isj@isep.ipp.pt](mailto:isj@isep.ipp.pt)

Co-Orientador: Profª. Betina Neves, [bbn@isep.ipp.pt](mailto:bbn@isep.ipp.pt)



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

3 de Novembro de 2008



## *Agradecimentos*

Este trabalho não poderia ser desenvolvido sem o apoio de algumas pessoas, às quais deixo aqui os meus agradecimentos.

À Eng.<sup>a</sup>. Isabel Jesus, pela orientação e aconselhamento que me transmitiu ao longo do projecto. A sua ajuda e dedicação na elaboração da Tese foram essenciais para a conclusão do projecto com sucesso.

À Eng.<sup>a</sup>. Betina Neves, pelo aconselhamento que transmitiu e pelas informações técnicas que disponibilizou.

Queria igualmente agradecer a todos os que me apoiaram ao longo deste tempo, através da sua amizade e aconselhamento.

Um agradecimento especial à minha família que me apoiou e disponibilizou tudo o que era possível para que eu concluísse este projecto.



## *Resumo*

O conceito de lógica difusa está correlacionado com a recolha de informações vagas, que são em geral descritas numa linguagem falada por seres humanos, transformando este tipo de linguagem em formato numérico de fácil manipulação computacional.

A meteorologia é a ciência que estuda os fenómenos da atmosfera, fenómenos estes que, são bastante complexos, mas que mesmo assim podem ser descritos de forma linguística. Como exemplo desta linguagem temos: temperatura quente, temperatura fria, vento forte, vento fraco, chuva forte, chuva fraca, etc. Assim, quando se tem como objectivo fazer uma previsão e uma descrição destes fenómenos, faz todo o sentido aplicar sistemas que tenham por base os conceitos de lógica difusa. Nesta linha de pensamento, surgiu a ideia de criar um sistema de previsão meteorológica baseado em sistemas de inferência difusa.

Com o objectivo de levar a bom termo este trabalho, efectuou-se um estudo dos conceitos inerentes à lógica difusa e a sistemas de inferência difusa por vista a se determinar os diferentes parâmetros e variáveis a usar no desenvolvimento do sistema de previsão meteorológica.

Posteriormente, e porque o trabalho proposto deveria ser desenvolvido utilizando o *software* MATLAB, fez-se um estudo da livreria de inferência difusa desta plataforma. Assim, depois de se saber as funcionalidades do MATLAB em lógica difusa, fez-se o estudo dos fenómenos atmosféricos e das variáveis meteorológicas que seriam necessárias para uma previsão, assim como o modo como se relacionam os diferentes fenómenos visando a criação do controlador difuso capaz de os traduzir de uma forma computacional.

Depois de se definir quais as variáveis que iriam ser necessárias, usaram-se os dados fornecidos por uma estação meteorológica da Galiza. Para tal, foi desenvolvido um programa de aplicação para efectuar a aquisição automática dos dados necessários ao funcionamento do sistema difuso do MATLAB, que se encontram disponibilizados na Internet.

Em seguida, foi implementado o controlador difuso que foi sendo sintonizado ao longo do trabalho por forma a garantir bons resultados.

Através do *Guide* do MATLAB foi desenvolvido o ambiente gráfico do sistema e um interface amigável com o utilizador. Com este sistema de previsão é possível fazer a previsão a 3 dias para as temperaturas máxima e mínima e para a velocidade do vento, assim como, uma imagem que ilustra a previsão do estado do tempo.

Por fim, foi feita uma análise de resultados baseada na comparação das previsões efectuadas com os resultados reais provenientes da estação meteorológica, com a finalidade de se verificar a fiabilidade do sistema implementado.

### ***Palavras-Chave***

Lógica difusa, Controladores difusos, Meteorologia, Aquisição de dados, MATLAB.

## *Abstract*

The notions around Fuzzy Logic are related to the gathering of vague information, normally described using human speech and transforming that spoken information into a quantifiable value, a number, easily treated in computational processes.

The science of meteorology studies the phenomena in earth's atmosphere. These phenomena, although quite complex may be described in a qualitative linguistic fashion.

If one considers the words that usually tend to follow the description of the expected weather, one realises they present a touch of vagueness: hot or cold temperature, strong or mild winds, light or heavy showers, etc. This emphasises the fact that a system developed to produce accurate weather forecast can naturally be achieved with the help of fuzzy logic. This was the idea that supported this entire work.

With the purpose of developing a weather forecast system based on fuzzy logic, a prior study of the main issues regarding fuzzy logic was made. As a consequence, variables and the determination of several parameters were determined for a proper development of the fuzzy weather forecast system.

Afterwards, and since the work was to be developed in MATLAB, the fuzzy logic toolbox was thoroughly studied. Once assimilated, it was time to start analysing weather phenomena and establishing the adequate variables needed for a forecast, as well as the way in which all these variables and phenomena relate between each other, in order to produce a fuzzy system that faithfully translates the information into a working computational model.

No model can be established a tuned without data. Therefore, all the data needed to do this work was obtained through a weather station settled in nearby Spain, in Galiza.

To acquire and treat the considerable amount of data needed, a small software was developed that allows an automatic data retrieving and direct use of, in the MATLAB environment.

The next step in the work was the development of the fuzzy control system. This Fuzzy system was later on continuously tuned until it presented good results.

Other MATLAB functionalities allowed for a pleasant interface for the users.

The final weather forecast fuzzy inference system gives the user a 3 day forecast for min and max temperature, wind speed and all predictions come with illustrative pictures that summarize the presented forecast.

Finally, a comparison between real (Galiza) and forecasted data was implemented and allowed for a confirmation of the system's reliability.

***Key words***

Fuzzy Logic, Fuzzy control systems, Meteorology, Weather forecast, Data acquisition, Matlab.

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. CALENDARIZAÇÃO .....	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	3
<b>2. CONTROLO LÓGICO DIFUSO: ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONTROLO DIFUSO .....	5
2.2. LÓGICA DIFUSA.....	7
2.2.1. <i>O que é a logica difusa?</i> .....	7
2.2.2. <i>Variáveis linguísticas</i> .....	8
2.2.3. <i>Inferência difusa</i> .....	10
2.2.3.1. <i>Multiplicação Vector - Matriz Difusos</i> .....	10
2.2.3.2. <i>Inferência Max – Min</i> .....	12
2.3. CONJUNTOS DIFUSOS .....	15
2.3.1. <i>Definição de variáveis</i> .....	15
2.3.1.1. <i>Variáveis difusas</i> .....	15
2.3.1.2. <i>Operações com conjuntos difusos</i> .....	16
2.3.2. <i>Criar conjuntos difusos</i> .....	18
2.3.3. <i>Efeitos do uso de advérbios com variáveis linguísticas</i> .....	18
2.4. SISTEMAS DIFUSOS .....	20
2.5. CONTROLADORES LÓGICO DIFUSOS .....	20
2.5.1. <i>Tipos de controladores logico difusos</i> .....	22
2.5.2. <i>Estrutura de um controlador difuso</i> .....	24
2.5.3. <i>Regras difusas</i> .....	26
2.5.4. <i>Métodos de colapsagem existentes</i> .....	27
2.5.4.1. <i>Colapsagem pelo centro de massa</i> .....	28
2.5.4.2. <i>Colapsagem pelo centro dos centros das áreas</i> .....	28

2.5.4.3.	<i>Colapso pela média dos máximos</i> .....	29
2.5.4.4.	<i>Propriedades de um método de colapsagem</i> .....	30
<b>3.</b>	<b>METEOROLOGIA</b> .....	<b>31</b>
3.1.	O QUE É A METEOROLOGIA — BREVE INTRODUÇÃO.....	31
3.2.	EVOLUÇÃO DA METEOROLOGIA ATÉ AOS DIAS DE HOJE.....	32
3.3.	SISTEMAS DE PREVISÃO METEOROLÓGICA.....	35
3.4.	ELEMENTOS METEOROLOGICOS FUNDAMENTAIS CONSIDERADOS NAS PREVISÕES.....	37
<b>4.</b>	<b>SISTEMA DE PREVISÃO METEOROLÓGICA</b> .....	<b>41</b>
4.1	SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA ( <i>FIS</i> ) DO MATLAB .....	41
4.2	DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTENÇA EXISTENTES NO <i>FIS</i> .....	45
4.3	SISTEMAS DE INFERÊNCIA DIFUSA DESENVOLVIDOS .....	55
4.3.1	SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA “ <i>TEMPO</i> ” .....	55
4.3.2	SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA “ <i>TEMPO2</i> ” .....	64
4.4	INTERFACE GRÁFICA CRIADA E INTERLIGAÇÃO DOS SISTEMAS <i>FIS</i> DESENVOLVIDOS .....	68
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>79</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>97</b>
6.1	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	98
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>101</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 Variável linguística que representa a “ <i>temperatura ambiente</i> ” [LOPES, 2005].	9
Figura 2 Diagrama de inferência difusa [MATLAB, 2006].	13
Figura 3 Diagrama de inferência difusa [MATLAB, 2006].	14
Figura 4 Representação gráfica de operação de complemento de um conjunto.	17
Figura 5 Representação gráfica de uma operação de união de dois conjuntos.	17
Figura 6 Representação gráfica de operação de intersecção de dois conjuntos.	18
Figura 7 Esquema representativo de um sistema difuso.	21
Figura 8 Esquema representativo de um controlador difuso.	24
Figura 9 Estrutura simplificada de um sistema difuso.	25
Figura 10 Representação do método de colapsagem pelo centro de massa [LOPES, 2005].	28
Figura 11 Representação de colapsagem pelo centro centros das áreas [LOPES, 2005].	29
Figura 12 Representação do método de colapsagem média dos máximos [LOPES, 2005].	29
Figura 13 Primeira imagem de um satélite geoestacionário [SATELLITES, 1995].	34
Figura 14 Editor básico do sistema FIS [MATLAB, 2006].	43
Figura 15 Editor de funções de pertença [MATLAB, 2006].	44
Figura 16 Editor de regras difusas [MATLAB, 2006].	44
Figura 17 Representação gráfica da função <i>dsigmf</i> .	45
Figura 18 Representação gráfica da função <i>psigmf</i> .	46
Figura 19 Representação gráfica da função <i>gaussmf</i> .	47
Figura 20 Representação gráfica da função <i>gauss2mf</i> .	48
Figura 21 Representação gráfica da função <i>gbellmf</i> .	49
Figura 22 Representação gráfica da função <i>pimf</i> .	50
Figura 23 Representação gráfica da função <i>sigmf</i> .	51
Figura 24 Representação gráfica da função <i>smf</i> .	51
Figura 25 Representação gráfica da função <i>trapmf</i> .	52
Figura 26 Representação gráfica da função <i>trimf</i> .	53
Figura 27 Representação gráfica da função <i>zmf</i> .	54
Figura 28 Sistema FIS tempo criado.	56
Figura 29 Função de pertença da variável difusa de entrada <i>AirTemperature</i> .	57
Figura 30 Função de pertença da variável difusa de entrada <i>AirHumidity</i> .	58
Figura 31 Função de pertença da variável difusa de entrada <i>WindSpeed</i> .	59
Figura 32 Função de pertença da variável difusa de entrada <i>WindDirection</i> .	59
Figura 33 Função de pertença da variável difusa de entrada <i>AirPressure</i> .	60
Figura 34 Função de pertença da variável difusa de saída <i>Forecast</i> .	61

Figura 35 Função de pertença da variável difusa de saída <i>Wind</i> .....	62
Figura 36 Função de pertença da variável difusa de saída <i>Temperature</i> .....	62
Figura 37 Editor de regras do sistema difuso criado. ....	63
Figura 38 Editor de visualização de regras difusas. ....	64
Figura 39 Sistema <i>FIS tempo2</i> criado. ....	65
Figura 40 Função de pertença da variável difusa <i>Wind</i> do sistema <i>tempo2</i> .....	66
Figura 41 Editor de regras do sistema difuso <i>tempo2</i> criado. ....	67
Figura 42 Editor de visualização de regras difusas do sistema <i>tempo2</i> .....	67
Figura 43 Mensagem de alerta para actualização de dados.....	68
Figura 44 Menu principal do sistema de previsão meteorológica criado. ....	69
Figura 45 Mensagem de dados actualizados. ....	69
Figura 46 Fluxograma de descrição do software de <i>download</i> dos ficheiros <i>xml</i> . ....	70
Figura 47 Mensagem no final da actualização dos dados. ....	70
Figura 48 Menu para a previsão do dia de hoje.....	71
Figura 49 Esquema da estrutura de previsão para o dia corrente. ....	71
Figura 50 Exemplo de uma previsão para o dia de hoje.....	72
Figura 51 Menu da previsão para os dois dias seguintes à data corrente. ....	73
Figura 52 Mensagem caso não seja seleccionada nenhuma opção. ....	73
Figura 53 Esquema da estrutura de previsão para um dia depois do dia corrente.....	74
Figura 54 Exemplo de uma previsão para um dia depois do dia actual. ....	75
Figura 55 Esquema da estrutura de previsão para dois dias depois do dia actual. ....	76
Figura 56 Exemplo de uma previsão para dois dias depois do dia corrente.....	77
Figura 57 Comparação da temperatura máxima para o dia de “Hoje”.....	82
Figura 58 Comparação da temperatura média para o dia de “Hoje”. ....	82
Figura 59 Comparação da temperatura mínima para o dia de “Hoje”.....	83
Figura 60 Comparação da velocidade do vento para o dia de “Hoje”.....	83
Figura 61 Comparação da temperatura máxima para a manhã de “Amanhã”.....	85
Figura 62 Comparação da temperatura mínima para a manhã de “Amanhã”. ....	86
Figura 63 Comparação da velocidade do vento para a manhã de “Amanhã”. ....	86
Figura 64 Comparação da temperatura máxima para a tarde de “Amanhã”. ....	88
Figura 65 Comparação da temperatura mínima para a tarde de “Amanhã”.....	88
Figura 66 Comparação da velocidade do vento para a tarde de “Amanhã”.....	89
Figura 67 Comparação da temperatura máxima para a manhã de “Depois de Amanhã”.....	91
Figura 68 Comparação da temperatura mínima para a manhã de “Depois de Amanhã”. ....	91
Figura 69 Comparação da velocidade do vento para a manhã de “Depois de Amanhã”. ....	92
Figura 70 Comparação da temperatura máxima para a tarde de “Depois de Amanhã”. ....	94
Figura 71 Comparação da temperatura mínima para a tarde de “Depois de Amanhã”.....	94
Figura 72 Comparação da velocidade do vento para a tarde de “Depois de Amanhã”.....	95

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Calendarização do projecto .....	2
Tabela 2	Exemplos de variáveis linguísticas com valores típicos [SOUZA, 2000].....	9
Tabela 3	Valores reais e valores da previsão para dia “Hoje”. .....	81
Tabela 4	Valores reais e valores da previsão para a manhã de “Amanha” .....	84
Tabela 5	Valores reais e valores da previsão para a tarde de “Amanha” .....	87
Tabela 6	Valores reais e valores da previsão para a manhã de “Depois de Amanha”. .....	90
Tabela 7	Valores reais e valores da previsão para a tarde de “Depois de Amanha” .....	93



## *Acrónimos*

- WMO – World Meteorological Organization
- FIS – Fuzzy Inference System
- GFS – Global Forecast System
- NAM – North American Mesoscale
- WRF – Weather Research and Forecasting
- ECMWF – European Centre for Medium-range Weather Forecasts
- XML – eXtensible Markup Language
- ALADIN – Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao longo dos tempos o ser humano teve a curiosidade e a necessidade de prever o estado do tempo, não só devido às actividades que realiza, mas também por questões de conforto e de segurança. Por estes motivos, foram desenvolvidos sistemas de previsão meteorológica de forma a se obterem resultados cada vez mais fiáveis e para períodos de tempo cada vez maiores. Com o aumento das tecnologias e consequente recolha de reais e rigorosos dados, estes sistemas foram sofrendo evoluções, mas mesmo assim, nunca foi possível substituir completamente a informação recolhida pelo homem através do senso comum e descrita por uma linguagem verbal. Assim sendo, um sistema de previsão meteorológica possui características bastante complexas, baseadas em informações vagas, o que leva a que uma previsão seja bastante difícil de efectuar. Por outro lado, os fenómenos atmosféricos apresentam acentuadas variações o que os torna muito inconstantes, levando a que os factores meteorológicos lidos para a obtenção de uma previsão sejam não lineares.

O modelo de previsão meteorológico desenvolvido está dependente de informações meteorológicas como a temperatura, a velocidade do vento, a direcção do vento, a pressão atmosférica e a humidade relativa do ar, provenientes de uma estação meteorológica que disponibiliza periodicamente os valores destas variáveis na Internet.

O sistema de previsão será desenvolvido no *Fuzzy Inference System (FIS)* do Matlab e o interface gráfico no *GUIDE* da mesma ferramenta de programação. O modelo permitirá

efectuar a previsão para três dias, nomeadamente para o dia actual e para os dois dias consecutivos a este, já que, quanto maior for o número de dias a prever menos fiável será a previsão meteorológica.

## 1.2. OBJECTIVOS

O objectivo principal deste projecto é a criação de um modelo de previsão meteorológica baseado na metodologia de inferência difusa. Dada a complexidade inerente à concretização deste objectivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas das quais se salientam:

- estudo dos conceitos relacionados com a tecnologia de inferência difusa;
- estudo e pesquisa de projectos desenvolvidos nesta área;
- estudo da livreria de lógica difusa do Matlab;
- aquisição e tratamento dos dados provenientes da Internet a serem usados no Matlab;
- criação e implementação do sistema de previsão meteorológica;
- análise dos dados obtidos e comparação com os dados reais.

## 1.3. CALENDARIZAÇÃO

Tabela 1 Calendarização do projecto

Cronograma	Nov-07		Dez-07		Jan-08		Fev-08		Mar-08		Abr-08		Mai-08		Jun-08		Jul-08		Ago-08		Set-08		Out-08	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Quinzena																								
Estudo do Estado de Arte	■	■	■	■																				
Estudo da livreria do Matlab			■	■	■	■																		
Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados meteorológicos							■																	
Desenvolvimento do controlador FIS tempo							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Desenvolvimento do controlador FIS tempo2															■	■	■	■	■	■				
Desenvolvimento do ambiente gráfico com o utilizador														■	■	■	■	■	■					
Teste e análise do sistema																	■	■	■					
Análise de resultados																					■	■		
Elaboração do relatório																					■	■	■	■

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

Esta tese encontra-se organizada em 6 capítulos. No Capítulo 1 é contextualizado o presente trabalho e traçados os principais objectivos inerentes, à sua realização. No capítulo seguinte, 2, é apresentado o estado da arte do controlo lógico difuso, bem como o estudo da metodologia adoptada pelos sistemas de controlo lógico difusos, fazendo ainda referência a alguns sistemas já desenvolvidos. Relativamente ao Capítulo 3, é feita uma breve introdução à evolução da meteorologia ao longo dos tempos, sendo também apresentados alguns sistemas de previsão meteorológica já implementados, bem como factores meteorológicos que são considerados nas previsões do estado do tempo. Ao longo do Capítulo 4 é descrita a arquitectura do sistema meteorológico desenvolvido bem como todas as aplicações que foram criadas para permitir o seu funcionamento. No Capítulo 5, é feita a análise dos resultados obtidos em comparação com os valores reais, lidos na estação meteorológica. Por fim, no Capítulo 6 serão tecidas as principais conclusões do trabalho e indicados alguns melhoramentos futuros que podem vir a ser introduzidos no trabalho já efectuado.



## 2. CONTROLO LÓGICO DIFUSO: ESTADO DA ARTE

Ao longo deste capítulo faz-se referência à importância da teoria dos conjuntos difusos e da lógica difusa na modelação de sistemas baseados em variáveis linguísticas e algumas das suas aplicações nas mais variadas áreas.

São abordados aspectos teóricos sobre lógica difusa, conjuntos difusos e alguns sistemas difusos, assim como uma descrição da evolução histórica da tecnologia difusa em sistemas de controlo.

Para terminar, é abordada a estrutura de um controlador difuso, assim como alguns tipos de controladores lógico difusos já desenvolvidos.

### 2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONTROLO DIFUSO

O conceito de lógica difusa surgiu nos anos 60 por Zadeh, tendo actualmente, várias aplicações práticas em diversas áreas de conhecimento, como engenharia, medicina, administração e também em vários segmentos da indústria, desde a automobilística até ao

desenvolvimento de componentes electrónicos. Esta ferramenta permite por um lado captar o conhecimento humano, com a incerteza associada e por outro lado, gerar decisões baseadas nesse conhecimento devido ao mecanismo de inferência difusa [OLIVEIRA, 1991].

Nos anos 70 surgiram as primeiras aplicações na área do controlo automático, aplicações estas, estudadas e desenvolvidas por Mamdani. Surgindo desde então, o método de inferência difuso designado de Mamdani, também conhecido como MAX-MIN.

A partir dos anos 80 surgiram várias aplicações, tendo como base esta tecnologia, nomeadamente, no reconhecimento de padrões, no controlo de temperatura de sistema de aquecimento de água, no controlo de processos de fabrico de cimento, controlo de servo sistemas, controlo de reactores ou ainda o controlo de um comboio eléctrico.

Mais recentemente surgiram as aplicações orientadas ao consumidor em geral, com a aplicação deste conceito em sistemas e aparelhos domésticos, como máquinas de lavar roupa, máquinas fotográficas, frigoríficos, etc.

O controlo de processos industriais foi a área pioneira, sendo as primeiras experiências datadas de 1975 quando foi demonstrado no Queen College, em Londres, que um controlador difuso muito simples conseguiu controlar eficientemente uma máquina a vapor. Na mesma época, a primeira aplicação industrial significativa foi desenvolvida pela indústria de cimento F. L. Smidth Corp. da Dinamarca. Hoje em dia, uma grande variedade de aplicações comerciais e industriais estão disponíveis, destacando-se neste cenário o Japão e mais recentemente, os EUA e a Alemanha. Em produtos mais usuais é de destacar a introdução desta tecnologia em produtos de consumo tais como frigoríficos (Sharp), ar condicionado (Mitsubishi), câmaras de vídeo (Canon, Panasonic), máquinas de lavar roupa (Sanyo), aspiradores, etc. Na indústria automóvel destacam-se as transmissões automáticas (Nissan, Lexus), injeção electrónica, suspensão activa, freios antibloqueantes [ORTEGA, 2001] [ZANETTE, RADANOVITSC, 2006].

Em sistemas industriais incluem-se o controlo de elevadores do grupo (Hitachi, Toshiba), veículos autónomos e robôs móveis (Nasa, IBM), controlo de motores (Hitachi), ventilação de túneis urbanos (Toshiba), controlo de tráfego urbano, controlo de paragem e arranque de composições de metro urbanos (Sendai, Tokio). Estas citações são ilustrativas da

aplicação desta tecnologia, pois correntemente mais de 1000 patentes envolvendo lógica difusa já foram colocadas em prática [ORTEGA, 2001].

De facto, nos últimos anos o potencial de manuseamento de incertezas e o controlo de sistemas complexos tornou-se possível através da lógica difusa, estando também a ser combinados com redes neuronais artificiais, que por sua vez, possuem características de adaptação e aprendizagem. A palavra certa para esta junção é simbiose, que tem vindo a gerar novas classes de sistemas e de controladores neurodifusos, combinando-se desta forma os potenciais e as características individuais em sistemas adaptativos e inteligentes.

Com o desenvolvimento destes sistemas, ir-se-á proporcionar uma significativa contribuição para o melhoramento dos sistemas de automação e controlo, principalmente no controlo de processos.

## **2.2. LÓGICA DIFUSA**

### **2.2.1. O QUE É A LOGICA DIFUSA?**

Lógica difusa é uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, como por exemplo, saber se um copo está “meio cheio” ou “meio vazio”, se uma pessoa é “alta” ou “baixa”, se está “frio” ou “quente”, sendo em geral descritas numa linguagem falada por seres humanos, convertendo-as para um formato numérico de fácil manipulação pelos computadores existentes. Esta lógica também é definida como a lógica que suporta modos aproximados de raciocínios, ao contrário dos exactos como estamos naturalmente habituados a trabalhar.

A lógica difusa confere graus intermédios de verdade para todas as afirmações. As afirmações difusas são classificadas com níveis de verdade intermédios entre os absolutamente verdadeiros e os completamente falsos, sendo estas as classificações extremas possíveis. Assim, a lógica difusa aplica conceitos que podem tomar um valor qualquer de verdade dentro de um conjunto de valores que oscilam entre dois extremos, a verdade absoluta e a falsidade absoluta.

Em linguagem matemática a representação é feita através da teoria dos conjuntos difusos e das funções características associadas a estes conjuntos.

Na teoria clássica dos conjuntos um dado elemento do universo pode ou não pertencer ao referido conjunto. No caso da teoria dos conjuntos difusos existe um grau de pertença, que é determinado por uma função característica real, designada de função de pertença, que permite atribuir a cada elemento de um determinado conjunto valores entre  $[0,1]$ , mediante o peso de cada elemento [SOUZA, 2000].

Um conjunto difuso  $A$  definido no universo  $U$  é caracterizado por uma função de pertença  $\mu_A$ , a qual mapeia os elementos de  $U$  para o intervalo  $[0,1]$ :

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$$

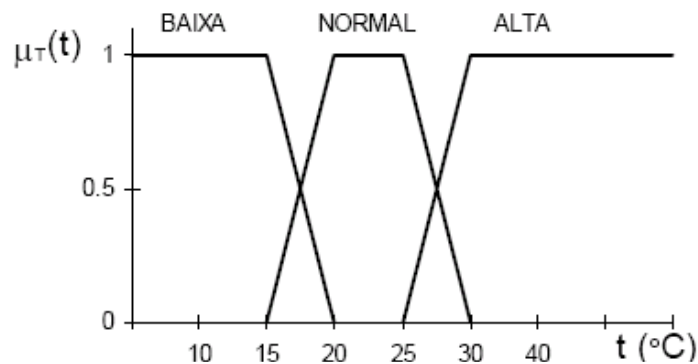
Um aspecto importante da lógica difusa é a captura clara e precisa de vários conceitos utilizados por humanos em raciocínios convencionais. As linguagens naturais possuem um conjunto de expressões com significados imprecisos ou seja, palavras idênticas podem representar ideias diferentes. Com a utilização da técnica de lógica difusa é possível a manipulação simultânea de parâmetros numéricos e de informações de linguagem [ZANETTE, RADANOVITSCK, 2006].

### 2.2.2. VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Em geral, as palavras são menos precisas que os números, assim sendo, o conceito de variável linguística permite representar as características dos fenômenos complexos de uma forma aproximada.

Variáveis linguísticas são variáveis que funcionam como identificadores e que podem assumir um de entre vários valores. Deste modo, uma variável linguística pode assumir um valor linguístico de entre vários outros valores, num conjunto de termos linguísticos.

As variáveis linguísticas são caracterizadas por uma quántupla  $\{X, U, G, T(X), M\}$ , onde  $X$  é o nome simbólico do conjunto de termos, (idade, altura, velocidade, ...),  $U$  é o universo do discurso,  $G$  é uma gramática para gerar os termos  $T(X)$  que pode ser um negativo grande, negativo médio, ..., positivo grande, positivo médio,... e  $M$  é uma função semântica que fornece o significado dos termos linguísticos em função dos valores quantitativos. Estas variáveis são definidas com um certo número de funções de pertença, cada uma representando um valor ou conceito que a variável pode assumir, às quais são atribuídos termos linguísticos apropriados. A figura seguinte mostra um exemplo onde uma variável linguística que representa “*temperatura ambiente*” é descrita por três conjuntos



**Figura 1** Variável linguística que representa a “*temperatura ambiente*” [LOPES, 2005].

difusos: “*baixa*”, “*normal*” e “*alta*”. É de salientar que uma temperatura pode ser representada por mais do que um valor linguístico [SOUZA, 2000].

Estas variáveis podem também ter modificadores que alteram o seu valor. Exemplos de modificadores válidos são: “*muito*”, “*pouco*”, “*não muito*”, “*mais ou menos*”. Existem também conectivos aplicados a estas variáveis: “*e*” e “*ou*”. Assim, um valor para a variável altura pode ser “*não muito alto*” e “*não muito baixo*”.

**Tabela 2** Exemplos de variáveis linguísticas com valores típicos [SOUZA, 2000].

Variáveis linguísticas	Valores típicos
Temperatura	Quente, Confortável, Fria
Peso	Baixo, Médio, Alto
Velocidade	Lenta, Média, Rápida
Distância	Curta, Longa
Fluxo	Muito Baixo, Baixo, Normal, Alto, Muito Alto
Pressão	Baixa, Média, Alta
Nível	Muito Baixo, Baixo, Normal, Alto, Muito Alto

Os conectivos “*e*” e “*ou*” são respectivamente, equivalentes às operações de reunião e intersecção de conjuntos, dando origem a conjuntos complexos definidos que, representados linguisticamente tornam-se mais simples de compreender.

As variáveis linguísticas nos sistemas difusos são usadas em regras difusas. Estas regras deduzem informações sobre uma variável contida na sua conclusão, através de informação proveniente de outra variável contida na sua premissa. Exemplo de 2 regras:

*Regra 1*

**Se** velocidade é lenta

**Então** fazer aceleração alta

*Regra 2*

**Se** temperatura é baixa

**E** pressão é média

**Então** fazer velocidade muito baixa [SOUZA, 2000].

Aos possíveis valores que uma variável linguística pode assumir no universo do discurso, dá-se a designação de gama ou intervalo. Por exemplo, para a variável *velocidade* usada na regra 1, pode-se dar uma gama de 0 a 1000rpm. A frase “*velocidade é baixa*”, ocupa uma secção das variáveis no universo do discurso.

### **2.2.3. INFERÊNCIA DIFUSA**

A lógica difusa trata de conjuntos difusos como sendo proposições difusas, ou seja, uma proposição difusa é uma declaração que define um valor para uma determinada variável linguística. Pode-se representar uma proposição difusa como “*X é A*”, quando *A* é um conjunto difuso no universo de discurso *X*. Uma regra difusa que relaciona duas proposições difusas pode ser “*Se X é A Então Y é B*”. Esta regra estabelece a relação ou associação entre as duas proposições.

A inferência difusa estabelece uma certeza na conclusão de uma regra, devido à evidência avaliada na premissa da mesma [COELHO, 2007].

#### **2.2.3.1. MULTIPLICAÇÃO VECTOR - MATRIZ DIFUSOS**

A multiplicação difusa de um vector por uma matriz usa a técnica conhecida como *composição max-min*.

Considerando esta operação aplicada a uma regra difusa *Se A Então B*, quando  $A$  é um conjunto difuso definido sobre  $X$ ,  $B$  um conjunto definido sobre  $Y$ , os vectores  $A$  e  $B$  são representados como:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n); a_i = \mu_A(x_i)$$

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_p); b_i = \mu_B(y_i)$$

Pode-se representar uma matriz  $M$   $n \times p$ , tal que  $A \circ M = B$  onde  $\circ$  significa o operador de composição que executa a operação max-min em que, dado um vector e uma dada matriz calcula-se o componente  $b_j$  através de:

$$b_j = \max \{ \min(a_i, m_{ij}) \} \quad 1 \leq i \leq n$$

Um exemplo pode ser, assumindo  $A = \{0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ , a matriz  $M$ , onde:

$$M = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.8 \\ 0.4 & 0.8 & 0.4 \\ 0.8 & 0.6 & 0.3 \\ 0.0 & 0.3 & 0.3 \end{vmatrix}$$

Fazendo uso da equação calcula-se  $B$  como:

$$b_1 = \max \{ \min(0.4, 0.1), \min(0.6, 0.4), \min(0.8, 0.8), \min(1.0, 0.0) \}$$

$$= \max \{ 0.1, 0.4, 0.8, 0.0 \} = 0.8$$

$$b_2 = \max \{ \min(0.4, 0.4), \min(0.6, 0.8), \min(0.8, 0.6), \min(1.0, 0.3) \}$$

$$= \max \{ 0.4, 0.6, 0.6, 0.3 \} = 0.6$$

$$b_3 = \max \{ \min(0.4, 0.8), \min(0.6, 0.4), \min(0.8, 0.3), \min(1.0, 0.3) \}$$

$$= \max \{ 0.4, 0.4, 0.3, 0.3 \} = 0.4$$

Matematicamente, uma matriz é uma representação de uma relação de dois grupos de variáveis linguísticas. A tarefa é achar um modo para determinar a correspondente relação funcional através da matriz.

### 2.2.3.2. INFERÊNCIA MAX – MIN

Na inferência *max-min* o operador de implicação usado é o *min*. Isto é:

$$m_{ij} = \text{verdade}(a_i \rightarrow b_j) = \min(a_i, b_j)$$

Dados dois conjuntos difusos  $A$  e  $B$ , e usando a equação acima para a formação da matriz  $M$ , pode-se usar a equação do cálculo dos componentes  $b_j$  para determinar a indução do vector  $B'$  sobre um subconjunto de  $A$  designado  $A'$  [SOUZA, 2000].

Um exemplo, é assumir o universo de discurso definido por  $X$  que representa *temperatura*, e um conjunto difuso  $A$  definido sobre  $X$  que representa *temperatura normal*. Também se pode assumir um universo de discurso definido por  $Y$  que representa *velocidade* e um conjunto difuso  $B$  definido sobre  $Y$  que representa *velocidade média*.

Finalmente assume-se a seguinte regra difusa:

*Se Temperatura é normal Então Velocidade é média*

Ou

*Se A Então B*

Assume-se que os conjuntos difusos são representados por vectores cujos elementos são mostrados com os correspondentes valores dos seus domínios:

$$\text{Temperatura normal} = \{0.0/100, 0.5/125, 1.0/150, 0.5/175, 0.0/200\}$$

$$\text{Velocidade média} = \{0.0/100, 0.6/200, 1.0/300, 0.6/400, 0.0/500\}$$

A formação da matriz  $M$  é iniciada de acordo com a equação  $m_{ij} = \min(a_i, b_j)$

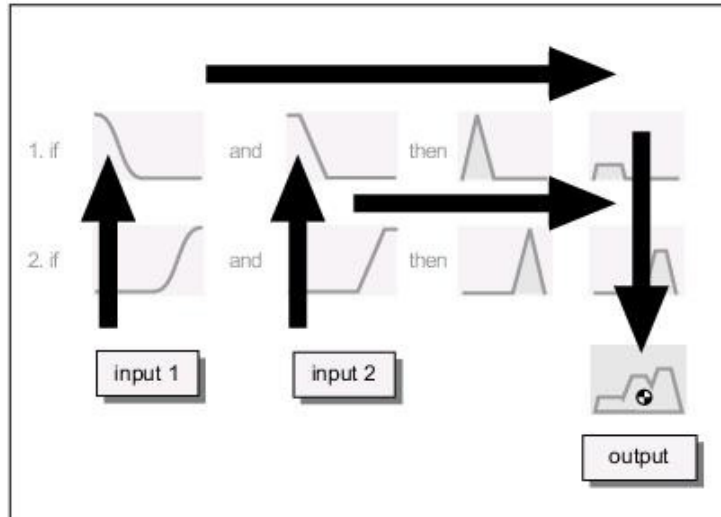


Figura 2 Diagrama de inferência difusa [MATLAB, 2006].

$$M = m_{ij} = \min(a_i, b_j)$$

$$M \begin{bmatrix} \min(0.0, 0.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 1.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 0.0) \\ \min(0.5, 0.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 1.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 0.0) \\ \min(1.0, 0.0) & \min(1.0, 0.6) & \min(1.0, 1.0) & \min(1.0, 0.6) & \min(1.0, 0.0) \\ \min(0.5, 0.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 1.0) & \min(0.5, 0.6) & \min(0.5, 0.0) \\ \min(0.0, 0.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 1.0) & \min(0.0, 0.6) & \min(0.0, 0.0) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

e, assumindo que o subconjunto  $A'$  é dado como:

$$A' = \{0.0/100, 0.5/125, 0.0/150, 0.0/175, 0.0/200\}$$

Este subconjunto representa uma leitura de temperatura de 125°C. A esta medida é definido um grau de pertença de 0.5 para o conjunto difuso *temperatura normal*. Isto induz um conjunto difuso  $B'$  que pode ser determinado.

Com  $A = \{0.0/100, 0.5/125, 0.0/150, 0.0/175, 0.0/200\}$ , através da composição *max-min* tem-se:

$$b_j = \max \{ \min(a_i, m_{ij}) \} \quad 1 \leq i \leq n$$

$$b_1 = \max\{\min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0)\}$$

$$b_2 = \max\{\min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.5), \min(0.0, 0.6), \min(0.0, 0.5), \min(0.0, 0.0)\}$$

$$b_3 = \max\{\min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.5), \min(0.0, 1.0), \min(0.0, 0.5), \min(0.0, 0.0)\}$$

$$b_4 = \max\{\min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.5), \min(0.0, 0.6), \min(0.0, 0.5), \min(0.0, 0.0)\}$$

$$b_5 = \max\{\min(0.0, 0.0), \min(0.5, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0), \min(0.0, 0.0)\}$$

$$B' = (0.0/100, 0.5/200, 0.5/300, 0.5/400, 0.0/500)$$

Estes resultados originaram um conjunto difuso que é uma versão cortada de  $B$ , cuja altura é fixada por  $A'$ . Este é o efeito geral da inferência max-min. O diagrama seguinte (Figura 3) ilustra o modelo de inferência difusa do exemplo existente no Matlab. Em que, para as variáveis de entradas difusas tem-se  $service=3$  e  $food=8$  numa escala de 0 a 10 obtemos o resultado para o tipo de serviço de  $tip=16.7\%$ .

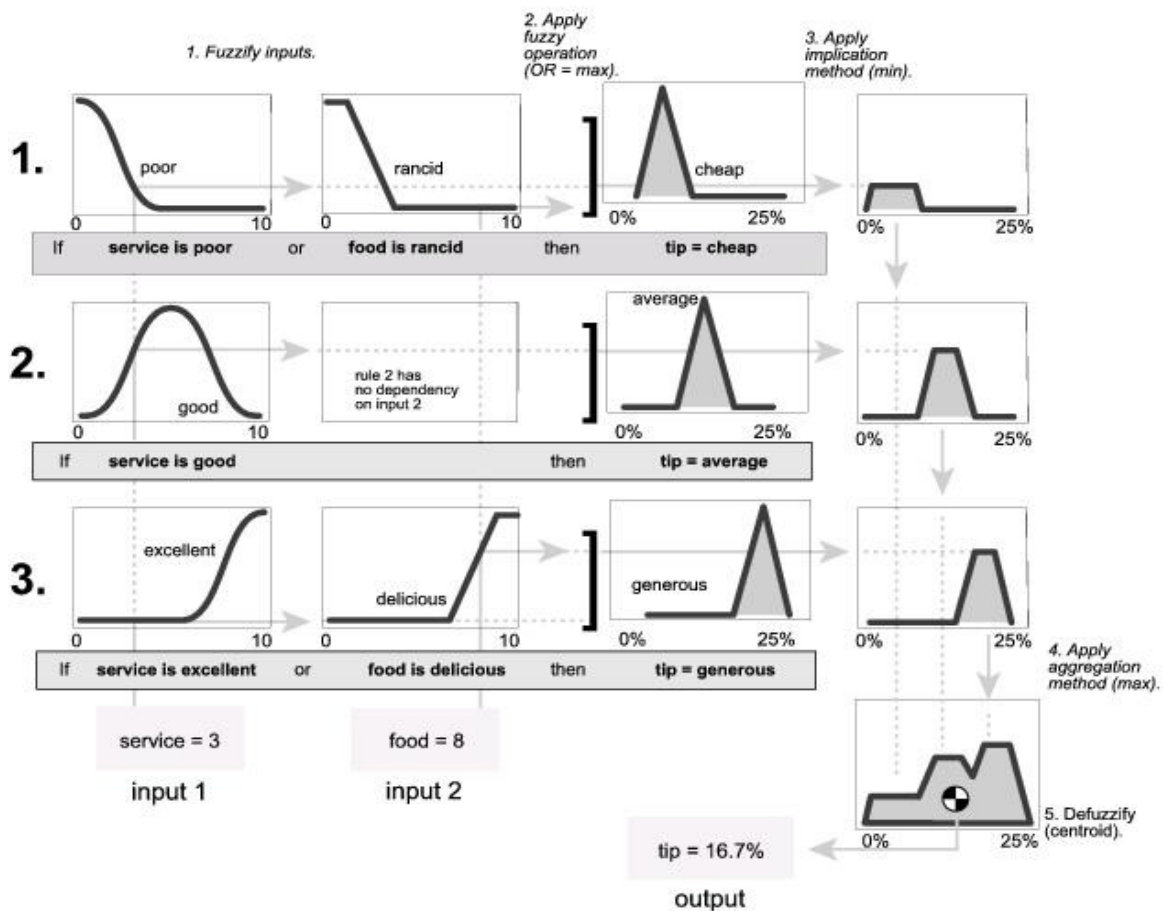


Figura 3 Diagrama de inferência difusa [MATLAB, 2006].

## **2.3. CONJUNTOS DIFUSOS**

A teoria dos conjuntos difusos substitui a teoria da lógica binária (verdadeiro/falso) dos conjuntos clássicos, traduzida pela álgebra de Boole, por uma lógica em que o grau de verdade de uma afirmação pode assumir um valor entre 0 e 1, valores estes que definem o quanto algo é verdadeiro ou falso em relação a um conjunto.

Outro aspecto importante é o facto de, com a teoria dos conjuntos difusos ser possível representar expressões linguísticas qualitativas como “*negativo*”, “*pequeno*”, “*grande*”, “*positivo*”, etc.

Um conceito fundamental nos conjuntos difusos é o conceito de função de pertença. Na representação de um conjunto difuso é necessário definir as suas funções de pertença, sendo o conjunto difuso caracterizado pelas funções de pertença que mapeiam os elementos no intervalo de [0 1], ficando cada elemento com um valor que lhe confere um grau de pertença ao respectivo conjunto [BARBALHO, 2001] [LUNA, 2000].

### **2.3.1. DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS**

Em geral as palavras são menos precisas que números. O conceito de variável linguística propõem-se fornecer os meios para a caracterização aproximada de fenómenos complexos ou mal definidos. Mais especificamente, os conjuntos difusos que representam a restrição associada aos valores de uma variável linguística podem ser vistos como o resumo de várias subdivisões de classes de elementos num universo do discurso. Isto é análogo ao papel representado por palavras e orações num idioma natural [BARBALHO, 2001].

#### **2.3.1.1. VARIÁVEIS DIFUSAS**

As variáveis difusas não são mais que palavras ou termos linguísticos que são usados para expressar conceitos e conhecimentos na comunicação humana. Estes termos, em muitas áreas são a forma mais importante e muitas vezes a única de quantificar os dados ou informações.

As variáveis simbólicas têm vindo a conquistar cada vez maior importância devido ao desenvolvimento das áreas de inteligência artificial e processos de decisão. A capacidade de combinar variáveis linguísticas e numéricas é uma das principais razões do sucesso das

aplicações de lógica difusa em sistemas inteligentes, tanto na engenharia como em muitas outras áreas que lidam com domínios contínuos.

No universo médico, o uso de termos linguísticos permeia todas as áreas, incluindo exames laboratoriais. São frequentes os termos *normalidade*, *levemente aumentado/diminuído*, *debilitado*, *bom estado*, etc.

As variáveis difusas são expressas dentro de um certo domínio de valores. Em geral é o especialista que define esse domínio e realiza a sua fragmentação difusa.

Tal como nos conjuntos clássicos, quando uma variável difusa é definida ela é restrita a um conjunto de valores. A diferença entre as duas abordagens é justamente a noção de valores possíveis e impossíveis, que na lógica difusa é expressa por diferentes graus.

### 2.3.1.2. OPERAÇÕES COM CONJUNTOS DIFUSOS

Sendo o conjunto universo dado por  $U = \{5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80\}$  e considerando os conjuntos difusos:  $A = \{\text{crianças}\}$ ,  $B = \{\text{jovens}\}$ ,  $C = \{\text{adultos}\}$  e  $D = \{\text{velhos}\}$ .

Quando um conjunto  $D$  é subconjunto do conjunto  $C$  ter-se-á para  $x \in U$ :  $\mu_D(x) \leq \mu_C(x)$ .

Os conjuntos  $A$  e  $B$  são iguais se  $\mu_A(x) = \mu_B(x)$  para todos os elementos de  $x \in U$ .

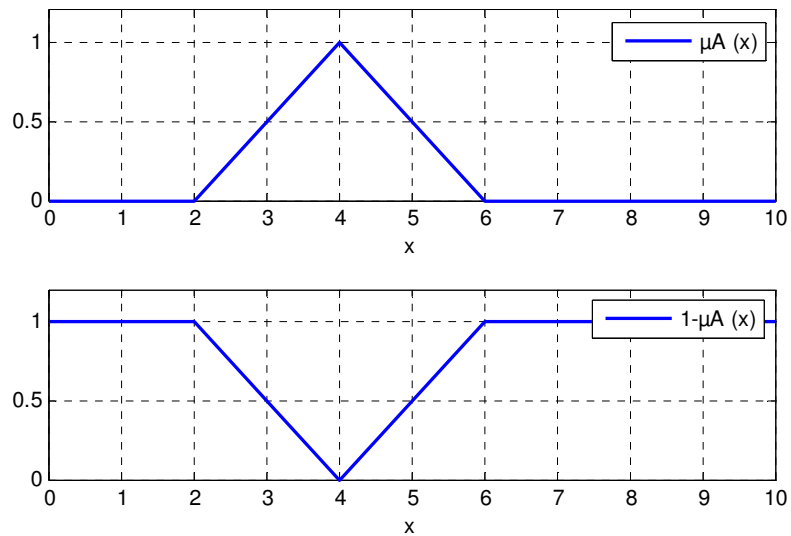
Os conjuntos  $A$  e  $B$  não são iguais se  $\mu_A(x) \neq \mu_B(x)$  para no mínimo um  $x \in U$ .

O conjunto  $A$  é um subconjunto próprio do conjunto  $B$  quando  $A$  é um subconjunto de  $B$  e  $A \neq B$ , ou seja,  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  para todo o  $x \in U$  e  $\mu_A(x) \neq \mu_B(x)$  para no mínimo um  $x \in U$  e indicamos  $A \subset B$  [BARROS, 2001].

O complemento de um conjunto  $A$  em relação ao conjunto universo  $U$  é indicado por  $A'$  e a função de pertença é definida como:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

para todo  $x \in U$ .



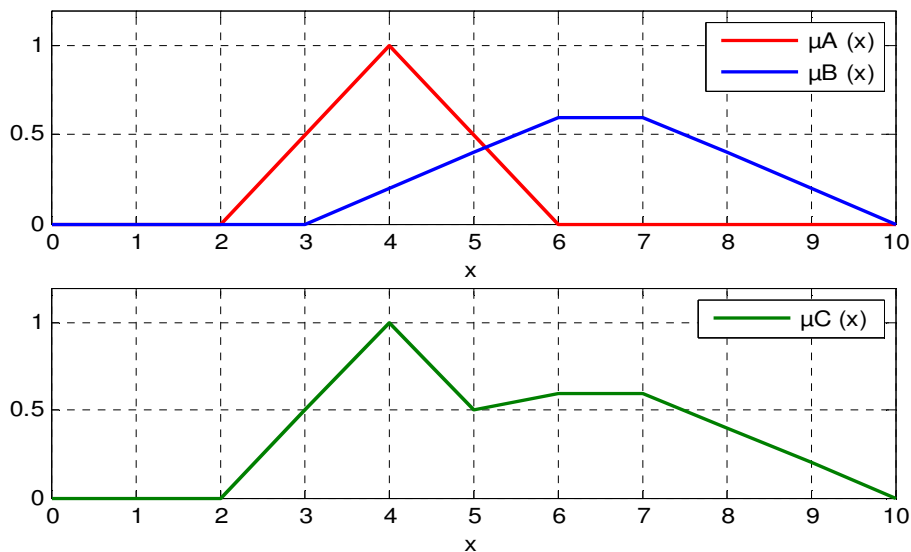
**Figura 4** Representação gráfica de operação de complemento de um conjunto.

A união de dois conjuntos  $A$  e  $B$  é um conjunto  $A \cup B$  tal que para todo o  $x \in U$

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

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x)$$

A intersecção de dois conjuntos  $A$  e  $B$  é um conjunto  $A \cap B$  para todo o  $x \in U$   $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$  (Figura 6):



**Figura 5** Representação gráfica de uma operação de união de dois conjuntos.

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x)$$

### 2.3.2. CRIAR CONJUNTOS DIFUSOS

A criação de um conjunto difuso é uma tarefa subjectiva. Para criar um conjunto difuso basta que se defina a função de pertença sobre o universo do discurso. A função de pertença deve satisfazer os itens de forma a ser uma função admissível, ou seja, deve representar fielmente o comportamento dos elementos, ser consistente com as especificações dos conjuntos e organizar os elementos com graus de pertença ou de possibilidade no intervalo de [0, 1] [BARBALHO, 2001].

### 2.3.3. EFEITOS DO USO DE ADVÉRBIOS COM VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Nas conversas comuns entre humanos são adicionadas incertezas a uma ou a várias declarações, usando advérbios como “*muito*”, “*ligeiramente*”, “*pouco*”, entre outros. Um advérbio é uma palavra que modifica um verbo, adjectivo ou outro advérbio.

Na frase “*temperatura é muito quente*”, tem-se um advérbio a modificar um adjectivo. Neste exemplo, poderia ser necessário outro conjunto difuso designado por “*muito quente*” para representar este outro termo vago. Assim, os advérbios são técnicas disponíveis para tratar as colisões entre variáveis linguísticas [SOUZA, 2000].

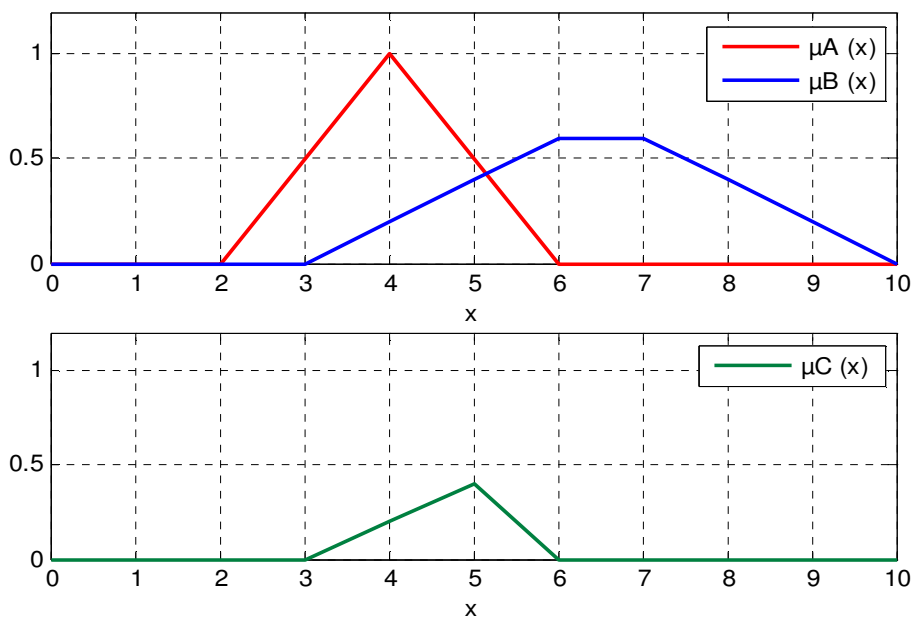


Figura 6 Representação gráfica de operação de intersecção de dois conjuntos.

Um advérbio modifica matematicamente um conjunto difuso. Por exemplo, para uma temperatura de 30°C pode-se considerar uma temperatura quente com grau de 0,6. Mas por outro lado, a mesma temperatura pode ser considerada muito quente com um grau de 0,4, o que é um resultado razoável.

Algumas operações com a utilização de advérbios mais comuns podem ser:

- Concentração

A operação de concentração tem o efeito de produzir uma pequena redução quando o grau de pertença desses elementos é baixo e uma grande redução quando o grau de pertença é alto. A operação é determinada como  $\mu_{COM(A)}(x) = (\mu_A(x))^2$ .

Dado um conjunto difuso de “*temperaturas altas*”, pode-se usar esta operação para criar o conjunto de “*temperaturas muito altas*” [SOUZA, 2000].

- Expansão

A operação de expansão tem o efeito de produzir uma expansão grande quando o grau de pertença desses elementos é baixo e uma baixa expansão quando o grau de pertença é alto. Esta operação é determinada como  $\mu_{EXP(A)}(x) = (\mu_A(x))^{0.5}$ .

Dado um conjunto difuso de “*temperaturas médias*”, pode-se usar esta operação para criar o conjunto de “*temperaturas mais ou menos médias*”.

- Intensificação

Intensificação é a designação dada à operação que tem o efeito de aumentar o grau de pertença quando o valor é maior que 0,5 e diminuir quando esse valor é menor que 0,5. Esta operação é determinada como:

$$\mu_{INT(A)}(x) = 2(\mu_A(x))^2 \text{ para } 0 \leq \mu_A(x) \leq 0.5$$

$$\mu_{INT(A)}(x) = 1 - 2(1 - \mu_A(x))^2 \text{ para } 0.5 \leq \mu_A(x) \leq 1$$

Dado um conjunto difuso de “*temperaturas médias*”, pode-se usar esta operação para criar conjuntos de “*temperaturas realmente médias*”.

- Potência

A operação de potência é uma extensão da operação de concentração.

$$\mu_{POT(A)}(x) = (\mu_A(x))^n$$

Dado um conjunto difuso de “*temperaturas altas*”, pode-se usar esta operação com  $n=3, 4, 5 \dots$  para criar o conjunto de “*temperaturas muito muito altas*” [SOUZA, 2000].

## 2.4. SISTEMAS DIFUSOS

Os sistemas difusos são aqueles que têm no seu sistema um componente que usa lógica difusa para representar o conhecimento.

A maioria das aplicações tem um único sistema difuso que comunica com sistemas convencionais através de valores determinísticos, ou seja, valores obtidos através de conjuntos de valores e circunstâncias anteriores. No entanto, é possível que dois sistemas difusos comuniquem informações usando conjuntos difusos, surgindo os controladores lógico difusos de elevada simplicidade e robustez [JANTZEN, 1998].

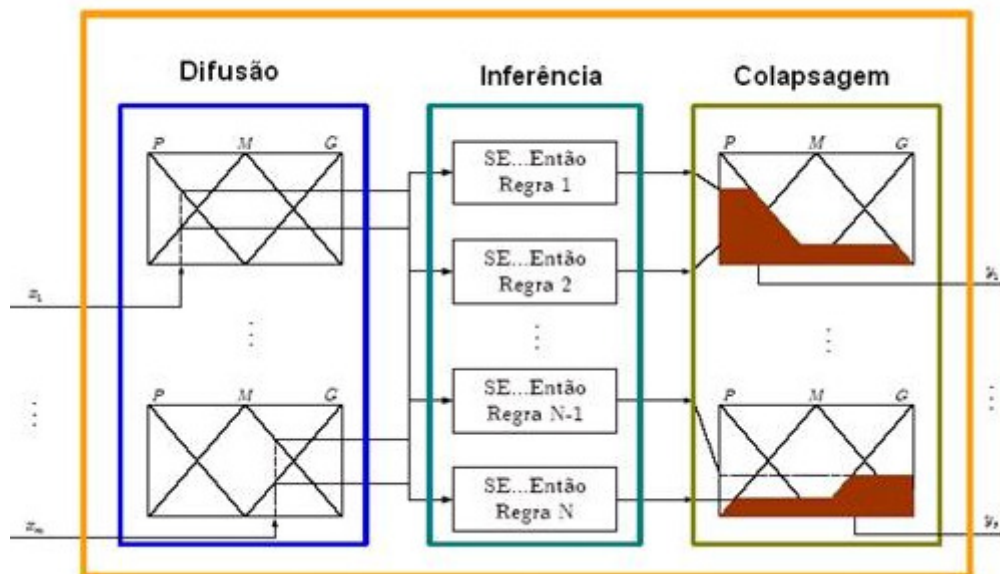
A Figura 7 mostra o esquema geral de um sistema difuso. Os módulos de difusão, inferência e colapsagem<sup>1</sup> serão explicados no ponto 2.5.2 deste trabalho. A entrada e a saída do sistema são representadas por  $x$  e  $y$  respectivamente.

## 2.5. CONTROLADORES LÓGICO DIFUSOS

A ideia básica que está por detrás de um controlador lógico difuso é incorporar a experiência do operador humano no projecto do controlador. Através de um conjunto de

---

<sup>1</sup> Colapsagem é a designação dada para *defuzzification* que é muito usada na literatura. A designação de colapso não é muito utilizada, mas parece ser adequada, já que, de todos os valores possíveis, com graus de possibilidade descritos pela função de pertença, deve resultar um único valor real representativo. O termo colapso já é usado em várias áreas para designar situações em que todos os valores futuros possíveis se convertem num valor real [MIRANDA, 1998].



**Figura 7** Esquema representativo de um sistema difuso.

regras linguísticas que descrevem as estratégias operacionais de controlo, é construído um algoritmo no qual as palavras são definidas como conjuntos difusos. As vantagens principais desta aproximação são relevantes, pois passa a ser possível a implementação de regras baseadas na experiência, na intuição e na heurística.

O primeiro problema para especificar os parâmetros de um controlador lógico difuso é decidir a linguagem difusa, envolvendo especificações explícitas do universo da variável básica, o conjunto de condições da variável linguística e o mapa difuso que relaciona os dois. Normalmente o termo conjunto é um compromisso entre flexibilidade e simplicidade, ou seja, compromisso entre muitas condições e algumas condições.

Um controlador difuso é, essencialmente, um controlador que imita o raciocínio humano para manter o processo, baseado em conjuntos de regras geradas por meio de heurísticas.

Os controladores difusos são sistemas especiais de controlo digital directo, que usam regras para modelizar o conhecimento. Em vez de projectar algoritmos que explicitamente definem a acção de controlo em função das variáveis de entrada do controlador, o projecto de um controlador difuso é baseado na escrita de regras que vinculam as variáveis de entrada com as variáveis de controlo, por relações de variáveis linguísticas.

### 2.5.1. TIPOS DE CONTROLADORES LOGICO DIFUSOS

Quando um controlador difuso é projectado, várias decisões relativas à estrutura e metodologia têm que se tomadas.

No entanto, a classificação de controladores difusos é o resultado de uma sucessão de decisões tomadas pelo projectista. Muitas modificações do controlador original de Mamdani foram propostas desde a publicação do seu artigo em 1975 e uma importante modificação, e frequentemente usada, foi a introduzida por Sugeno em 1985.

A ideia principal de um controlador de Mamdani é descrever os estados do processo por meio de variáveis linguísticas e usar estas variáveis como entradas para as regras de controlo. A variável básica é uma variável de entrada que pode ser um sinal medido ou uma variável de saída de outro controlador.

O número de variáveis linguísticas e o número de relações entre elas determina o número de possíveis regras. Na maioria das aplicações, podem ser desprezados alguns estados, ou porque eles são impossíveis ou porque uma determinada acção de controlo não seria útil. É então suficiente escrever regras que cubram somente as condições necessárias.

As regras conectam as variáveis de entrada com as variáveis de saída e são baseadas na descrição do estado difuso que é obtido pela definição das variáveis linguísticas. Um exemplo hipotético de uma regra para um sistema de pressão poderia ser:

*Se pressão é baixa **E** variação é muito negativa **Então** acção\_da\_válvula é fechar*

A base de regras de sistemas com  $n$  entradas e uma saída pode ser visualizada através de uma tabela de regras onde são divididas as linhas e as colunas de acordo com as condições das variáveis de entrada sendo as entradas uma consequência das regras.

A definição das variáveis linguísticas e das regras são os passos principais de um projecto quando se quer implementar um controlador Mamdani [ROMÃO]. Antes de se elaborar o último passo do projecto, que é a escolha do procedimento de colapsagem apropriado, é definido o modo como os valores das entradas activam o processamento da acção de controlo. A essência computacional pode ser descrita como um processo de três passos, onde o primeiro é a determinação do grau de pertença da entrada dos antecedentes das regras, o segundo é o cálculo computacional das acções de controlo, designadas de

consequentes, que são geradas por implicações difusas para a simulação de decisões humanas e o terceiro são as agregações consequentes das regras para o conjunto difuso *acção de controlo*.

O primeiro passo é calcular o grau de pertença dos valores de entrada dos antecedentes das regras. Utilizando o operador de mínimo *AND* como padrão é calculado o ponto de partida.

Este conceito permite obter a validação dos consequentes. Se regras com baixo grau de pertença no antecedente têm pouca validade, então é originado um corte no consequente dos conjuntos difusos. O resultado deste processo de validação é obtido por agregação de todo os consequentes que usam o operador de máximo e é calculado o conjunto difuso de *acção de controlo*.

É de salientar que o método de Mamdani leva em conta todas as regras num único nível pelo que, não ocorre nenhum encadeamento. Assim, o processo de inferência no controlo difuso é muito mais simples que na maioria dos sistemas anteriormente conhecidos.

O controlador Sugeno surgiu em 1985 por Sugeno. Este novo tipo de controlador difuso, consistia apenas na modificação do controlador de Mamdani. A ideia é escrever regras que têm antecedentes difusos, equivalente ao controlador Mamdani. Os resultados das regras são agregados como somas dos pesos das acções de controlo correspondentes a cada regra. O peso de cada regra é o grau de pertença do antecedente valor de entrada nessa regra, como calculadas no controlador Mamdani, pelo que o procedimento de colapsagem é desnecessário [ROMÃO].

A função do consequente, que depende das variáveis de entrada, é normalmente linear, mas podem ser usados outros tipos. Uma hipotética regra para o controlo Sugeno poderia ser:

*Se temperatura é baixa E troca\_detemperatura é pouco negativa Então aquecimento = 400-120*

A acção de controlo é calculada com a ajuda dos graus de pertença que são avaliados exactamente como no controlo de Mamdani.

É possível ver o controlador Sugeno como um controlador linear que é válido ao redor de um ponto operacional definido. O algoritmo de controlo no ponto operacional é perfeitamente válido e perde validade com grau de pertença decrescente, o qual é calculado

com a ajuda dos antecedentes das regras. Assim, a estratégia de controlo é uma combinação de várias estratégias lineares definidas em diferentes pontos nas condições do espaço.

### 2.5.2. ESTRUTURA DE UM CONTROLADOR DIFUSO

A maioria das técnicas de controlo tradicionais baseiam-se no cálculo da intensidade do sinal de controlo a partir de conjuntos de sinais de entrada, em função de um modelo matemático constituído por um conjunto de equações que descrevem o processo. No entanto, exprimir a experiência humana através das técnicas de controlo tradicional, que são na maioria das vezes muito importantes e valiosas, é uma tarefa quase impossível e que leva muitas vezes, nos processos de controlo industrial, à necessidade de intervenção de um operador para completar esse controlo [JANTZEN, 1998].

O aparecimento da lógica difusa proporcionou o desenvolvimento de controladores que reflectem de uma forma muito próxima a experiência humana. Isto é possível devido aos controladores difusos basearem o seu princípio de funcionamento em regras, na maioria das vezes com uma correspondência linguística estabelecida pela teoria dos conjuntos difusos.

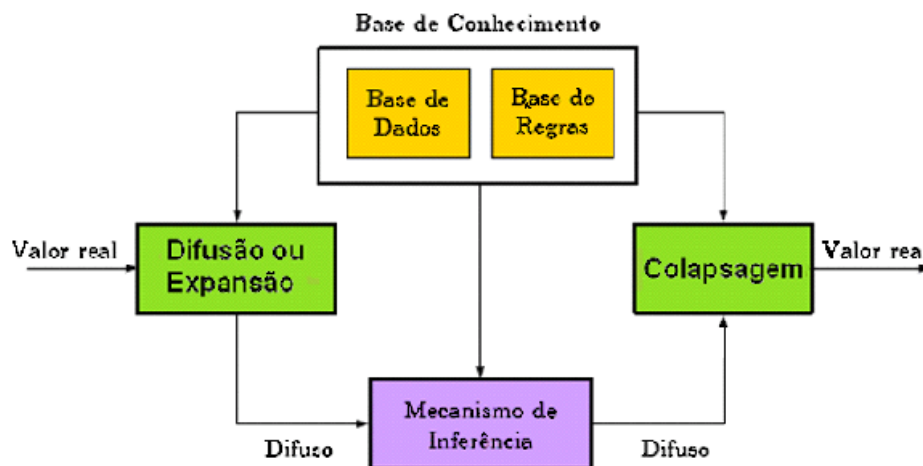
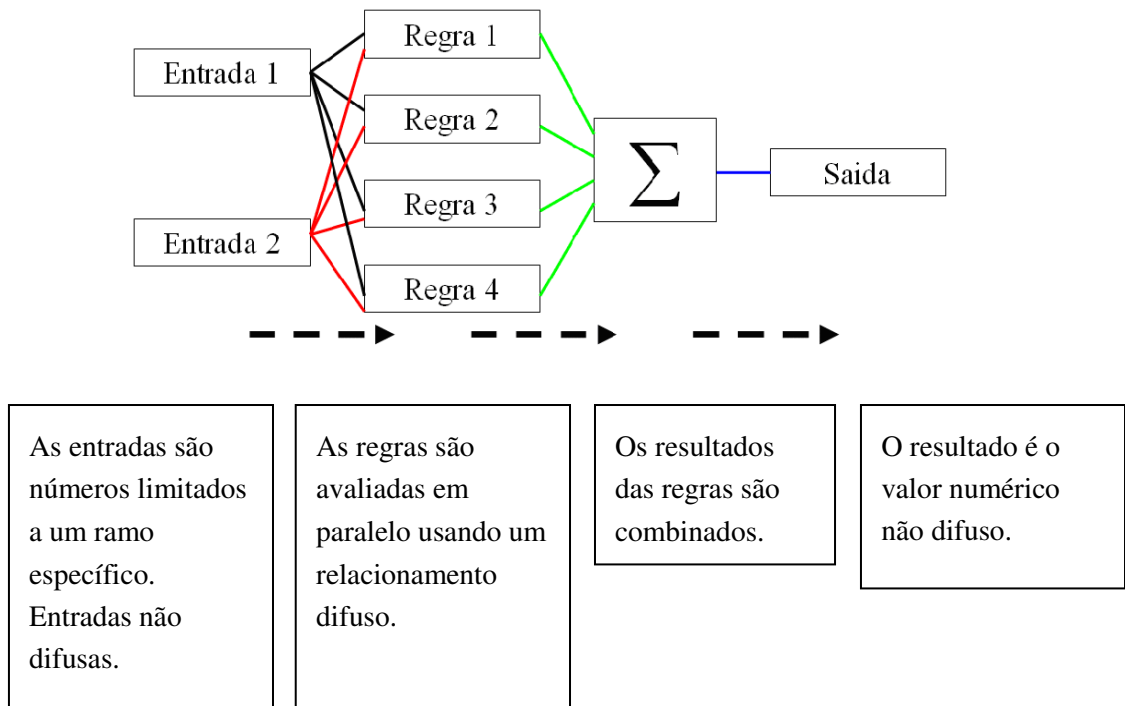


Figura 8 Esquema representativo de um controlador difuso.



**Figura 9 Estrutura simplificada de um sistema difuso.**

**Módulo de Expansão ou Difusão:** é o responsável pela conversão de valores reais (por exemplo uma tensão), em valores difusos de modo a torná-los compatíveis com a representação interna do controlador difuso. Caso o universo de valores não se encontre normalizado este módulo realiza a transformação necessária de escala, ou seja, determina o grau de pertença de cada variável.

**Base de Conhecimento (base de dados + base de regras):** é realizada quando se mapeiam valores linguísticos de entrada em valores linguísticos de saída com recurso às regras. Esta usa implicações difusas para simulação de decisões humanas, gerando os consequentes, partindo-se de um conjunto de condições de entrada, chamada de antecedente. Assim sendo, neste módulo inclui-se as definições das funções de pertença para cada variável de estado e de controlo, bem como todas as regras difusas aplicáveis.

**Base de Dados:** disponibiliza a informação necessária ao funcionamento dos módulos de difusão ou expansão e colapsagem, sob a forma de funções de pertença e de factores de escala.

**Base de Regras:** representa a estratégia e objectivos de controlo de um operador humano.

**Mecanismo de Inferência:** determina as possíveis reacções provenientes de cada uma das regras, em resposta a um determinado estímulo e combina essas reacções de forma a obter-se uma descrição global difusa da resposta do controlador.

**Módulo de Colapsagem:** converte a resposta difusa dada pelo sistema em valores numéricos de saída e procede à conversão de escala desses valores para o domínio dos sinais de controlo. Estas funções são realizadas por uma interface de colapsagem, obtendo-se um valor discreto que possa ser usado numa acção de controlo no mundo real.

### 2.5.3. REGRAS DIFUSAS

As regras difusas são estruturas vastamente utilizadas em várias abordagens da teoria difusa. Elas podem ser entendidas de diversas maneiras. Conceptualmente, as regras difusas descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise de um painel de especialistas e cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado. A inferência baseada em regras difusas pode também ser compreendida como um elemento funcional que mapeia um conjunto de entradas de um sistema num conjunto de saídas.

A regra difusa é uma unidade capaz de capturar algum conhecimento específico, sendo um conjunto de regras capaz de descrever a globalidade de um sistema. Cada regra, da mesma forma que uma afirmação clássica, é composta por uma parte antecedente (a parte Se) e uma parte consequente (a parte Então), resultando numa estrutura do tipo

**Se** { antecedentes } **Então** { consequentes } [OLIVEIRA, 1991].

Os antecedentes descrevem uma condição (premissas), enquanto a parte consequente descreve uma conclusão ou uma acção que pode ser esboçada quando as premissas se verificam. A diferença entre os antecedentes de uma regra difusa e de uma regra clássica é que os primeiros descrevem uma condição flexível, ou seja, uma condição que pode ser parcialmente satisfeita, enquanto os últimos descrevem uma condição rígida (a regra não funciona se os antecedentes não são completamente satisfeitos).

Os antecedentes definem uma região difusa no espaço das variáveis de entrada do sistema. Já os consequentes descrevem uma região no espaço das variáveis de saída do sistema, qualquer que seja a sua conclusão/acção. Sendo assim, a construção dos antecedentes muitas vezes resulta num trabalho de classificação, enquanto a elaboração dos consequentes exige um conhecimento, ainda que empírico, sobre a dinâmica do sistema.

Podemos esperar, então, que a elaboração dos consequentes de uma regra seja mais complexa do que a dos antecedentes.

Uma vez construído o conjunto de regras difusas necessitaremos de uma “máquina de inferência” para extrair dela a resposta final. Existem vários métodos de inferência possíveis e a escolha de um deles depende do sistema que está a ser analisado. No entanto, a inferência mais comum e amplamente utilizada no controle de sistemas, é o método de Mamdani [ROMÃO].

As regras são processadas em paralelo, ou seja, todas as regras (circunstâncias) são consideradas ao mesmo tempo e no final obtemos uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico como um conjunto difuso, a depender do tipo de consequente utilizado. Às vezes é necessário que a saída do sistema seja um número, o que é muito comum em controladores difusos, pois o sistema precisa ser realimentado. Nestes casos se a saída do sistema for um conjunto difuso, então faz-se o processo de colapsagem para se obter um número apropriado.

#### **2.5.4. MÉTODOS DE COLAPSAGEM EXISTENTES**

O termo colapsagem é o termo adoptado para a designação utilizada pela maioria dos autores como *defuzzyfication*. O termo colapso está associado à conversão de um conjunto difuso num único valor real, rígido, que sob alguma perspectiva lhe seja equivalente ou representativo [MIRANDA, 1998].

A importância da colapsagem de uma resposta difusa é evidente em aplicações de controlo. O sinal de controlo a emitir tem que ser concreto e bem determinado. Sendo assim, não basta chegar à descrição difusa de uma resposta face a uma entrada. É necessário colapsar essa resposta num sinal específico.

É de referir, que existem vários métodos para efectuar esta operação de colapsagem. A escolha de cada método depende de cada aplicação a realizar e do seu projectista. Os vários métodos que provocam o colapso são:

Centro de massa / centro de área / centro de gravidade;

Centro das somas das áreas;

Centro da média das alturas / média dos máximos [MIRANDA, 1998] [LOPES, 2005].

#### 2.5.4.1. COLAPSAGEM PELO CENTRO DE MASSA

A colapsagem pelo centro de massa é o método mais utilizado e mais popular de todos. A expressão matemática deste método representa a influência de cada ponto do conjunto difuso a colapsar e é a média dos pontos de valor de pertinência não nulos pesada pela importância do respectivo valor de pertinência. Este método é o mais vantajoso por ser mais rápido de calcular [MIRANDA, 1998].

#### 2.5.4.2. COLAPSAGEM PELO CENTRO DOS CENTROS DAS ÁREAS

Este método baseia-se nos cálculos das áreas dos conjuntos truncados, em vez de trabalhar com base no conjunto difuso. Ou seja, corresponde a calcular o centro de massa dos centros de massa de cada área individual. A área é ponderada com o valor da função de pertinência. A ideia deste método é agregar a informação sobre possíveis acções de controlo que são representadas pela função de pertinência [MIRANDA, 1998] [LOPES, 2005].

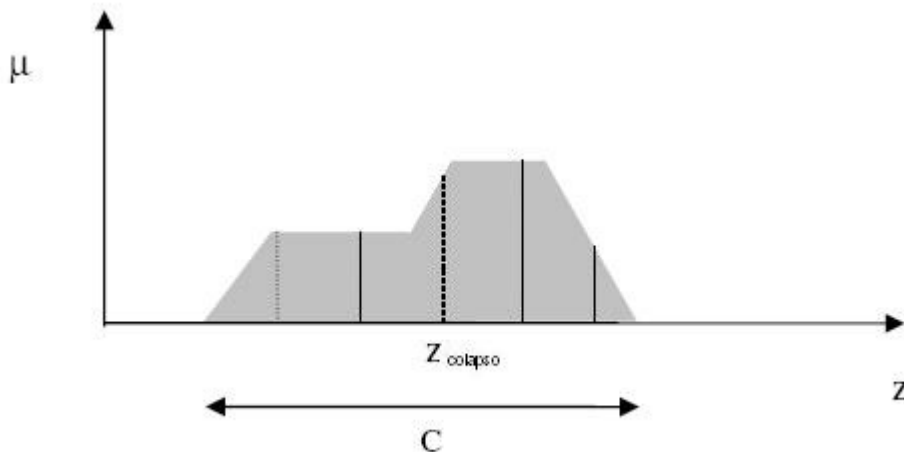


Figura 10 Representação do método de colapsagem pelo centro de massa [LOPES, 2005].

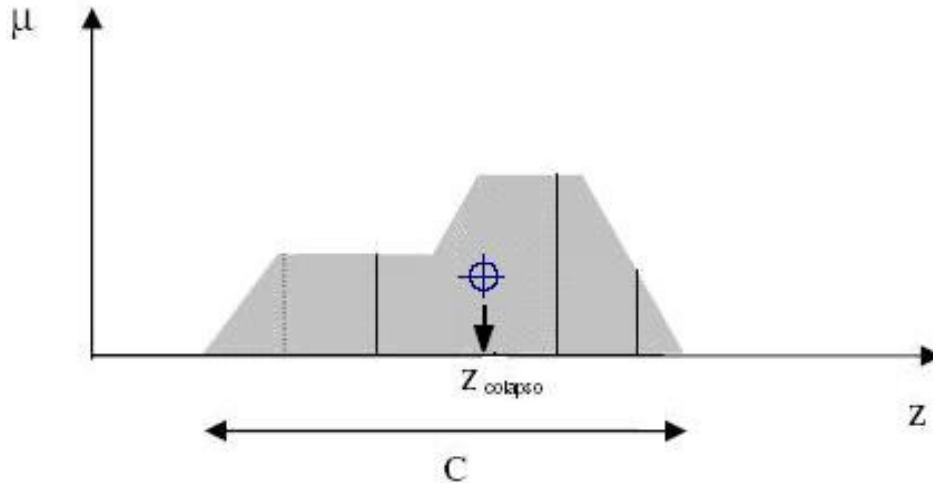


Figura 11 Representação de colapsagem pelo centro centros das áreas [LOPES, 2005].

### 2.5.4.3. COLAPSO PELA MÉDIA DOS MÁXIMOS

Este método é dos mais eficientes computacionalmente, pois, calcula a média pesada dos máximos de cada subconjunto truncado. Como em cada um destes subconjuntos o máximo corresponde a um intervalo, neste método considera-se o ponto central desse intervalo. Assim, as funções de pertinência do conjunto são transformadas nos seus consequentes clássicos, representados por uma linha vertical que passa pelo centro de gravidade de cada conjunto difuso. O cálculo de  $Z_{colapso}$  que é o centro dos máximos, é reduzido ao cálculo da média ponderada das médias ponderadas de  $Z_i$  ( $Z_1 \dots Z_2$ ) [MIRANDA, 1998].

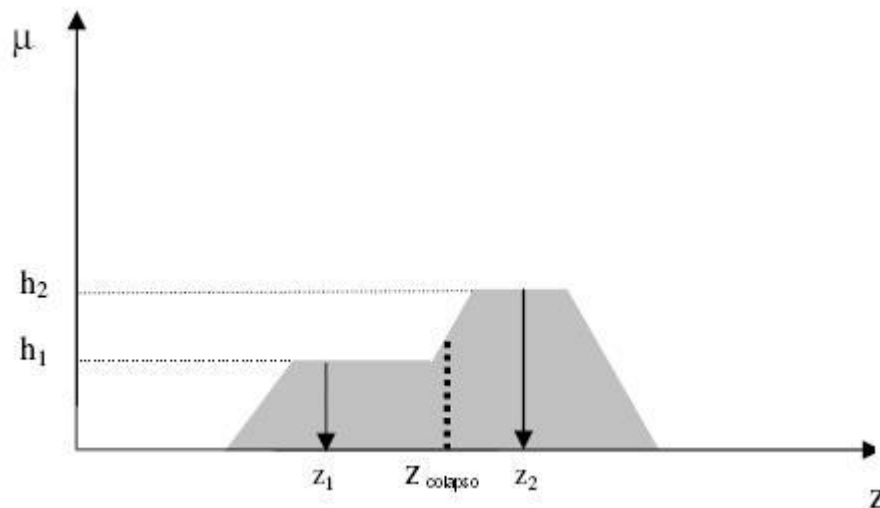


Figura 12 Representação do método de colapsagem média dos máximos [LOPES, 2005].

#### 2.5.4.4. PROPRIEDADES DE UM MÉTODO DE COLAPSAGEM

O método de colapsagem foi um método que surgiu através da arte de inventar e descobrir. Há no entanto, algumas propriedades gerais que se devem ter em conta na validação de um método de colapsagem. Entre elas é de realçar a continuidade, a inambiguidade, a plausibilidade e a complexidade computacional [MIRANDA, 1998].

**Continuidade:** uma pequena alteração na entrada deve ter uma pequena alteração na resposta.

**Inambiguidade:** a resposta a uma entrada deve ser única e bem definida.

**Plausibilidade:** o valor colapsado deve corresponder a um elevado valor de pertença no conjunto difuso de resposta, tendo uma localização mais ou menos central relativamente ao respectivo conjunto de suporte.

**Complexidade computacional:** o cálculo do valor colapsado deve ser produzido de forma eficiente e compatível com as aplicações acopladas ao sistema implementado. Dos métodos descritos anteriormente, o mais rápido é o da média dos máximos e o mais lento é o do centro de massa [MIRANDA, 1998].

# 3. METEOROLOGIA

## 3.1. O QUE É A METEOROLOGIA – BREVE INTRODUÇÃO

A meteorologia vem do grego *meteoros*, que significa elevado no ar, e *logos*, que significa estudo. É a ciência que se dedica ao estudo dos processos que ocorrem na atmosfera, principalmente na camada mais próxima da superfície terrestre, possuindo aproximadamente 20km de espessura. Nesta camada é onde ocorrem a maioria das actividades humanas, e é aí que podem ser sentidos os efeitos que as condições atmosféricas exercem no desenrolar dessas actividades. Dessa constatação surgiu a necessidade de se conhecer melhor os processos que causam as alterações e as evoluções das condições meteorológicas.

Aspectos mais tradicionais e conhecidos são a previsão do tempo e a climatologia. O tempo pode ser definido como o estado da atmosfera num determinado instante e num determinado lugar. O clima tem sido frequentemente definido como um tempo médio, ou seja, um conjunto de condições médias que dominam numa região, obtidas das médias das observações durante um certo intervalo de tempo. Contudo, variações e condições extremas do tempo também são importantes para caracterizar uma região. Por exemplo, os agricultores estão interessados não apenas em conhecer a precipitação média de um

determinado mês, mas também a frequência de meses extremamente secos. Da mesma forma a gestão de recursos hídricos exige um conhecimento não apenas de valores médios, mas também de valores extremos e a sua probabilidade de ocorrência. Portanto, o clima é o conjunto de toda a informação estatística sobre o tempo num determinado local. A longo prazo é o clima que determina se uma região é ou não habitável e os tipos de vegetação natural que nela possam existir; num prazo mais curto, é o tempo que condiciona a segurança dos meios de transporte, as formas de lazer, a dispersão de poluentes e a realização de actividades agrícolas.

### **3.2. EVOLUÇÃO DA METEOROLOGIA ATÉ AOS DIAS DE HOJE**

A meteorologia não é uma ciência apenas dos tempos de hoje. Ao longo de vários séculos o ser humano teve a necessidade e a curiosidade de explicar os fenómenos atmosféricos.

A seguir é apresentada uma breve evolução histórica da meteorologia desde as épocas antigas até aos dias de hoje.

Civilizações ancestrais:

O estado do tempo é controlado por divindades. Os feiticeiros e os sacerdotes são os mediadores entre os deuses e o Homem na Terra. É de referir que na civilização egípcia (3500 a.c.) *Ra* controlava o movimento dos corpos celestes, e assim as subidas e descidas do nível das águas do Nilo e *Osiris* controlava as cheias anuais do Nilo e, portanto, a fertilidade e a morte. Outro como *Marduk* era o Deus das tempestades na Babilónia (2100-689 a.c.).

Primeiras observações:

Astrónomos chineses desenvolvem um calendário que divide o ano em 24 festivais, e especificam o estado do tempo para cada um deles.

Grécia:

Filósofos iniciam uma tradição de investigação e análise racional dos fenómenos naturais. Aristóteles com o seu livro “*Meteorológica*” (do qual deriva a palavra meteorologia), tenta descrever a natureza física do céu, do ar, do mar e da terra, incluindo todos os fenómenos atmosféricos conhecidos até então. Apesar de muitas observações correctas e opiniões hipotéticas Aristóteles comete o erro de pensar que “a terra é imóvel”. Teophrastus publica “*Sinais do Tempo*” e descreve 80 tipos de chuva, 50 tipos de tempestades, 45 tipos de ventos e 24 tipos de bom tempo. É o responsável por muitos dos provérbios acerca do tempo e do clima que se viriam a generalizar mais tarde na idade média.

Idade média:

Nos países árabes os almanaques<sup>2</sup> tornam-se comuns. Estes incluem previsões do estado do tempo e da sua influência nas culturas agrícolas, assim como informação acerca de acontecimentos astronómicos e festas religiosas. Na Europa e na América do Norte os almanaques tornam-se muito populares no século XVII e XVIII.

Renascimento:

Copérnico (1473-1543) apresenta a teoria de que a Terra se move em torno do sol, fornecendo uma explicação para os equinócios<sup>3</sup>, solstícios<sup>4</sup> e estações do ano. Leonardo da Vinci (1452-1519) desenvolve o primeiro higrómetro<sup>5</sup>. Galileo (1564-1642) inventa o primeiro termómetro, sem no entanto, deixar registos das observações de temperatura. Torricelli (1608-1647) inventa o primeiro barómetro<sup>6</sup>. Pascal (1623-1662) é o primeiro a pôr a hipótese de que as variações do estado do tempo estão relacionadas com variações da pressão atmosférica.

Século XIII:

São introduzidas as escalas de temperatura de Célsius e Fahrenheit. Os higrómetros são aperfeiçoados e surgem novos instrumentos de medição. São criadas as redes meteorológicas internacionais sob a direcção da *Royal Society* em Inglaterra, da *Académie des Sciences* na França e da *Mannheim Society* na Alemanha. Esta última sociedade desaparece em 1799, mas deixa estabelecidos os procedimentos básicos da meteorologia sinóptica<sup>7</sup> que se iria desenvolver no século XIX e XX.

Século XIX:

A invenção do telégrafo por Samuel Morse (1791-1872) permite a comunicação rápida das observações realizadas nas diversas estações meteorológicas. As primeiras cartas sinópticas são construídas com base nestas observações. Robert FitzRoy (1805-1865) introduz a instalação de aparelhos de medição meteorológica em navios da armada britânica. Matthew Maury (1806-1873) promove as primeiras conferências com vista à troca internacional de

---

<sup>2</sup> Almanaque é um folheto ou livro que, além do calendário do ano que contém os dias do ano, festas, feriados e luas, possui diversas indicações úteis, poesias, trechos literários, anedotas, curiosidades, etc.

<sup>3</sup> Equinócio é o ponto da orbita da Terra no qual se verifica uma igual duração do dia e da noite, e que ocorre nos dias 21 de Março e 23 de Setembro.

<sup>4</sup> Solstício é o tempo em que o Sol se mantém nos trópicos, parecendo estar sempre na mesma posição durante alguns dias, antes de começar a aproximar-se novamente do equador.

<sup>5</sup> Higrómetro é um instrumento que permite a medição do grau de humidade atmosférica.

<sup>6</sup> Barómetro é um instrumento que permite a medição da pressão atmosférica.

<sup>7</sup> Meteorologia sinóptica é baseada em cartas sinópticas que permitem ver um conjunto de factores de uma só vez dando uma visão geral do todo.

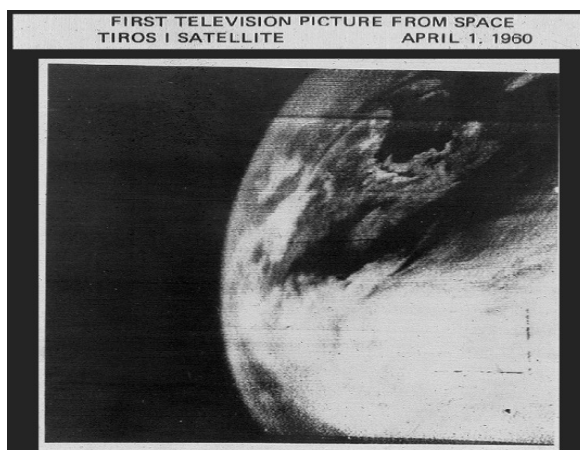
dados meteorológicos que levam mais tarde (1873) à fundação da WMO (*World Meteorological Organization*).

Século XX:

Diversos países entre os quais Portugal já dispõem no início do século de serviços nacionais de meteorologia. Na Suécia surge a escola de Bergen (1862-1951) onde é desenvolvida a teoria de que as zonas de actividade do tempo estão concentradas em regiões relativamente estreitas. Chamam a estas zonas “frentes” por analogia com às frentes de batalha durante a primeira grande guerra. No início dos anos 30 são inventadas as radiossondas<sup>8</sup> que permitiram construir cartas sinópticas a níveis mais altos da atmosfera. Durante a segunda grande guerra surge o radar que permite identificar padrões de chuva sobre grandes áreas.

O primeiro modelo numérico de previsão do tempo é desenvolvido por Lewis Richardson (1881-1953). Com o aparecimento dos computadores os problemas de cálculo numérico são resolvidos mais facilmente, levando ao desenvolvimento de modelos de previsão do estado do tempo mais sofisticados. As primeiras fotografias tiradas do espaço provêm de câmaras instaladas em mísseis. Em 1960 é lançado o primeiro satélite orbital (TIROS 1). O primeiro satélite geostacionário é lançado em 1966.

Actualmente, os satélites meteorológicos geostacionários mais conhecidos e utilizados são mantidos pela EUMETSAT (Meteosat), pelos Estados Unidos (GOES), pelo Japão (GMS), pela China (FY-2), pela Rússia (GOMS) e pela Índia (INSAT). As órbitas são equatoriais, a uma



**Figura 13** Primeira imagem de um satélite geostacionário [SATELLITES, 1995].

---

<sup>8</sup> Radiossonda é um aparelho constituído por um balão que sustenta e transporta dispositivos de medição de pressão, temperatura e humidade, para além de um pequeno emissor de ondas curtas, e que é utilizado para obter informações sobre as condições meteorológicas.

altitude de 38.000km. A esta altura, o seu período orbital é equivalente à rotação da terra, de forma, a que os satélites pareçam estar estacionados num ponto sobre o Equador. Para conseguir uma cobertura global é necessária uma constelação de 5 a 6 satélites. Devido às suas órbitas estes satélites não passam nos pólos.

### **3.3. SISTEMAS DE PREVISÃO METEOROLÓGICA**

O principal objectivo da investigação meteorológica é a previsão do tempo. Para atingir o referido objectivo é necessário conhecer e compreender os fenómenos atmosféricos. Depois de se conhecer o estado da atmosfera num instante inicial, incluindo as condições nas suas fronteiras, inferior (superfície terrestre) e superior (topo da atmosfera) e as leis que governam o movimento da atmosfera, o objectivo da previsão é determinar o estado do tempo num instante posterior ao actual.

Em meteorologia existem diversos prazos de previsão:

- Previsão a muito curto prazo (próximas horas);
- Previsão a curto prazo (1 a 2 dias);
- Previsão a médio prazo (até uma semana);
- Previsão a longo prazo (superior a uma semana) que inclui a previsão mensal e a previsão sazonal.
- Previsão climática (cenários previstos a vários anos).

Enquanto as previsões até 10 dias podem ser consideradas como previsões determinísticas, ou seja, conhecendo o estado inicial da atmosfera e as condições nas suas fronteiras, é possível prever qual vai ser o estado da atmosfera num instante futuro. As previsões de longo prazo e as climáticas são consideradas probabilísticas, pois elaboram o cenário futuro mais provável perante determinadas condições iniciais. Deste modo fornecem informações estatísticas relativas a diversas grandezas para uma determinada zona do globo num determinado intervalo de tempo.

As previsões meteorológicas são efectuadas com base na análise de resultados de modelos físico-matemáticos da atmosfera, designados por modelos numéricos de previsão meteorológica.

A previsão numérica do tempo recorre ao potencial de cálculo dos computadores para produzir uma estimativa do estado futuro da atmosfera utilizando os designados modelos de previsão. Estes modelos baseiam-se num conjunto de equações que traduzem as leis da física que descrevem o comportamento da atmosfera.

Com base num modelo de previsão obtêm-se então, a previsão a partir do conhecimento do estado inicial da atmosfera. A sua execução só é possível através de super computadores e de códigos informáticos de grande complexidade que fornecem previsões para várias variáveis atmosféricas, tais como a temperatura, a pressão, o vento e a precipitação.

A qualidade da informação numérica é condicionada, porém, pelas incertezas inerentes ao conhecimento do estado da atmosfera num dado instante e também pelas limitações impostas pelos modelos de previsão.

O grau de confiança nos resultados dos modelos numéricos de previsão diminui com o tempo, ou seja, uma previsão a 3-4 dias tem, em princípio, maior grau de confiança do que uma previsão a 7-8 dias. Para colmatar esta situação foram desenvolvidos produtos que utilizam uma abordagem probabilista, permitindo estabelecer uma tendência das condições meteorológicas e, conseqüentemente, aumentar, dentro de certos limites, o grau de confiança de uma previsão. Hoje em dia, a previsão numérica do tempo faz parte das actividades operacionais da maioria dos serviços meteorológicos de todo o mundo. As previsões globais, para um alcance de cerca de uma semana, são feitas em apenas alguns centros mundiais, no entanto muitos países produzem previsões regionais ou locais com alcances mais restritos.

Para o desenvolvimento da previsão numérica a médio e a curto prazos, foi criado na Europa um centro de desenvolvimento integrado entre vários países, dos quais Portugal faz parte, designado de *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF). Neste centro de desenvolvimento está a ser utilizado e desenvolvido o Projecto Internacional ALADIN (*Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational*), estando também a ser elaborada uma nova versão do mesmo. A versão operacional deste projecto é um sistema de área limitada, com uma resolução aproximada de 12Km. Até aos dias de hoje, vários produtos derivados deste modelo e do modelo global do ECMWF foram já desenvolvidos e a sua verificação e validação são efectuadas de forma sistemática.

Outros modelos numéricos como o GFS (*Global Forecast System*), NAM (*North American Mesoscale*), WRF (*Weather Research and Forecasting*), são modelos meteorológicos usados nos Estados Unidos da América.

### **3.4. ELEMENTOS METEOROLOGICOS FUNDAMENTAIS CONSIDERADOS NAS PREVISÕES**

Antes de se falar no sistema desenvolvido, vai ser feita uma breve abordagem aos principais elementos que são considerados numa previsão meteorológica.

Para uma previsão meteorológica é necessário saber algumas medições efectuadas numa estação meteorológica tais como: velocidade do vento, temperatura do ar, humidade relativa média, temperatura do orvalho, radiação global, horas de sol, direcção do vento e pressão barométrica. Estas são as leituras mais frequentes, mas, dependendo da estação meteorológica, existem muitas outras variáveis que são disponibilizadas.

Neste trabalho vão ser consideradas cinco variáveis: temperatura do ar, humidade relativa média, velocidade do vento, sentido do vento e pressão barométrica. Os valores das variáveis que vão ser usados são obtidos de uma estação meteorológica situada na cidade de Santiago, província da Corunha em Espanha, que os disponibiliza na Internet.

Para um enquadramento do trabalho vão ser apresentadas algumas características meteorológicas e algumas relações entre as variáveis consideradas.

A humidade do ar é a quantidade de água que existe no ar no estado gasoso. A quantidade de água que o ar absorve antes de atingir a saturação depende da temperatura e aumenta progressivamente com ela. É de realçar que num deserto por exemplo, a temperatura sobe a valores muito elevados o que torna a superfície do solo quase totalmente seca e o ar, apesar da temperatura elevada, tem um teor de humidade muito baixo.

Dependendo dos teores de vapor de água no ar é que surgiram as classificações como neblina, nuvem, nevoeiro, nublado, orvalho, etc.

A criação de neve verifica-se quando a temperatura baixa a valores inferiores a 0°C condensando a água existente no ar. Este fenómeno, por regra, não se verifica nas zonas do litoral, devido à influência dos oceanos e em zonas onde as temperaturas médias são mais

elevadas, só nas zonas mais interiores e a norte é que existem as condições mais propícias à sua formação.

Outras variáveis meteorológicas como o vento e a pressão também são importantes na previsão meteorológica.

Com a temperatura da luz solar o ar aquecido sobe deixando uma zona de vazio chamada de baixa pressão, o ar frio e denso que tende a descer provém das zonas de maior altitude (montes e montanhas), constituindo zonas de alta pressão. Estas deslocções de ar são designadas por vento.

A formação de ciclones e anticiclones está directamente relacionado com as deslocções bruscas ou suaves de massas de ar.

Um ciclone é uma zona de baixa pressão, onde o ar relativamente quente origina a formação de nuvens e precipitação. Sendo assim, tempo nublado, chuva e vento forte estão normalmente relacionados com zonas de baixas pressões.

Os anticiclones são opostos dos ciclones, ou seja, são grandes centros de altas pressões. O bom tempo, seco e sem nuvens está associado aos anticiclones, provocando tempo quente e seco no Verão e frio com céu limpo no Inverno.

Um outro aspecto é o sentido do vento. Se a terra não tivesse movimento de rotação, como já vimos, o vento deslocar-se-ia das zonas de alta pressão para as de baixa pressão. No entanto, os ventos sofrem um ligeiro desvio devido ao movimento da terra, este desvio é para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul.

Ventos de Oeste são ventos que saem das altas pressões subtropicais e deslocam-se para Norte, em direcção às baixas pressões das regiões temperadas. No geral estes ventos são fortes e frios.

Ventos alísios são fluxos de ar que saem das altas pressões subtropicais e dirigem-se para Norte em direcção às baixas pressões equatoriais. Estes ventos acontecem a Norte e a Sul do equador, criando geralmente condições propícias a chuva.

Ventos de Este são fluxos de vento que saem das altas pressões polares e que se dirigem para Sul no Hemisfério Norte e para Norte no Hemisfério Sul, em geral é vento ameno e um pouco quente.

Ventos de Norte são ventos geralmente frios e com pouca humidade relativa, provocando normalmente fortes correntes marítimas.

A pressão atmosférica normal varia entre 1013 hPa e 1350 hPa. Considera-se pressão atmosférica alta para valores superiores a 1350 hPa e pressões baixas para valores inferiores a 1013 hPa.

De uma maneira geral pode-se dizer que:

- A subida gradual da pressão atmosférica permite anunciar tempo bom e seco.
- A descida dos valores de pressão atmosférica anunciam tempo húmido e chuva.
- No hemisfério Norte se ficarmos de costas contra o sentido de deslocação do vento verifica-se que os centros de baixas pressões se encontram à esquerda.
- Um aumento gradual e contínuo da pressão atmosférica, acompanhado de uma melhoria progressiva do estado do tempo, deixa prever um período de bom tempo relativamente prolongado (formação de nevoeiro no Inverno).
- Se estiver bom tempo e a pressão atmosférica for elevada e o barómetro não oscilar em torno de um valor de pressão, não é de prever nenhum agravamento do estado do tempo.
- A chegada continua de nuvens de tipo cirros<sup>9</sup>, leva ao início de uma queda de pressão atmosférica e eventualmente ao levantamento de brisa. São sinais que anunciam a chegada de uma frente quente, por vezes acompanhada de chuviscos.
- A chegada de nuvens baixas muito grossas na forma de “bolas de algodão” e uma queda acentuada da pressão atmosférica, muitas vezes acompanhada de rajadas de vento, anunciam geralmente aguaceiros com uma certa intensidade, e até mesmo tempestades.

---

<sup>9</sup> Cirros são nuvens que não são formadas por gotículas de água. São formadas quando uma massa de ar quente e húmido sobe repentinamente para grandes altitudes acima do ar frio. O vapor de água não se converte em água, ocorrendo uma sublimação rápida devido a uma brusca descida da temperatura para um valor na ordem dos 40°C negativos criando assim os cirros.

- Tanto no hemisfério Norte como no hemisfério Sul ventos de oeste e a chegada de uma grande faixa de nuvens, bem como uma descida dos valores da pressão atmosférica, anunciam chuva e aguaceiros.
- No hemisfério Norte e no hemisfério Sul ventos de este, com pressão atmosférica elevada ou a subir, anunciam a persistência ou a chegada de bom tempo, sobretudo no Verão.
- Se a chegada de ar frio se conjuga com um aumento excepcionalmente rápido da pressão atmosférica, então a melhoria do estado do tempo será apenas de curta duração.
- Se as nuvens passam a baixa altitude, pode-se dizer que a chuva está eminente.
- Depois de uma chuva noturna, se o céu matinal está limpo deixa frequentemente prever a formação rápida de nuvens grossas na forma de “bolas de algodão”, trazendo por vezes chuvas fortes ou até mesmo tempestades.

# 4. SISTEMA DE PREVISÃO METEOROLÓGICA

O sistema de previsão meteorológica desenvolvido, vai ser apresentado ao longo deste capítulo. Este sistema é constituído por dois sistemas de inferência difusa que são a base de todo o trabalho.

Os dados meteorológicos são adquiridos de uma estação meteorológica situada na cidade de Santiago, na região da Galiza em Espanha. Estes dados são disponibilizados na Internet [<http://www.meteogalicia.es>] em ficheiros no formato “*xml*”. Tirando partido da possibilidade do MATLAB ler este tipo de ficheiros, foi necessário criar um programa que fizesse automaticamente o *download* dos ficheiros “*xml*”, actualizados de acordo com a data que se encontra no computador de trabalho, e cria-se o vector com os valores de entrada das variáveis difusas do sistema de inferência desenvolvido.

A apresentação dos resultados e a interface do utilizador com o sistema é feita através de uma aplicação desenvolvida no ‘*GUIDE*’ do MATLAB [MATLAB, 2006].

## **4.1 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA (*FIS*) DO MATLAB**

Tendo como base os factores apresentados na secção anterior, foi desenvolvido um modelo em lógica difusa, que representa a essência do raciocínio difuso. Este modelo é constituído

por um conjunto de variáveis linguísticas, funções de pertença e por uma base de regras, que após o processo de colapsagem permite a visualização das variáveis de saída do sistema. O método de inferência utilizado foi o Mandani, sendo utilizada a ferramenta *Fuzzy Inference System (FIS)* do MATLAB para modelizar o sistema [MATLAB, 2006] .

O sistema FIS disponibiliza os seguintes módulos:

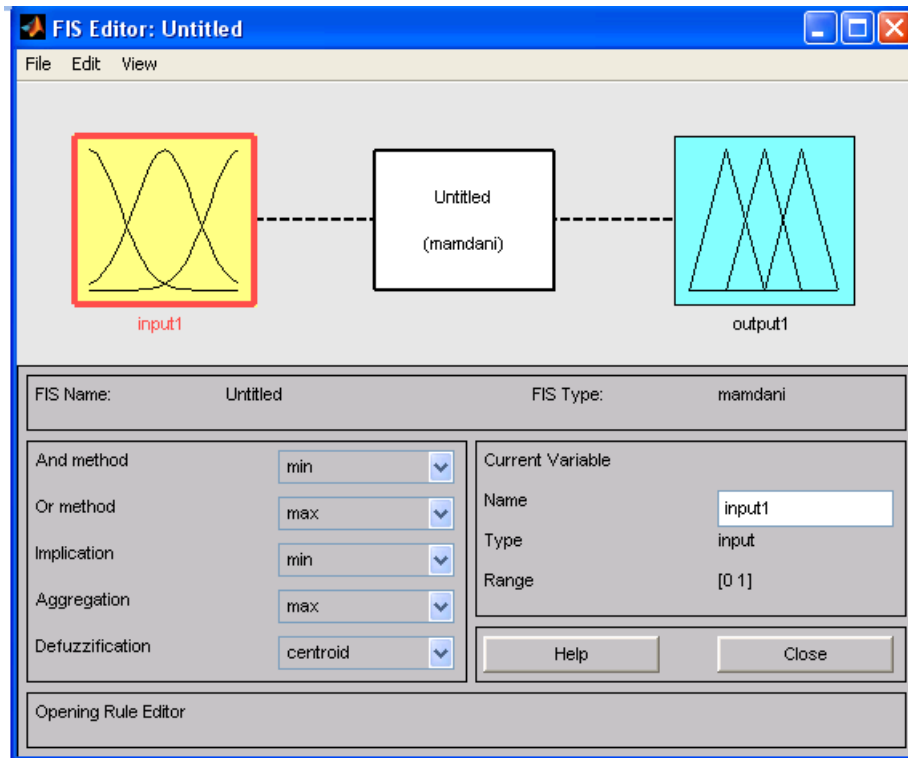
- Editor básico do sistema;
- Editor de funções de pertença;
- Editor de regras.

O editor básico do sistema está representado na Figura 14. Neste editor são definidas as variáveis de entrada e de saída, o método de inferência e o método de colapsagem. É também neste editor atribuído o nome ao sistema difuso que se pretende desenvolver.

O editor de funções de pertença está representado na Figura 15. Neste módulo são definidas as variáveis *FIS* de entrada e de saída e é apresentada para cada variável a sua respectiva função de pertença. É também definida, a gama de valores de cada variável, assim como, o vector com a gama de valores de cada conjunto difuso da função de pertença seleccionada, onde o número de elementos desse vector depende do tipo de função de pertença.

O editor de regras representado na Figura 15, permite criar a base de regras que rege um sistema difuso. Neste módulo, os conjuntos difusos de cada variável de entrada são relacionados através dos operadores lógicos ‘*and*’ e/ou ‘*or*’ que podem ser negados seleccionando a opção ‘*not*’, dando origem à saída que corresponde a um determinado conjunto difuso. Para cada regra definida é possível atribuir o seu grau de validade de acordo com o preenchimento do campo ‘*weight*’ com valores entre 0 e 1, ou seja, desde não válida até totalmente válida. Depois da base de regras estar criada, o utilizador pode alterar ou eliminar uma regra já definida, bem como acrescentar mais regras ao sistema difuso.

É de salientar que as figuras apresentadas são figuras predefinidas do MATLAB e como tal os operadores lógicos, a definição da base de regras, os nomes das variáveis, as opções que os editores disponibilizam estão em língua inglesa, pelo que também se adoptou a definição das variáveis em língua inglesa.



**Figura 14** Editor básico do sistema FIS [MATLAB, 2006].

Para além destes módulos, o software ainda possui uma interface gráfica que será apresentada na subsecção seguinte, que permite a visualização da influência de cada regra no resultado final do sistema de acordo com os valores de entrada de cada variável difusa e ainda uma visualização da superfície correspondente a cada conjunto difuso que sofreu influência da regra definida.

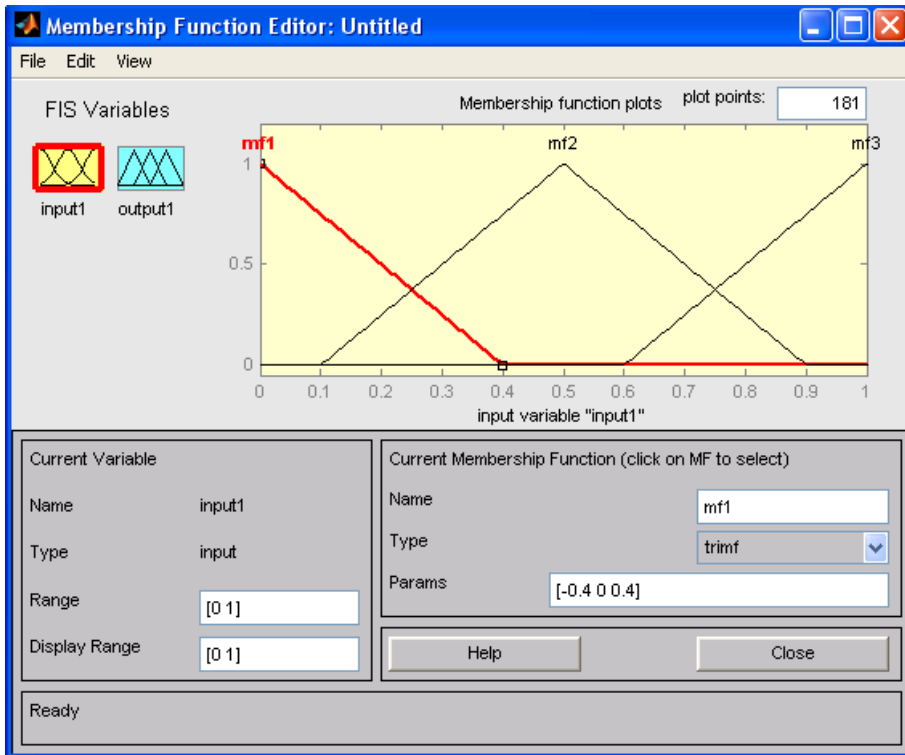


Figura 15 Editor de funções de pertença [MATLAB, 2006].

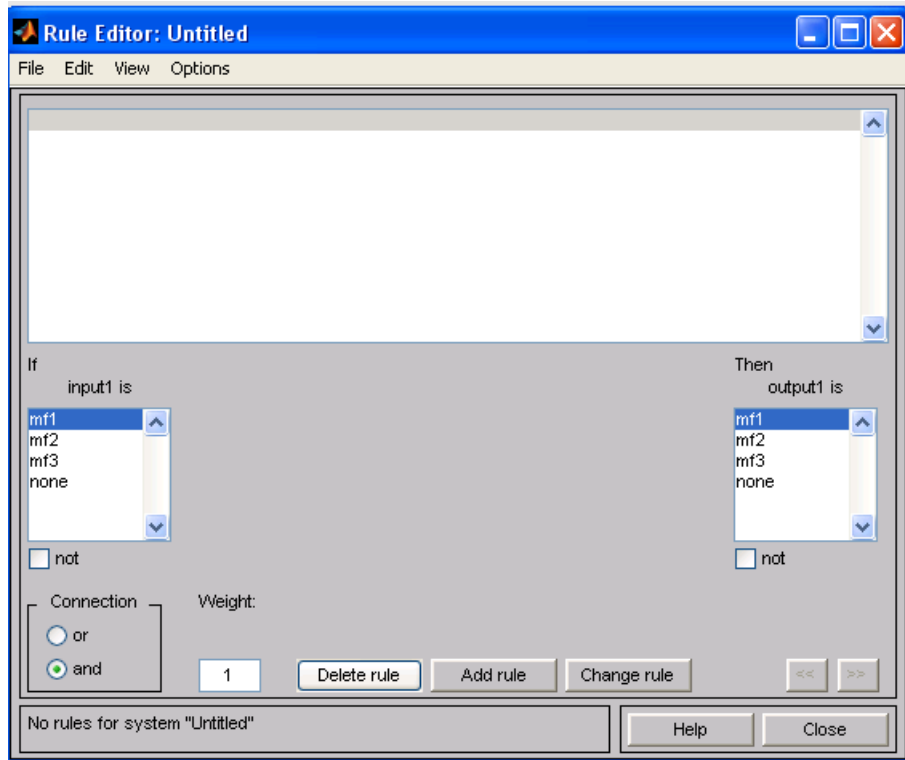


Figura 16 Editor de regras difusas [MATLAB, 2006].

## 4.2 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTENÇA EXISTENTES NO FIS

O sistema *FIS* possui onze funções de pertença que são definidas com os seguintes nomes: *dsigmf*, *psigmf*, *gaussmf*, *gauss2mf*, *gbellmf*, *pimf*, *sigmf*, *smf*, *trapmf*, *trimf*, *zmf*.

A função *dsigmf* é uma função de pertença composta pela diferença entre duas funções de pertença sinusoidais. A função de pertença sinusoidal usada depende de dois parâmetros,  $a$  e  $c$ , e é dada por:

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \quad (1)$$

A função *dsigmf* depende de quatro parâmetros  $a_1, c_1, a_2, c_2$ , e é definida pela diferença entre as duas funções de pertença sinusoidais  $f_1(x, a_1, c_1) - f_2(x, a_2, c_2)$ . A sintaxe desta função é definida por:

$$y = dsigmf(x, [a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2]) \quad (2)$$

tendo também com parâmetros os valores do vector  $x$ .

Exemplo utilizando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;  
y=dsigmf(x,[5 2 5 7]); onde a1=5, c1=2, a2=5, c2=7,  
plot(x,y)  
xlabel('dsigmf, para os parâmetros [5 2 5 7]')
```

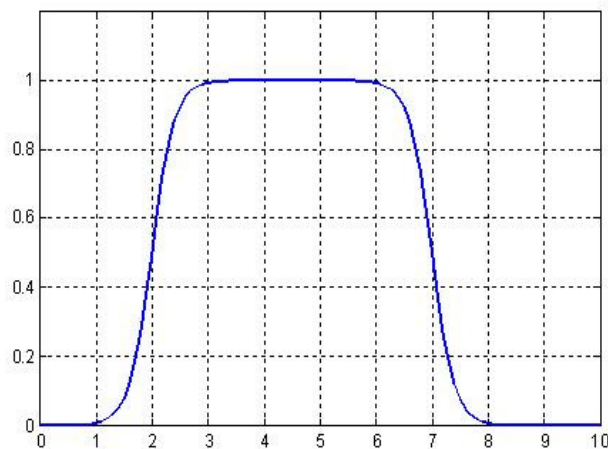


Figura 17 Representação gráfica da função *dsigmf*.

A função *psigmf* é uma função de pertinência composta pelo produto de duas sinusóides. A sua sintaxe é dada por:

$$y = \text{psigmf}(x, [a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2]) \quad (3)$$

A curva sinusoidal é representada em função dos valores do vector  $x$  e depende de dois parâmetros  $a$  e  $c$  e é dada pela expressão:

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \quad (4)$$

onde *psigmf* é apenas o produto de duas curvas dado por  $f_1(x, a_1, c_1) * f_2(x, a_2, c_2)$  com os parâmetros no vector ordenados segundo esta ordem  $[a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2]$ .

Exemplo usando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;
y=psigmf(x,[2 3 -5 8]);
plot(x,y)
xlabel('psigmf, para os parâmetros [2 3 -5 8]')
```

A função *gaussmf* é designada de função de pertinência gaussiana. Esta função é descrita por uma função gaussiana que depende de dois parâmetros  $\sigma$  e  $c$  e é descrita por:

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

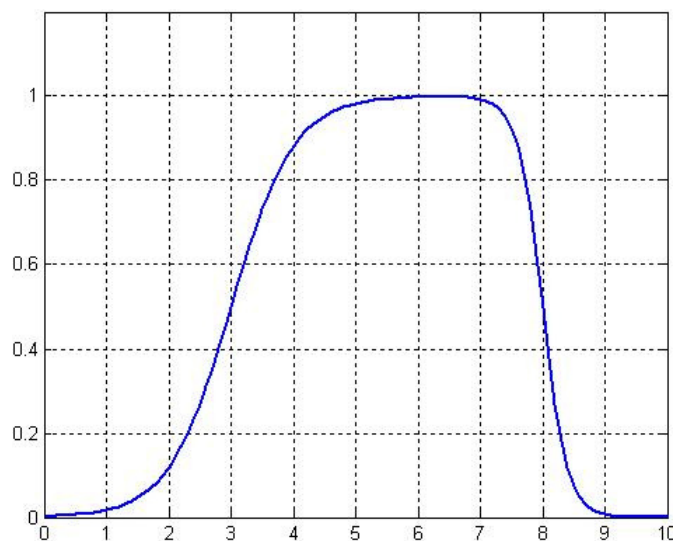


Figura 18 Representação gráfica da função *psigmf*.

Os parâmetros para a função gaussiana representados por  $\sigma$  (*sig*) e  $c$ , são listados no vector [*sig c*] para a função de pertinência gaussiana e a sua sintaxe é definida como sendo

$$y = \text{gaussmf}(x, [\text{sig } c]) \quad (6)$$

tendo também como parâmetro os valores do vector  $x$ .

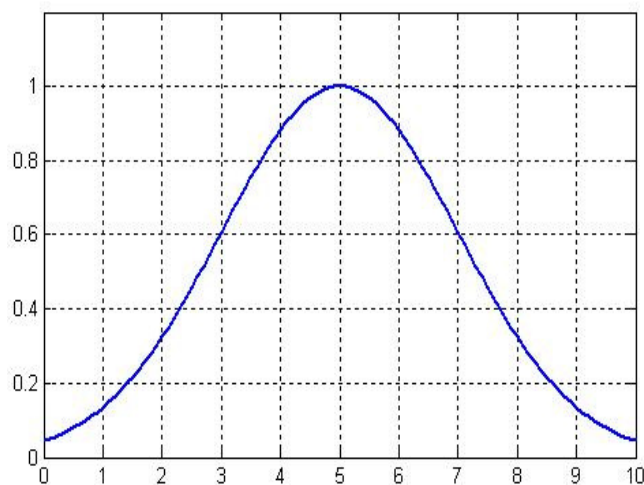
Exemplo utilizando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;  
y=gaussmf(x,[2 5]);  
plot(x,y)  
xlabel('gaussmf, para os parâmetros [2 5]')
```

A função de pertinência *gauss2mf* é designada de função de pertinência de combinação Gaussiana. É uma função que depende de dois parâmetros *sig* ( $\sigma$ ) e  $c$  e é descrita pela função:

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

A combinação de duas funções Gaussianas, definem a função de pertinência de combinação Gaussiana. A primeira função é descrita pelos parâmetros  $sig_1$  e  $c_1$  e determina a forma da parte esquerda da curva. A segunda é especificada pelos parâmetros  $sig_2$  e  $c_2$  e determina a parte direita da curva. No caso de  $c_1 < c_2$ , a função *gauss2mf* alcança o valor máximo de 1, caso contrário o máximo é inferior a 1 e os parâmetros são apresentados pela ordem [ $sig_1, c_1, sig_2, c_2$ ].



**Figura 19** Representação gráfica da função *gaussmf*.

A sintaxe desta função é definida por:

$$y = \text{gauss2mf}(x, [\text{sig}_1 \ c_1 \ \text{sig}_2 \ c_1]) \quad (8)$$

tendo também como parâmetro os valores do vector  $x$ .

Exemplo utilizando o MATLAB:

```
x = (0:0.1:10)';  
y1 = gauss2mf(x, [2 4 1 8]);  
y2 = gauss2mf(x, [2 5 1 7]);  
y3 = gauss2mf(x, [2 6 1 6]);  
y4 = gauss2mf(x, [2 7 1 5]);  
y5 = gauss2mf(x, [2 8 1 4]);  
plot(x, [y1 y2 y3 y4 y5]);
```

A função designada de função em forma de sino normalizada é descrita pela função:

$$f(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (9)$$

Nesta função o parâmetro  $b$  é normalmente positivo, o parâmetro  $c$  localiza-se no centro da curva. O vector de parâmetros ( $params$ ) é dado por  $[a \ b \ c]$  e é o segundo parâmetro da função de pertença  $gbellmf$  que tem como sintaxe:

$$y = \text{gbellmf}(x, params) \quad (10)$$

tendo também o vector  $x$  como parâmetro.

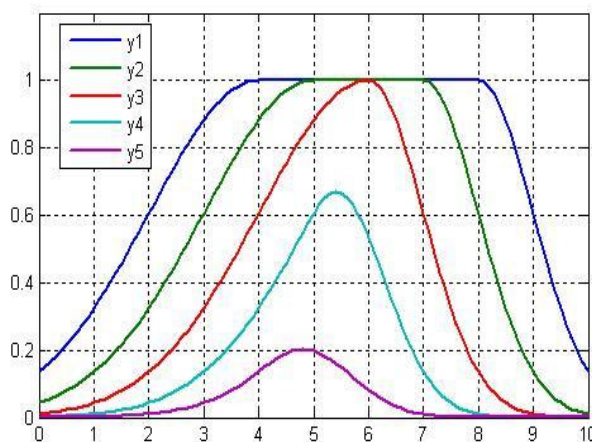


Figura 20 Representação gráfica da função  $\text{gauss2mf}$ .

Exemplo utilizando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;  
y=gbellmf(x,[2 4 6]);  
plot(x,y)  
xlabel('gbellmf, para os parâmetros [2 4 6]')
```

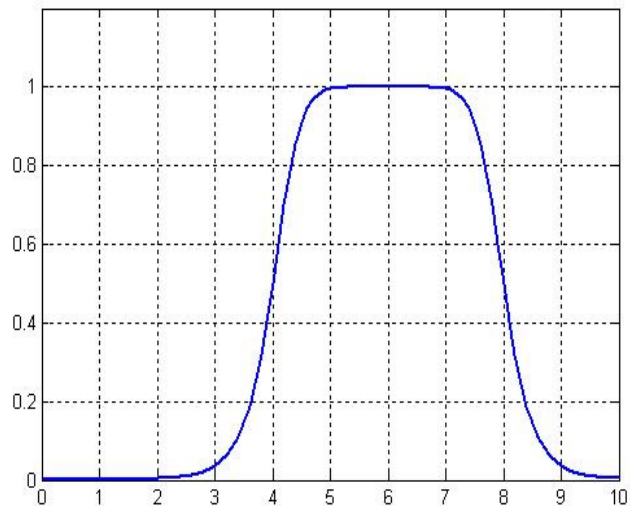
Quanto à função *pimf* designada de função de pertinência *pi*, a sua sintaxe é dada por:

$$y = pimf(x, [a b c d]) \quad (11)$$

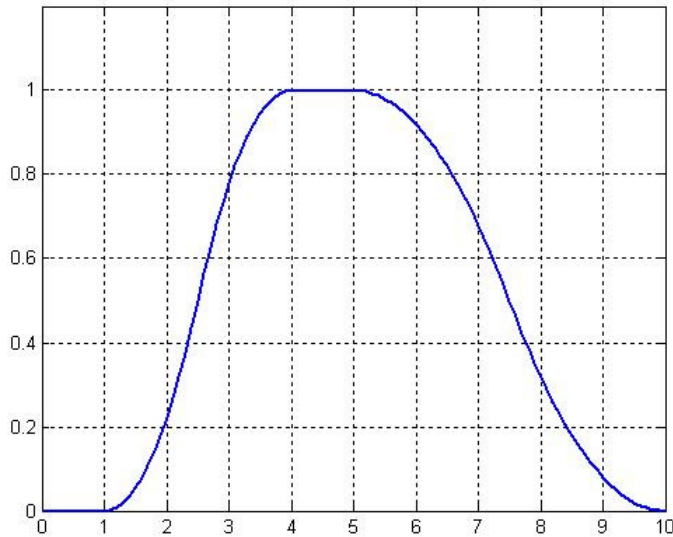
onde a sua forma é comparada com a forma de um  $\Pi$ . Esta função é descrita em função dos valores do vector  $x$ . Os parâmetros  $a$  e  $d$  definem os pontos de quebra inferiores da curva, enquanto  $b$  e  $c$  definem os pontos de quebra superiores da curva, como se pode ver no exemplo.

Exemplo utilizando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;  
y=pimf(x,[1 4 5 10]);  
plot(x,y)  
xlabel('pimf, para os parâmetros [1 4 5 10]')
```



**Figura 21** Representação gráfica da função *gbellmf*.



**Figura 22** Representação gráfica da função *pimf*.

A função *sigmf* é designada de função de pertinência sigmóidal, devido à sua representação gráfica ser na forma de um S. Tem a sua sintaxe dada por:

$$y = \text{sigmf}(x, [a \ c]) \quad (12)$$

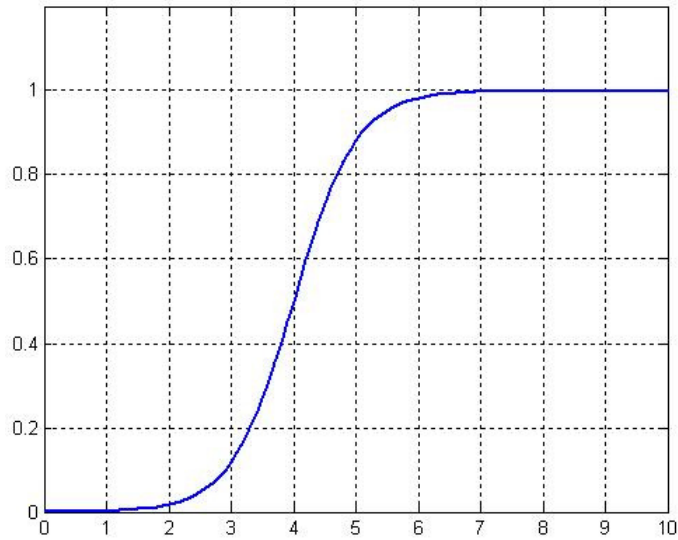
A função sigmóidal é dada pela função  $f_1(x, a, c)$  mapeada no vector  $x$ , e varia com os parâmetros  $a$  e  $c$ .

$$f_1(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (13)$$

Dependendo do sinal do parâmetro  $a$ , a função de pertinência sigmóidal é aberta à direita ou à esquerda, e assim é apropriada para representar conceitos com gama de valores muito extensa ou muito negativos. Uma visualização mais convencional desta função de pertinência pode ser na construção de funções de pertinência através do produto ou da diferença de duas funções sinusoidais, como se pode ver pela análise das funções *dsigmf* e *psigmf* já descritas anteriormente.

Exemplo usando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;
y=sigmf(x,[2 4]);
plot(x,y)
xlabel('sigmf, para os parâmetros [2 4]')
```



**Figura 23** Representação gráfica da função *sigmf*.

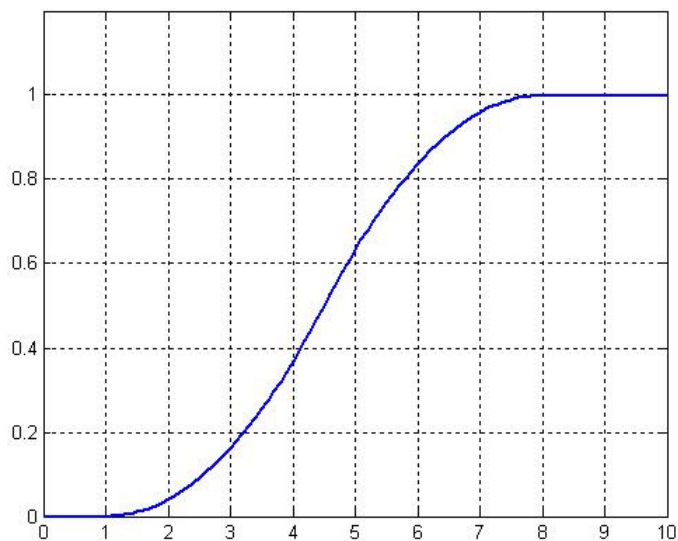
A função de pertinência *smf* é designada de função em forma de S e a sua sintaxe é dada por:

$$y = smf(x, [a b]) \quad (14)$$

Esta função depende dos parâmetros *a* e *b*, que definem os extremos da função, sendo a inclinação da curva dada pela própria função.

Exemplo do MATLAB:

```
x=0:0.1:10;
y=smf(x,[1 8]);
plot(x,y)
xlabel('smf, para os parâmetros [1 8]')
```



**Figura 24** Representação gráfica da função *smf*.

A função *trapmf* é designada por função de pertinência trapezoidal e a sua sintaxe é dada por:

$$y = \text{trapmf}(x, [a \ b \ c \ d]) \quad (15)$$

A curva trapezoidal é descrita em função do vector  $x$  e depende de quatro parâmetros escalares  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  dada por:

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (16)$$

De uma forma mais compacta a função é definida como:

$$f(x, a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (17)$$

Os parâmetros  $a$  e  $d$  das duas funções definem os pontos de quebra inferiores do trapézio e os parâmetros  $b$  e  $c$  definem os pontos de quebra superiores do mesmo.

Exemplo usando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;
y=trapmf(x,[1 5 7 8]);
plot(x,y)
xlabel('trapmf, para os parâmetros [1 5 7 8]')
```



Figura 25 Representação gráfica da função *trapmf*.

A função *trimf* que é designada de função de pertença triangular, a qual apresenta a seguinte sintaxe:

$$y = \text{trimf}(x, [a \ b \ c]) \quad (18)$$

A curva triangular é descrita em função do vector  $x$  e depende de três parâmetros escalares  $a$ ,  $b$  e  $c$  inseridos na função:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (19)$$

De um modo mais compactado, a função é definida por:

$$f(x, a, b, c) = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \quad (20)$$

Os parâmetros  $a$  e  $c$  são os pontos de quebra inferiores do triângulo, enquanto que o vértice superior é definido por  $b$ .

Exemplo usando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;
y=trimf(x,[3 6 8]);
plot(x,y)
xlabel('trimf, para os parâmetros [3 6 8]')
```

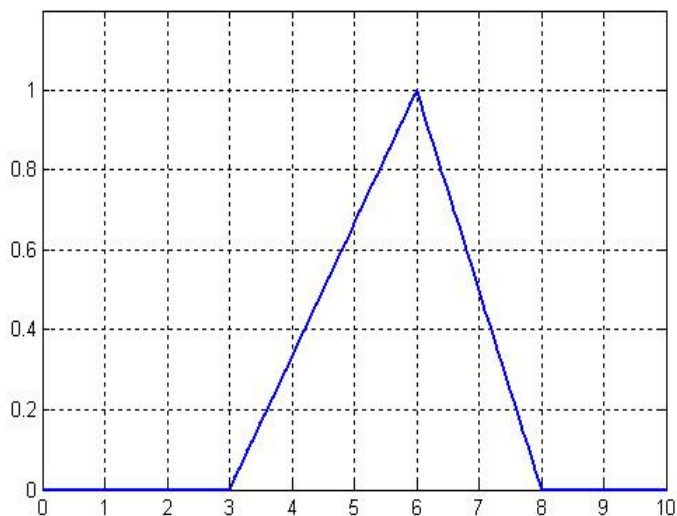


Figura 26 Representação gráfica da função *trimf*.

Por fim, a função *zmf* designada por função de pertença Z, devido à sua representação gráfica se assemelhar a um Z, tem a sua sintaxe definida como:

$$y = zmf(x, [a \ b]) \quad (21)$$

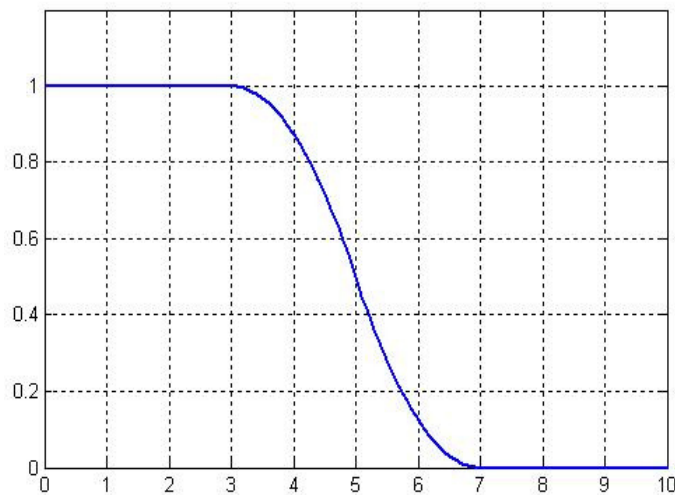
Esta função é descrita em função dos valores do vector *x* e depende dos parâmetros *a* e *b*, que definem respectivamente os extremos e a inclinação da curva.

A função é descrita por:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left( b - \frac{x}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (22)$$

Exemplo usando o MATLAB:

```
x=0:0.1:10;
y=zmf(x,[3 7]);
plot(x,y)
xlabel('zmf, P=[3 7]')
```



**Figura 27** Representação gráfica da função *zmf*.

### 4.3 SISTEMAS DE INFERÊNCIA DIFUSA DESENVOLVIDOS

Os sistemas de inferência difusa desenvolvidos foram criados nos editores apresentados na subsecção anterior. O primeiro sistema é constituído por cinco variáveis difusas de entrada, uma base de regras e três variáveis difusas de saída. O nome atribuído ao sistema de inferência foi ‘*tempo*’ e o método utilizado foi o de Mandani. Um segundo sistema desenvolvido permite fazer alguns ajustes às variáveis de saída do primeiro sistema pelo que tem como entradas as três variáveis de saída do primeiro sistema difuso, uma base de regras e três variáveis difusas de saída. O nome atribuído a este segundo sistema de inferência foi “*tempo2*”, tendo também sido aqui utilizado o método de Mandani.

#### 4.3.1 SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA “*TEMPO*”

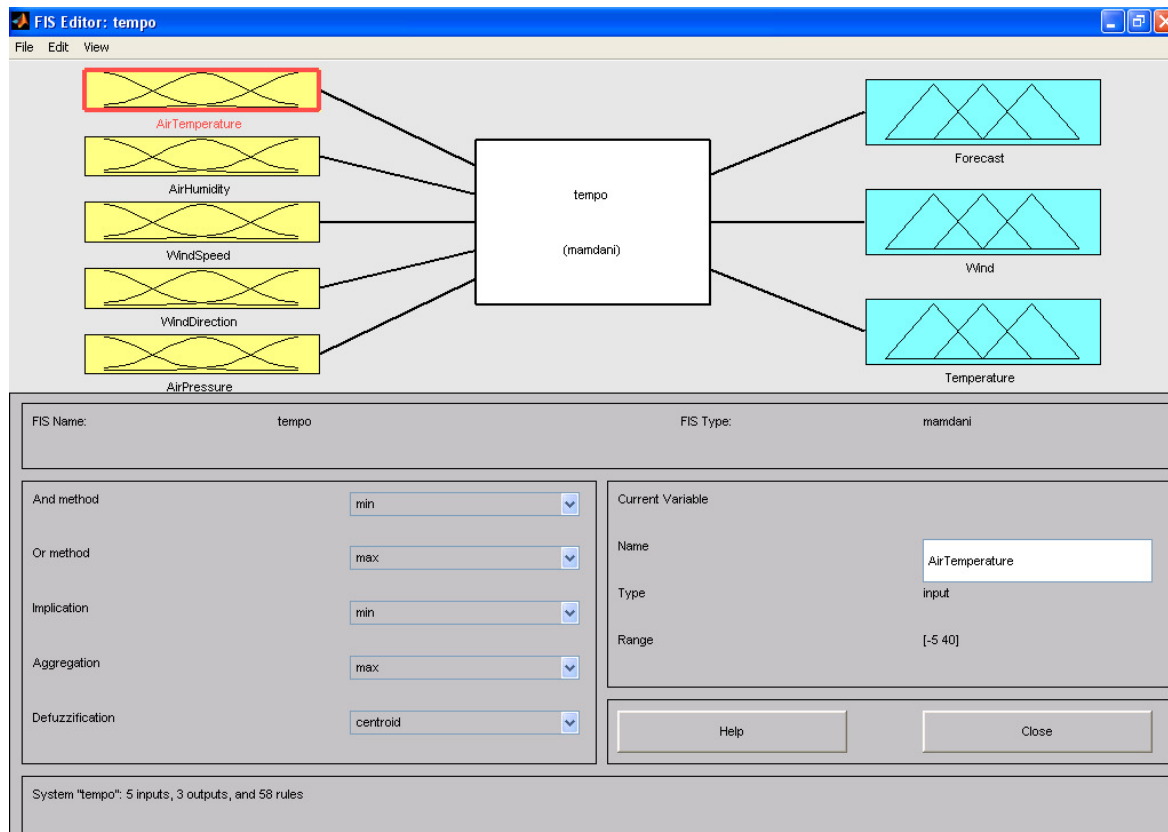
A Figura 28 mostra o editor *FIS* desenvolvido para o primeiro sistema difuso criado com o nome “*tempo*”, onde se pode ver os nomes das variáveis de entrada/saída e o tipo de função de pertença utilizado por cada variável, assim como, os métodos de inferência utilizados e o número de regras que o sistema possui.

As variáveis difusas de entrada são: temperatura média do ar (*AirTemperature*), humidade média relativa do ar (*AirHumidity*), velocidade do vento (*WindSpeed*), direcção do vento (*WindDirection*) e a pressão barométrica (*AirPressure*), as variáveis de saída são: a previsão (*Forecast*), velocidade do vento (*Wind*) e a temperatura (*Temperature*).

Dependendo da variável seleccionada é apresentado também, o tipo de variável e a gama de valores definidos para ela.

Existe ainda a possibilidade de alterar as opções de cinco das funcionalidades básicas de um processo de inferência difusa; são elas:

- *And method*: permite escolher uma das opções *min* (mínimo), *prod* (produto) ou *custom* para uma opção personalizada.
- *Or method*: permite escolher uma opção entre *max* (máximo), *probor* (probabilístico ou), ou *custom* para opção personalizada.
- *Implication*: permite a escolha de uma das opções, entre *min* (mínimo), *prod* (produto) e *custom* para um opção personalizada. Estas opções não são válidas para sistemas de inferência de Sugeno.

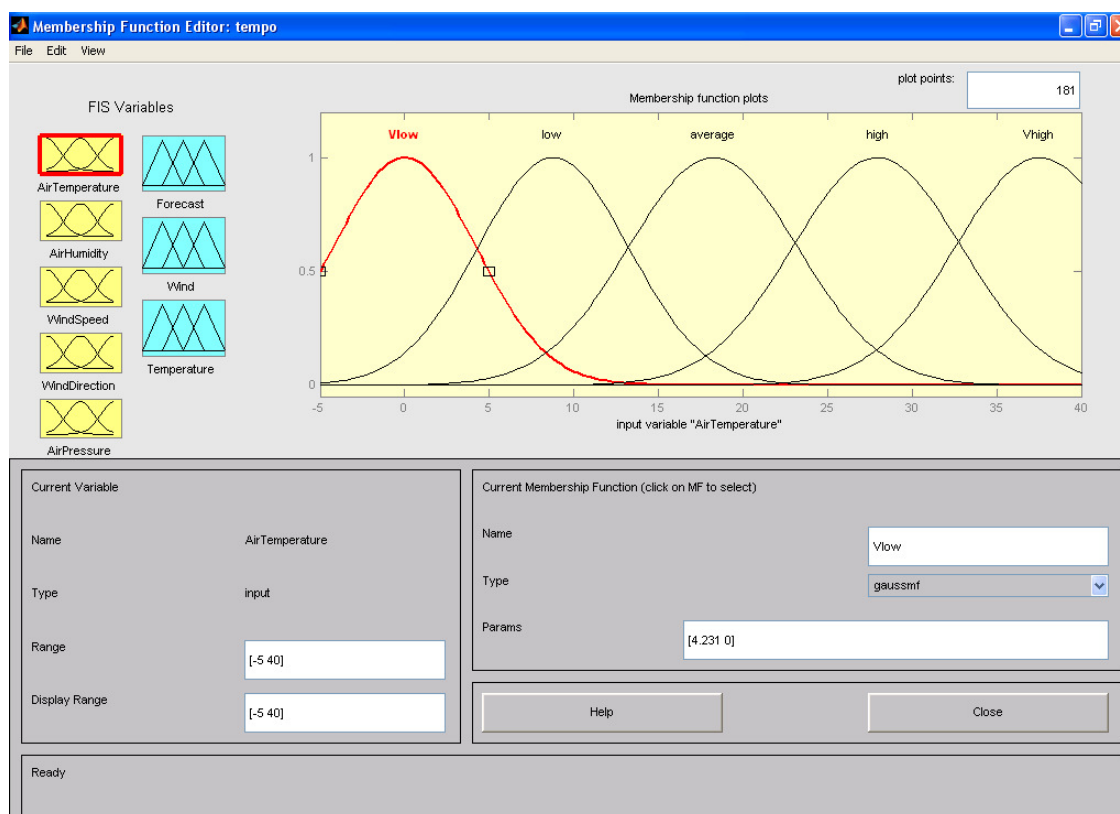


**Figura 28 Sistema FIS tempo criado.**

- *Aggregation*: permite escolher umas das opções *max* (máximo), *sum* (soma), *probor* (probabilístico ou), ou *custom* para opção personalizada. Estas opções não são válidas para sistemas de inferência Sugeno.
- *Defuzzification*: para a inferência difusa de Mamdani, existem as seguintes opções, *centroid* (centro das áreas), *bisector* (bissector), *mom* (media dos máximos), *som* (menor dos máximos), *lom* (maior dos máximos), ou *custom* para opção personalizada. Para inferência difusa de Sugeno escolhe-se uma de entre as opções *wtaver* (média dos máximos) ou *wtsom* (soma dos máximos).

As opções escolhidas são as que se encontram na Figura 28, pois foi com estas opções que se obtiveram os melhores resultados, quando comparados com os esperados.

Na Figura 29 apresenta-se o editor de funções de pertinência, onde se pode visualizar as variáveis de entrada e de saída com as respectivas funções de pertinência, assim como os conjuntos difusos definidos para cada variável. Foi definido para cada variável de entrada uma função de pertinência *gaussiana* (*gaussmf*) e para cada variável de saída uma função

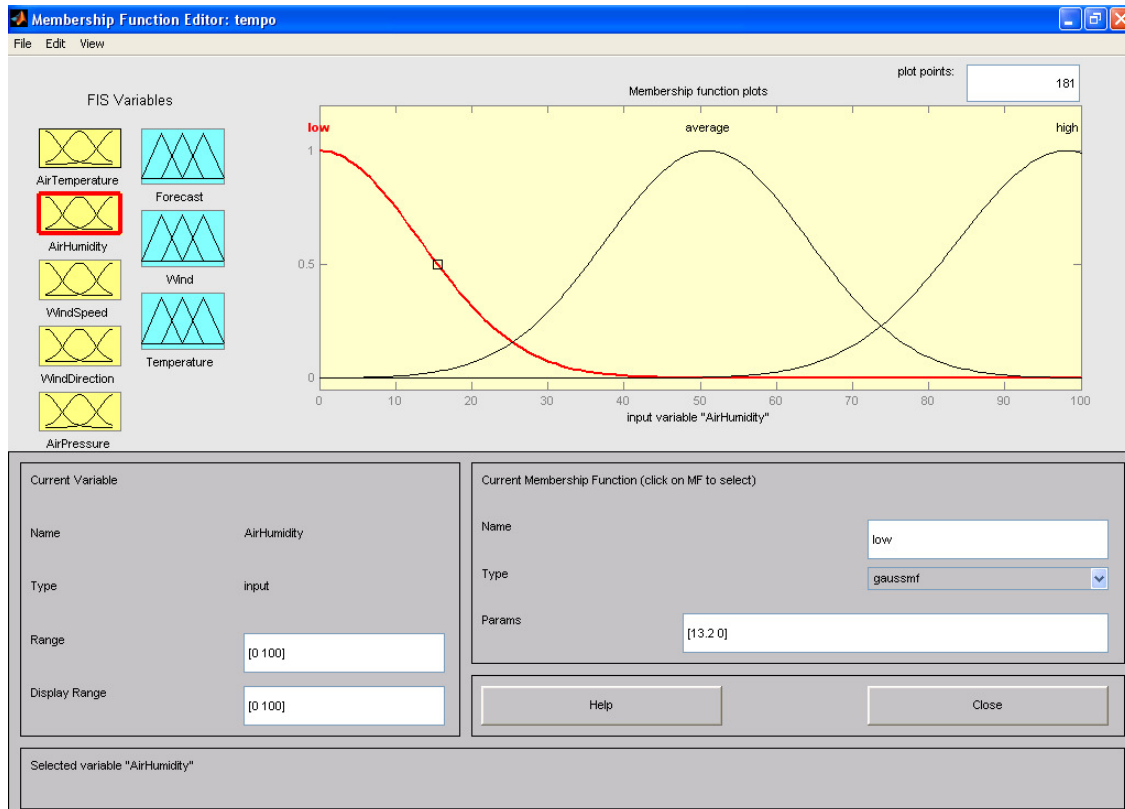


**Figura 29** Função de pertença da variável difusa de entrada *AirTemperature*.

*triangular (trimf)*, estas funções já foram descritas no ponto anterior (4.1.1). Na mesma figura (Figura 29), a variável que se encontra seleccionada é a *AirTemperature* que corresponde à temperatura do ar, onde se pode verificar que tem cinco conjuntos difusos: *Vlow*, *low*, *average*, *high* e *Vhigh*, uma gama de valores dada pelo intervalo de  $[-5, 45]$  °C e a faixa de valores que cada conjunto difuso da variável temperatura agrega. Estas opções, assim como as respectivas funções de pertença podem ser alteradas de acordo com o que se pretende implementar, através das opções existentes (Figura 29).

A humidade média relativa em percentagem (%) é apresentada com o nome de *AirHumidity* sendo a sua representação feita de acordo com as opções tomadas e que estão representadas na Figura 30. Esta variável está definida, através dos conjuntos difusos *low*, *average* e *high*, com picos máximos de cada conjunto nos valores 0%, 50%, 100%, respectivamente.

Na Figura 31 está representada a velocidade do vento através da variável difusa *WindSpeed* sendo apresentada em metros por segundo (*m/s*), com uma gama de valores entre  $[0, 35]$  *m/s*. Esta variável está definida com os conjuntos difusos *low*, *average*, *high*



**Figura 30** Função de pertença da variável difusa de entrada *AirHumidity*.

e *Vhight* (*very high*), com picos máximos de cada conjunto nos valores 0 *m/s*, 17.5 *m/s* e 35 *m/s*, respectivamente.

A direcção do vento apresentada na Figura 32 com o nome da variável difusa *WindDirection*, é representada em graus ( $^{\circ}$ ), com uma gama de valores entre  $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$ . É definida de acordo com a rosa-dos-ventos como sendo *Norte*, *Este*, *Sul* e *Oeste*, com picos máximos de cada conjunto difuso nos valores  $0^{\circ}/360^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ,  $270^{\circ}$ , respectivamente.

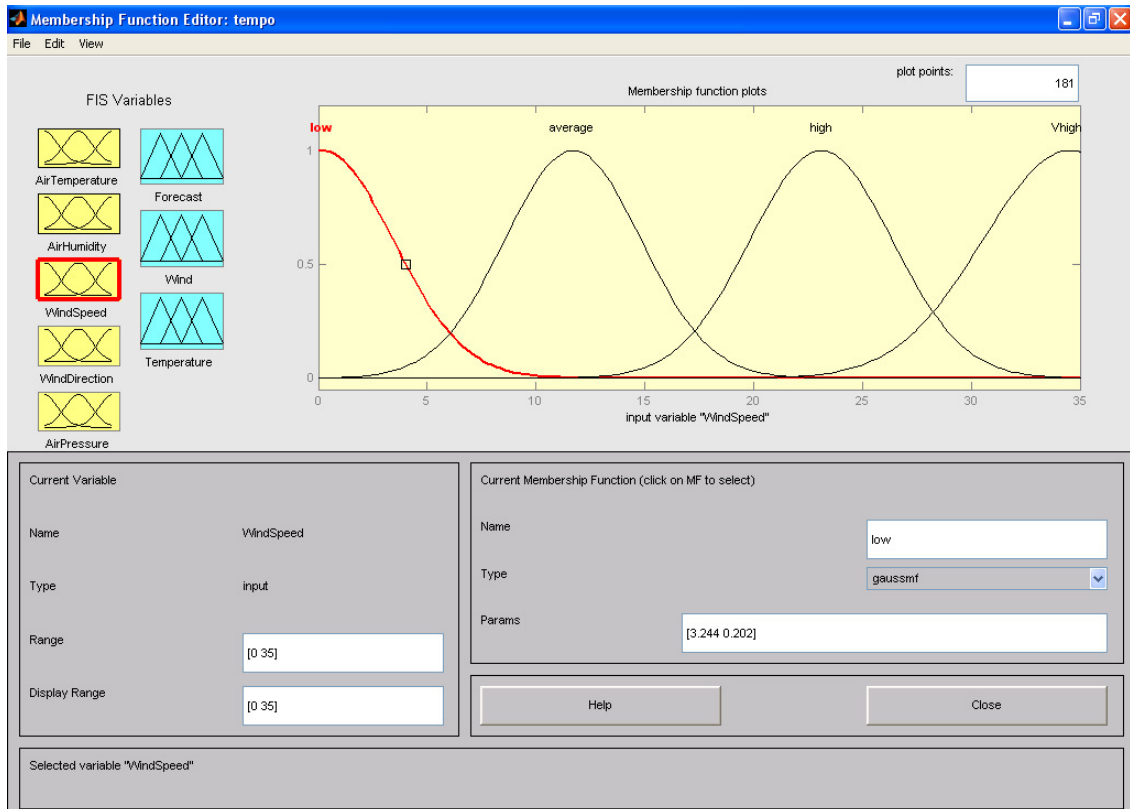


Figura 31 Função de pertença da variável difusa de entrada *WindSpeed*.

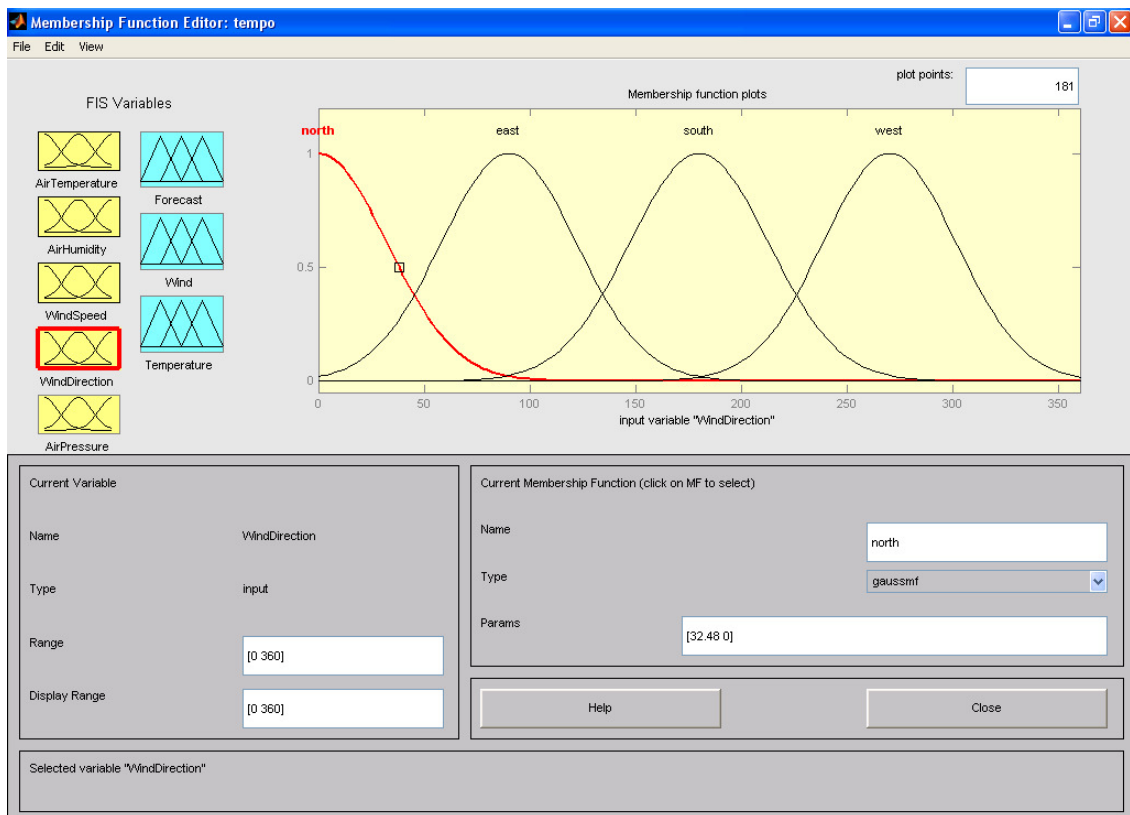
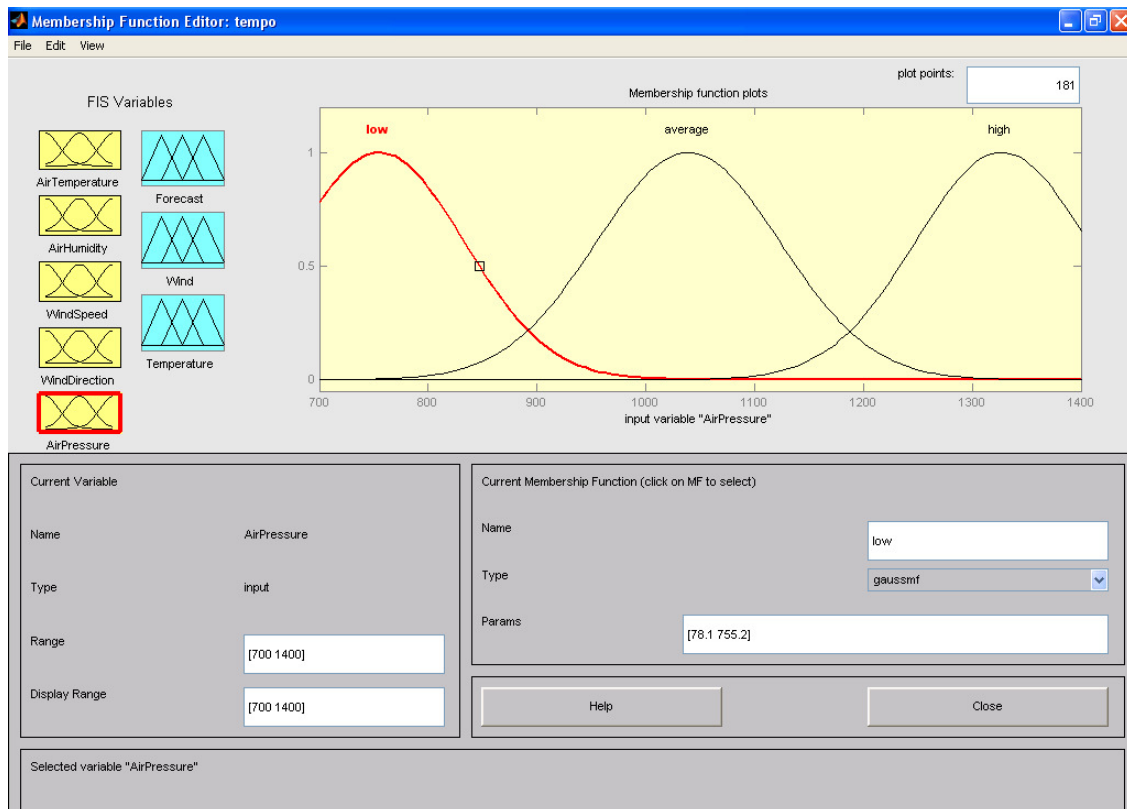


Figura 32 Função de pertença da variável difusa de entrada *WindDirection*.

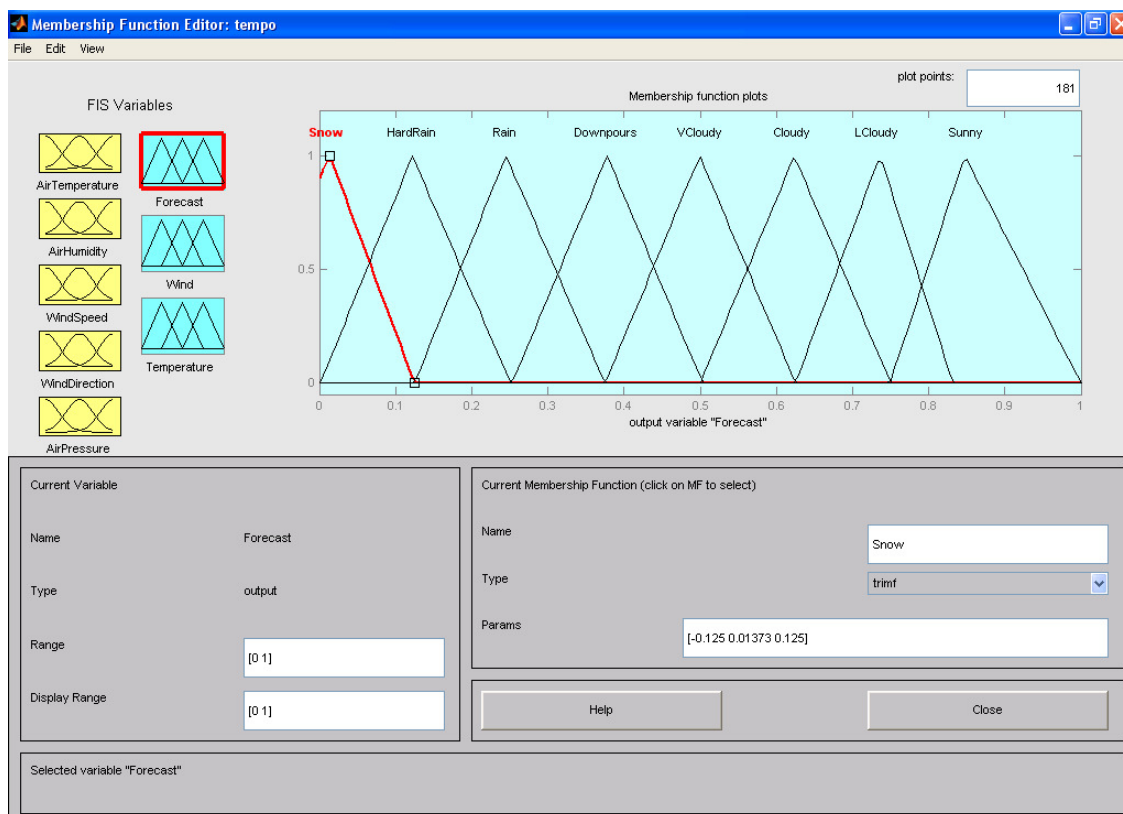
Quanto à pressão barométrica é definida em hectopascal (*hPa*) em que 1 *hPa* equivale a 100 *Pa*, através da variável difusa *AirPressure* com uma gama de valores entre [700, 1400] *hPa*. Esta variável está definida pelos conjuntos difusos *low*, *average* e *high*, com picos máximos de cada conjunto nos valores 700 *hPa*, 1100 *hPa*, 1400 *hPa*, respectivamente (Figura 33).

As variáveis difusas de saída são: a previsão meteorológica (*Forecast*), velocidade do vento (*Wind*) e a temperatura (*Temperature*). Estas variáveis foram definidas com funções de pertença triangulares.

A Figura 34 representa as definições para a variável *Forecast*, ou seja, a previsão meteorológica, e é apresentada com uma gama de valores entre [0, 1]. Esta variável difusa é definida pelos conjuntos difusos *Snow*, *HardRain*, *Rain*, *Downpours*, *VCloudy* (*very cloudy*), *Cloudy*, *LCloudy* (*little cloudy*), *Sunny*.



**Figura 33** Função de pertença da variável difusa de entrada *AirPressure*.



**Figura 34** Função de pertença da variável difusa de saída *Forecast*.

O vento é apresentado na Figura 35 através da variável difusa *Wind*. Esta variável é definida através da sua velocidade em *m/s* com uma gama de valores entre  $[0, 35]$  *m/s*, e está dividida nos seguintes conjuntos difusos *VWeak* (*very weak*), *Weak*, *Suave*, *Strong* e *VStrong* (*very strong*).

A temperatura de saída, apresentada na Figura 36, é definida pela variável difusa *Temperature* em graus célsius ( $^{\circ}C$ ), com uma gama de valores entre  $[-5, 45]$   $^{\circ}C$  e está dividida nos conjuntos difusos: *VCold* (*very cold*), *Cold*, *Suave*, *Hot* e *VHot* (*very hot*).

Relativamente à base de regras, a sua definição e configuração são feitas através do editor de regras difuso apresentado na Figura 37<sup>10</sup>. Neste editor pode-se visualizar as regras já definidas bem como o grau de validade aplicado a cada uma delas. Para definir uma regra, é apresentado para cada variável difusa os conjuntos difusos que a constituem e de acordo

<sup>10</sup> O editor de base de regras apresentado na Figura 37 não apresenta todas as variáveis e regras do sistema, devido ao facto de não ser possível visualizar o menu completo no ecrã. Sendo assim, são apresentadas só algumas das regras e variáveis difusas do sistema que permitam entender o funcionamento deste editor.

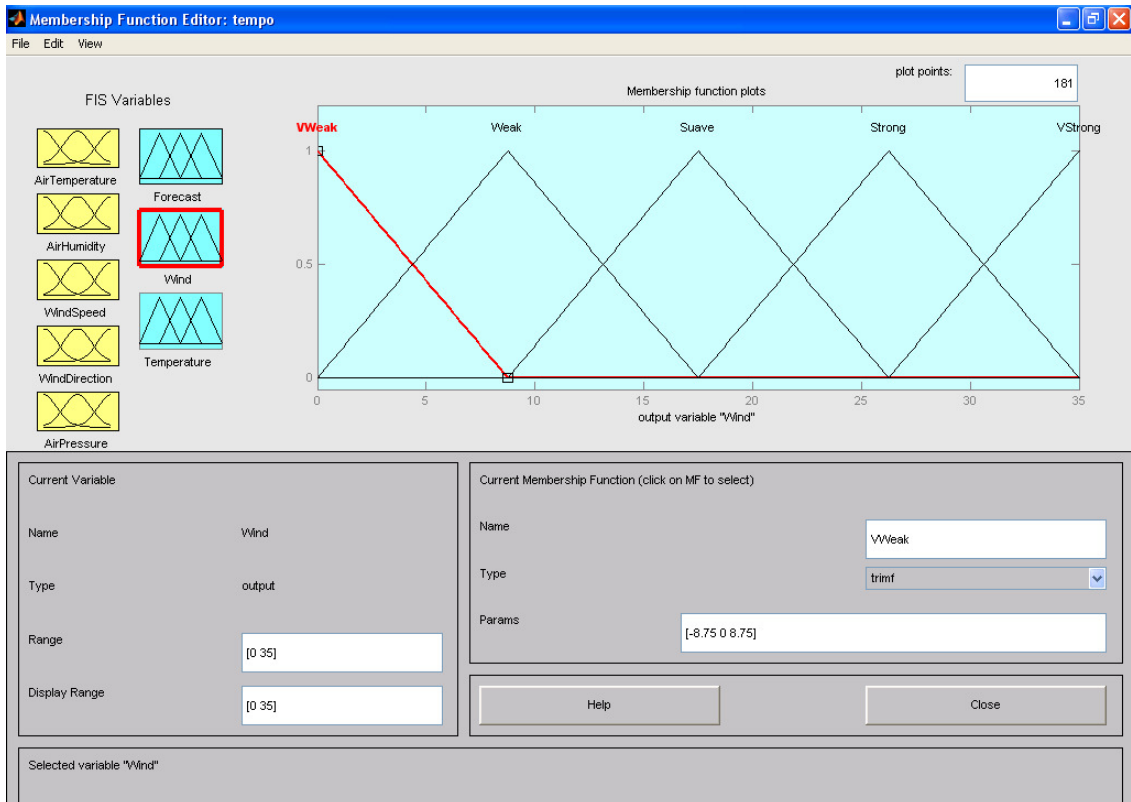


Figura 35 Função de pertença da variável difusa de saída *Wind*.

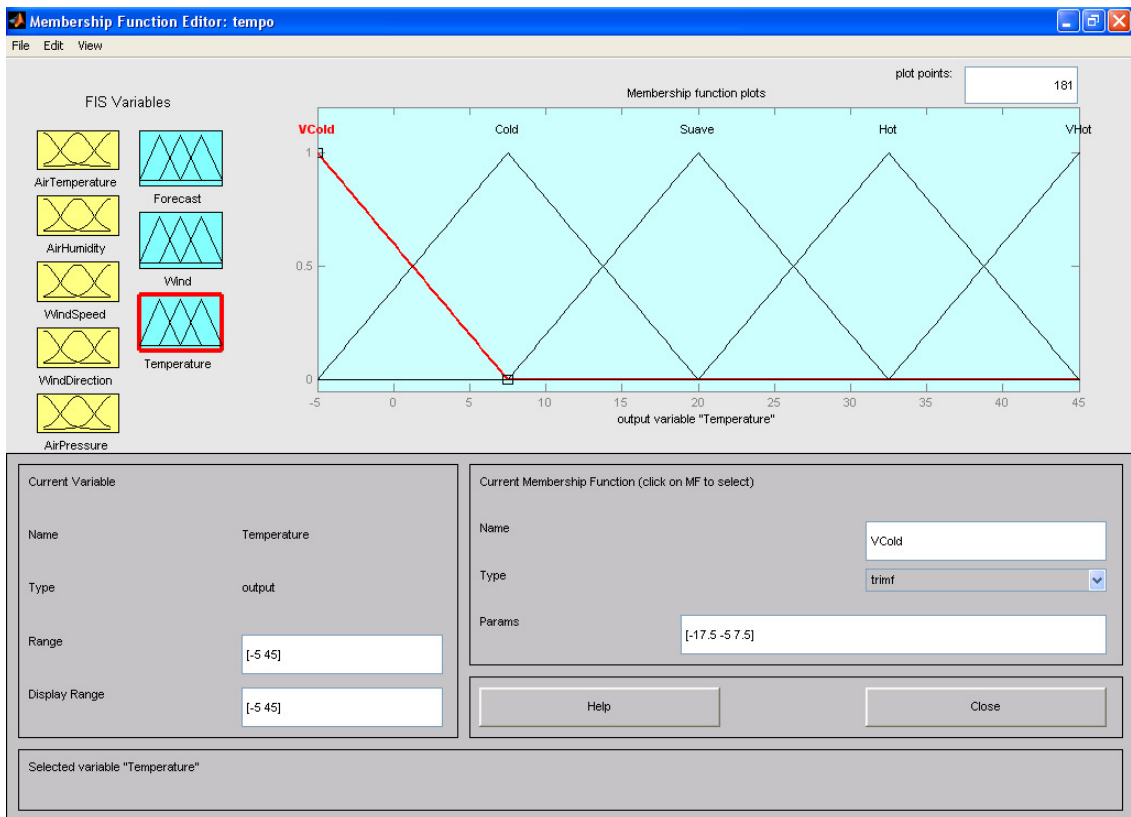


Figura 36 Função de pertença da variável difusa de saída *Temperature*.

com a selecção dos conjuntos difusos que se querem inserir na regra e em conformidade com a sintaxe *if(...) and/or (...) and/or (...) ... then (...) and/or (...) ...* são criadas as regras. Este sistema difuso é constituído por 58 regras sendo algumas delas apresentadas a seguir:

1. *If (AirTemperature is low) and (AirHumidity is high) and (WindSpeed is average) and (WindDirection is north) and (AirPressure is low) then (Forecast is Snow)(Wind is Weak)(Temperature is VCold) (1) ;*
2. *If (AirTemperature is high) and (AirHumidity is low) and (WindSpeed is average) and (WindDirection is north) and (AirPressure is high) then (Forecast is Sunny)(Temperature is VHot) (1);*
3. *If (AirTemperature is average) and (AirHumidity is average) and (AirPressure is average) then (Forecast is Sunny)(Temperature is Suave) (0.8);*
4. *If (AirHumidity is low) and (AirPressure is average) then (Forecast is LCloudy) (0.6);*
5. *If (AirHumidity is average) and (AirPressure is average) then (Forecast is LCloudy) (1).*

No editor apresentado pode-se acrescentar, eliminar e alterar uma regra que já esteja definida, sendo apenas necessário selecciona-la e fazer as alterações pretendidas.

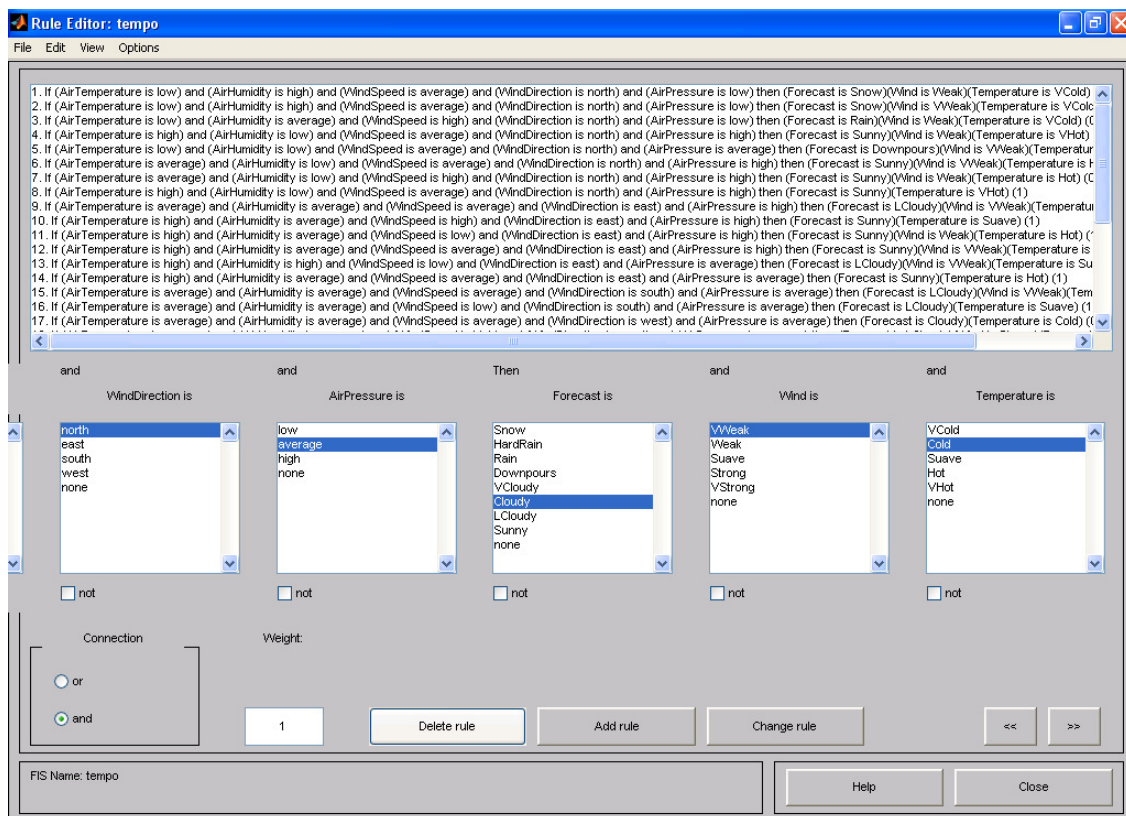


Figura 37 Editor de regras do sistema difuso criado.

Neste seguimento, pode-se ainda visualizar o resultado do sistema e a influência de cada regra no referido resultado, através do editor de visualização de regras apresentado na Figura 38.

Para um determinado vector de entrada, cada um dos seus valores corresponde a uma variável segundo a ordem apresentada na Figura 38. Cada vector irá originar uma saída. Por exemplo, para o vector [17.5 50 17.5 180 1050], cada valor corresponde a uma das variáveis, segundo a mesma ordem apresentada no editor. Alterando manualmente o valor de cada variável de entrada é possível visualizar a influência dessa mesma alteração nas variáveis de saída. É neste editor que se tem uma visualização de todo o sistema difuso criado, assim como, a resposta deste às variações dos valores de entrada.

### 4.3.2 SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA “TEMPO2”

O sistema difuso *tempo2* permite o melhoramento dos resultados obtidos com o primeiro sistema (*tempo*). Com tal, este sistema apresenta três variáveis de entrada difusas, uma base de regras e três variáveis difusas de saída. As variáveis difusas de entrada deste sistema são as variáveis difusas de saída do sistema descrito anteriormente, permitindo

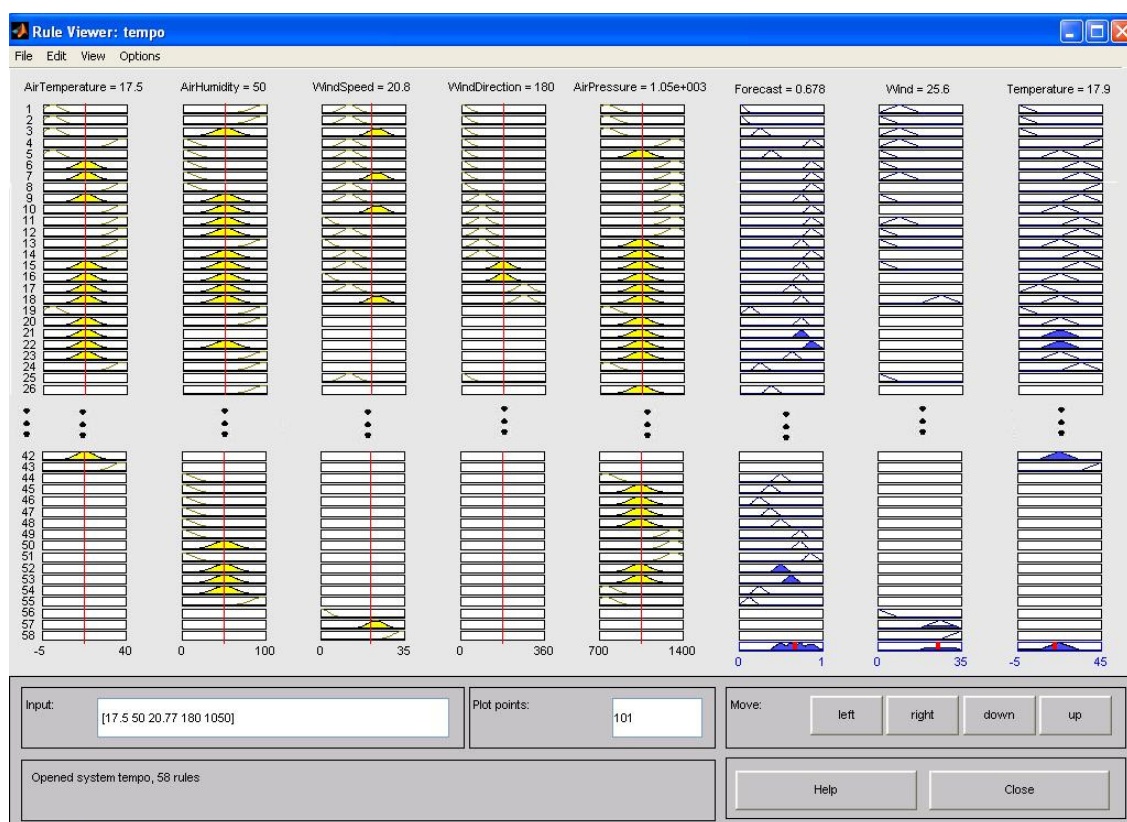


Figura 38 Editor de visualização de regras difusas.

através da nova base de regras obter ajustes nos resultados finais. A figura seguinte mostra o editor *FIS* desenvolvido para este sistema *tempo2*.

Pela análise da figura verifica-se que as variáveis difusas de entrada são *Forecast*, *Wind* e *Temperature* e as variáveis de saída são designadas por *ForecastOUT*, *WindOUT* e *TemperatureOUT*. O sistema de inferência é novamente o de Mamdani e as suas opções são as utilizadas no sistema *tempo*. As funções de pertinência são triangulares (*trimf*) tanto para as variáveis difusas de entrada como para as de saída, apesar de na Figura 39 dar a entender que as funções de pertinência das variáveis difusas de entrada são gaussianas, isto deve-se ao aspecto do editor *FIS* ser pré-definido e apresentar sempre o aspecto da Figura 39 no que diz respeito às figuras das variáveis difusas de entrada e de saída.

A Figura 40 mostra o editor de funções de pertinência da variável difusa *Wind*. Como se pode verificar a definição dos conjuntos difusos desta variável e das restantes opções são iguais às já descritas anteriormente na subsecção 4.2.1 relativos às variáveis difusas de saída do sistema *tempo*. O mesmo acontece para as restantes variáveis difusas do sistema *tempo2*, como tal, só é apresentado na Figura 40 o exemplo da variável *Wind*.

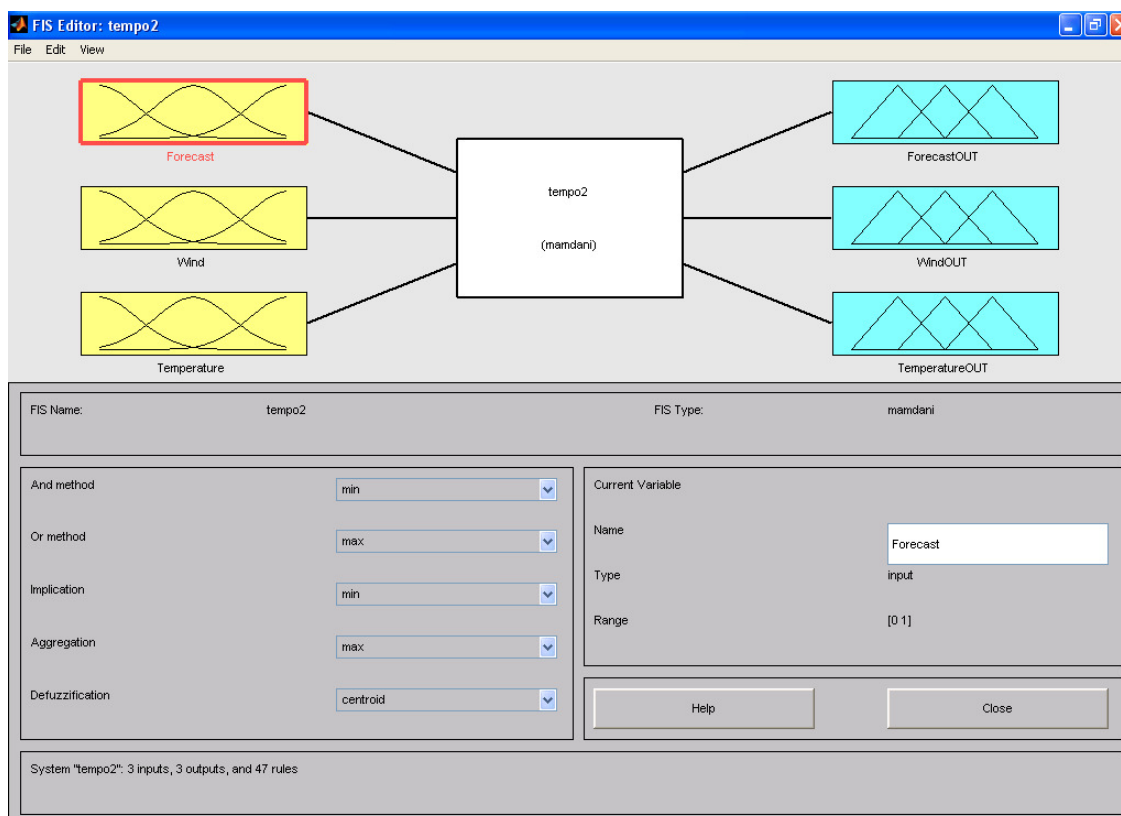
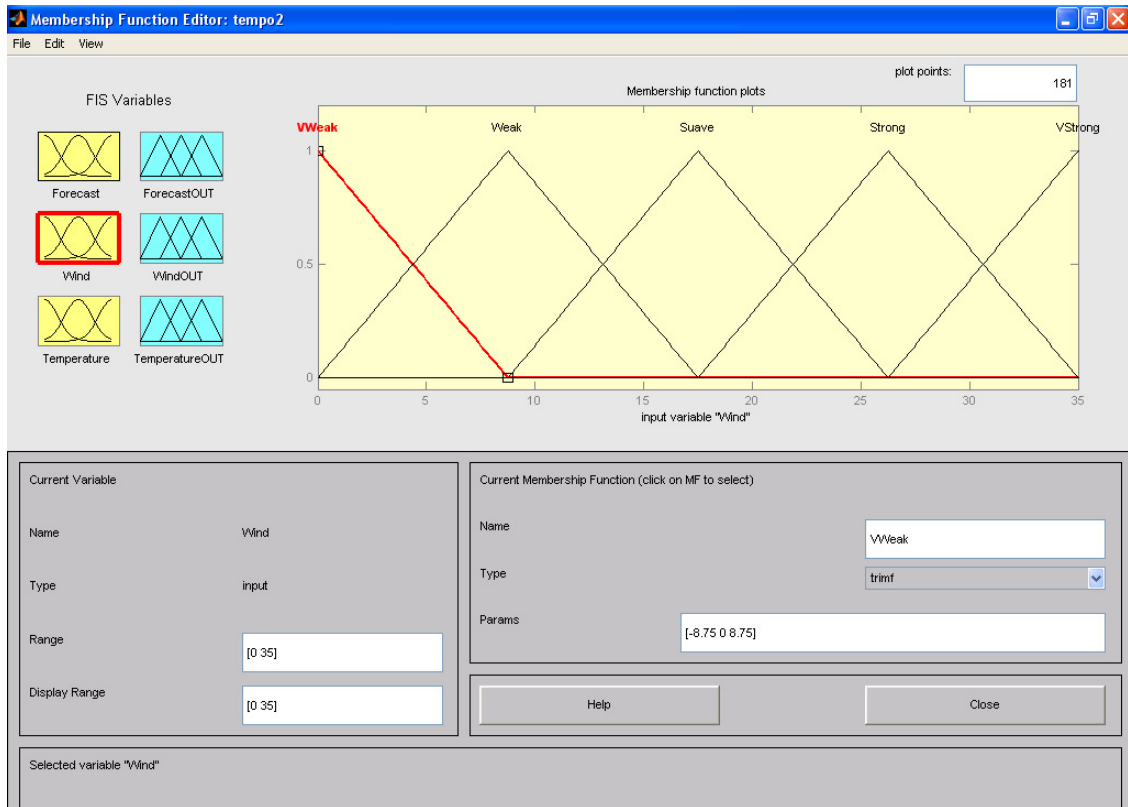


Figura 39 Sistema *FIS tempo2* criado.



**Figura 40** Função de pertença da variável difusa Wind do sistema *tempo2*.

A base de regras do sistema *tempo2* é apresentada na Figura 41, onde se pode verificar que é constituído por quarenta e sete regras e novamente não é possível visualizar na figura apresentada todas as regras assim como todas as variáveis difusas do sistema. A sintaxe de cada regra bem como as opções descritas no editor de regras, são as mesmas já descritas no ponto 4.2.1, como tal, apenas se vai dar o exemplo de algumas regras criadas neste sistema.

1. *If (Forecast is Snow) and (Wind is VWeak) and (Temperature is VCold) then (ForecastOUT is Snow)(WindOUT is VWeak)(TemperatureOUT is VCold) (1);*
2. *If (Forecast is Rain) and (Wind is Suave) and (Temperature is Suave) then (ForecastOUT is Rain)(WindOUT is Weak)(TemperatureOUT is Suave) (1);*
3. *If (Forecast is VCloudy) and (Wind is VWeak) and (Temperature is Cold) then (ForecastOUT is Cloudy)(WindOUT is VWeak)(TemperatureOUT is Suave) (1);*
4. *If (Forecast is Sunny) and (Wind is Weak) and (Temperature is Cold) then (ForecastOUT is LCloudy)(WindOUT is VWeak)(TemperatureOUT is Cold) (1);*
5. *If (Forecast is VCloudy) and (Wind is Weak) and (Temperature is Suave) then (ForecastOUT is Cloudy)(WindOUT is VWeak)(TemperatureOUT is Suave) (0.8).*

A Figura 42 ilustra o editor de visualização de regras difusas, que tem como base o descrito no ponto 4.2.1. Neste editor é possível ter uma ideia geral do sistema difuso desenvolvido (*tempo2*), bem como da sua resposta a determinadas entradas.

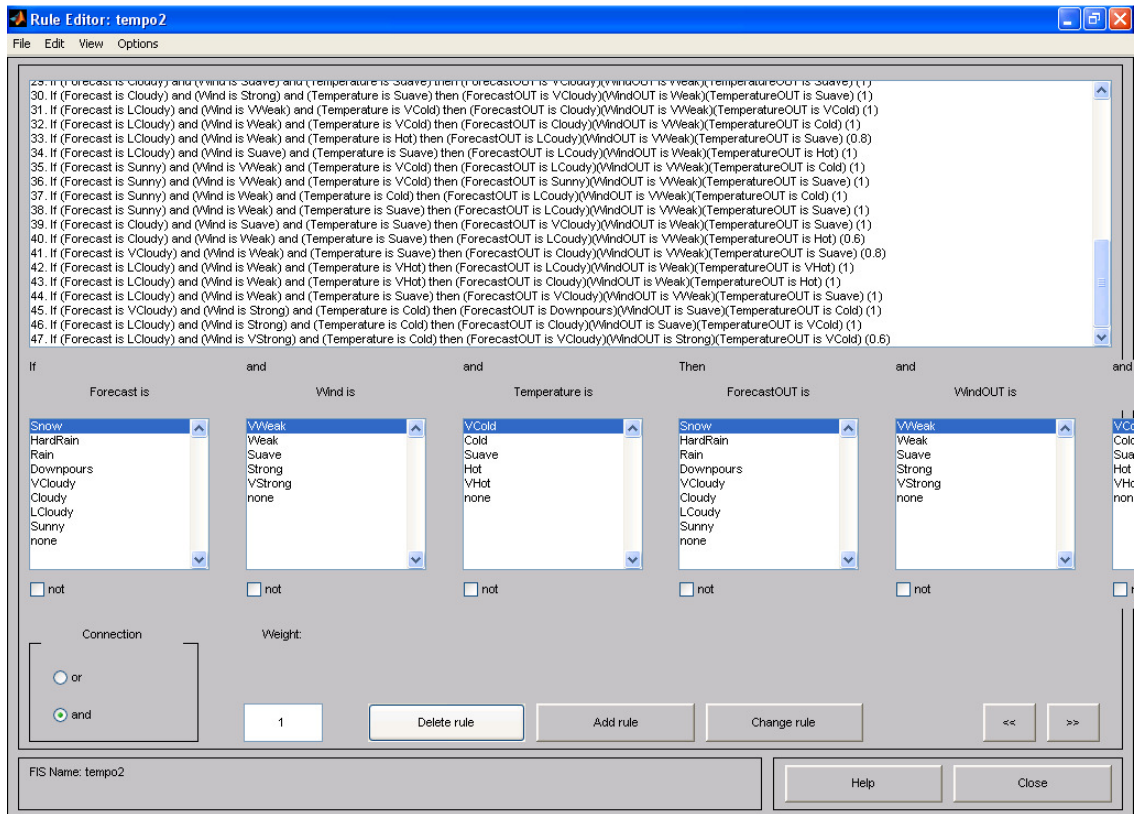


Figura 41 Editor de regras do sistema difuso *tempo2* criado.

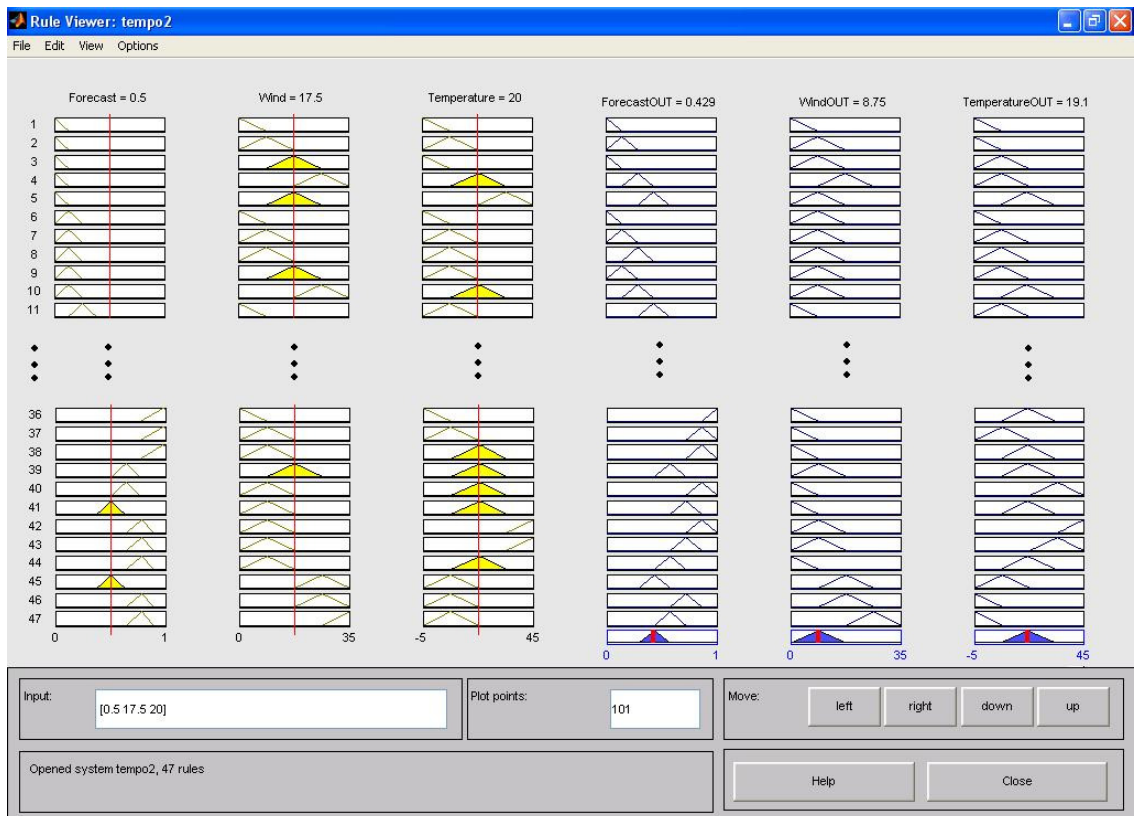


Figura 42 Editor de visualização de regras difusas do sistema *tempo2*.

No caso da figura referida anteriormente, não é possível visualizar a influência difusa de todas regras devido ao tamanho da imagem, como tal, são apresentadas como exemplo as primeiras e as últimas regras do sistema difuso. Os resultados apresentados têm como entrada o vector [0.5 17.5 20], previsão, velocidade do vento e temperatura, respectivamente.

#### 4.4 INTERFACE GRÁFICA CRIADA E INTERLIGAÇÃO DOS SISTEMAS *FIS* DESENVOLVIDOS

A interface gráfica do sistema foi desenvolvida no GUIDE do MATLAB [MATLAB, 2006].

O sistema ao ser iniciado apresenta o menu principal e uma mensagem no ecrã como mostra na Figura 43. Esta mensagem tem como finalidade alertar o utilizador para a actualização dos dados actuais recorrendo ao *download* dos dados disponibilizados na página da Internet já referida anteriormente, caso ainda não o tenha feito, para não efectuar previsões baseadas em valores que não correspondem à data actual.

O menu principal é apresentado na Figura 44. Este menu apresenta três opções, “*Actualizar Dados*”, “*Previsão Hoje*” e “*Previsão Próximos Dias*”.

A opção “*Actualizar Dados*”, compara as datas dos ficheiros “*xml*” existentes em memória com a data do próprio ambiente de trabalho do computador que está a ser utilizado, para efectuar, caso seja necessário, a actualização dos dados relativos aos dois dias anteriores à presente data. Caso esta opção seja executada e os dados estejam actualizados é apresentada a mensagem ilustrada na Figura 45.

No caso de os dados não estarem actualizados, vai ser executado o software criado para fazer o *download* dos ficheiros “*xml*” (disponibilizados na página da Internet) necessários

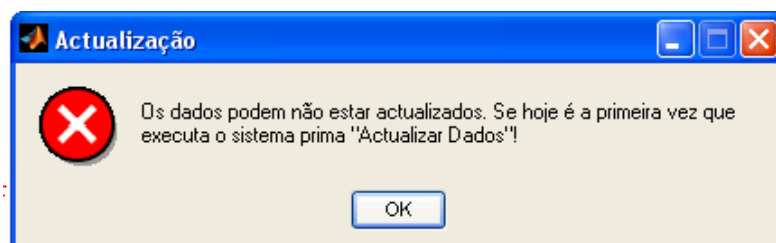


Figura 43 Mensagem de alerta para actualização de dados.

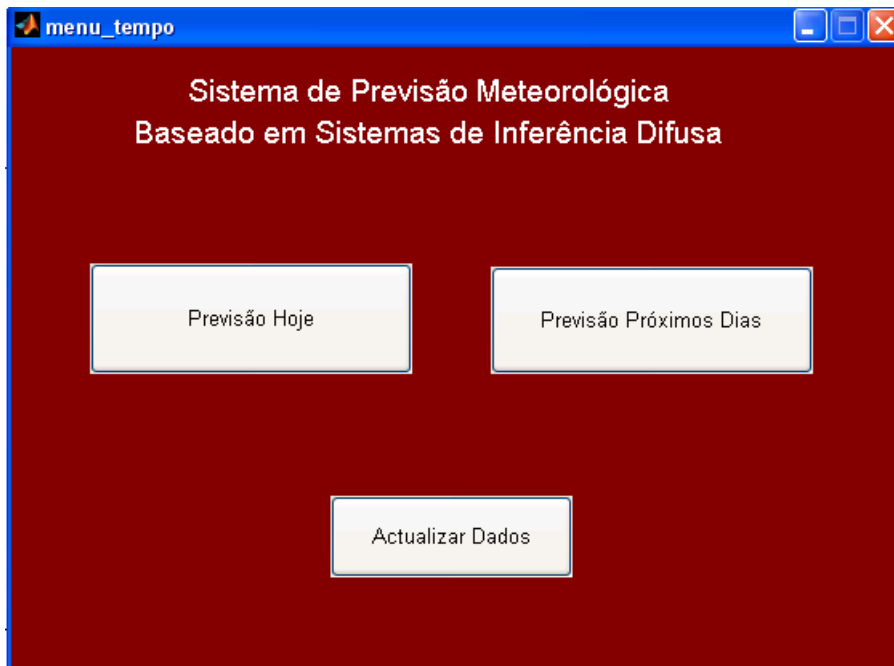


Figura 44 Menu principal do sistema de previsão meteorológica criado.

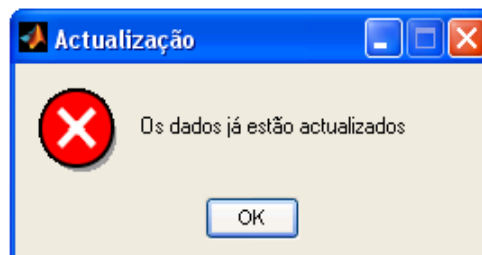


Figura 45 Mensagem de dados actualizados.

para a execução do sistema difuso. O software concebido, para além da funcionalidade aqui referida, permite detectar, as transições de mês ou de ano, incluindo anos bissextos e em função da data actual identificar os ficheiros de dados necessários ao sistema difuso de previsão meteorológica. De seguida, Figura 46, é apresentado o fluxograma que ilustra o algoritmo que permite o *download* dos ficheiros *xml* referentes ao dia anterior à data actual. Relativamente ao *download* dos ficheiros dos dois dias anteriores, o algoritmo é igual com a excepção da variável “Dia” que terá um decremento de uma unidade em relação ao apresentado na Figura 46.

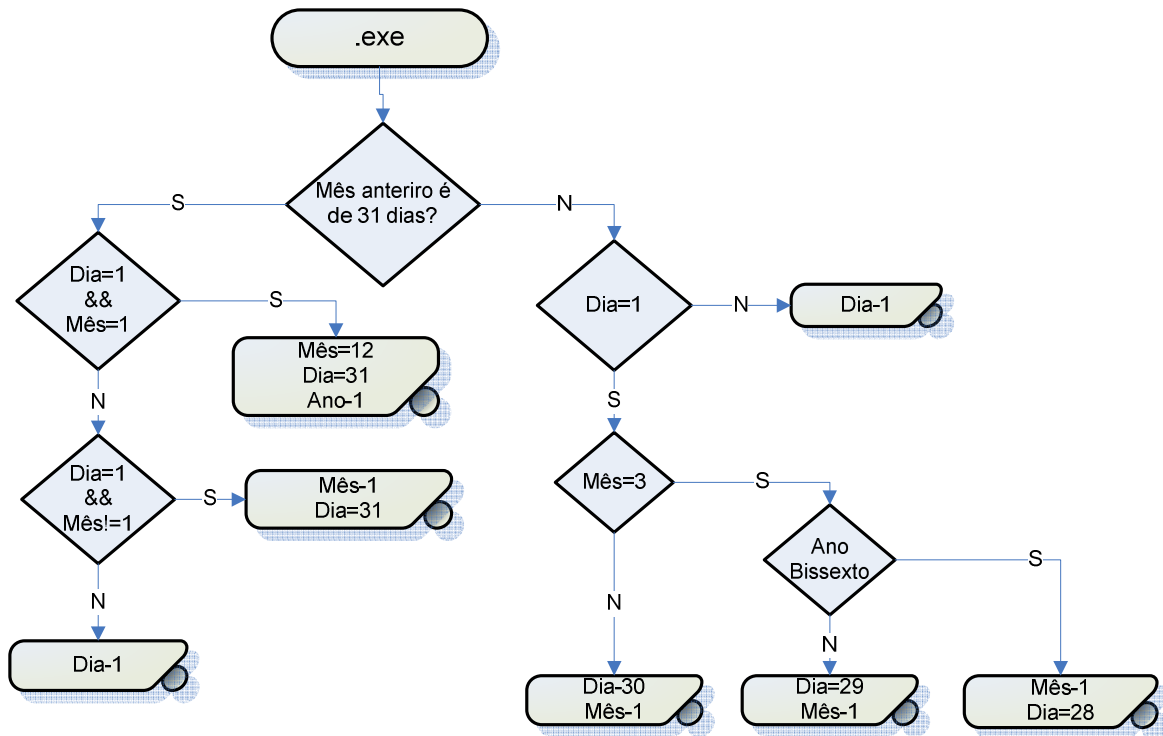


Figura 46 Fluxograma de descrição do software de *download* dos ficheiros *xml*.

No final da actualização é apresentada a mensagem ilustrada pela Figura 47.

Em relação às outras duas opções, serão apresentados submenus. No caso de a opção ser “*Previsão Hoje*”, será apresentado o menu que irá permitir ao utilizador saber os resultados da previsão para o dia em que se encontra, enquanto se a opção for “*Previsão Próximos Dias*” será apresentado um outro menu que permitirá ao utilizador saber, dependendo da sua escolha, a previsão para a manhã e para a tarde dos dois dias seguintes em relação à data actual do computador.

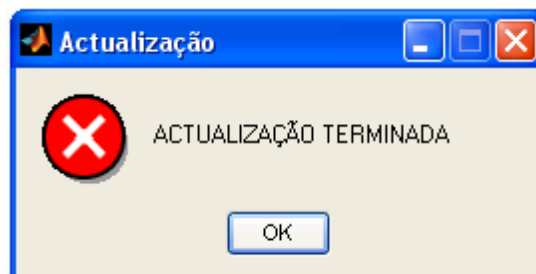
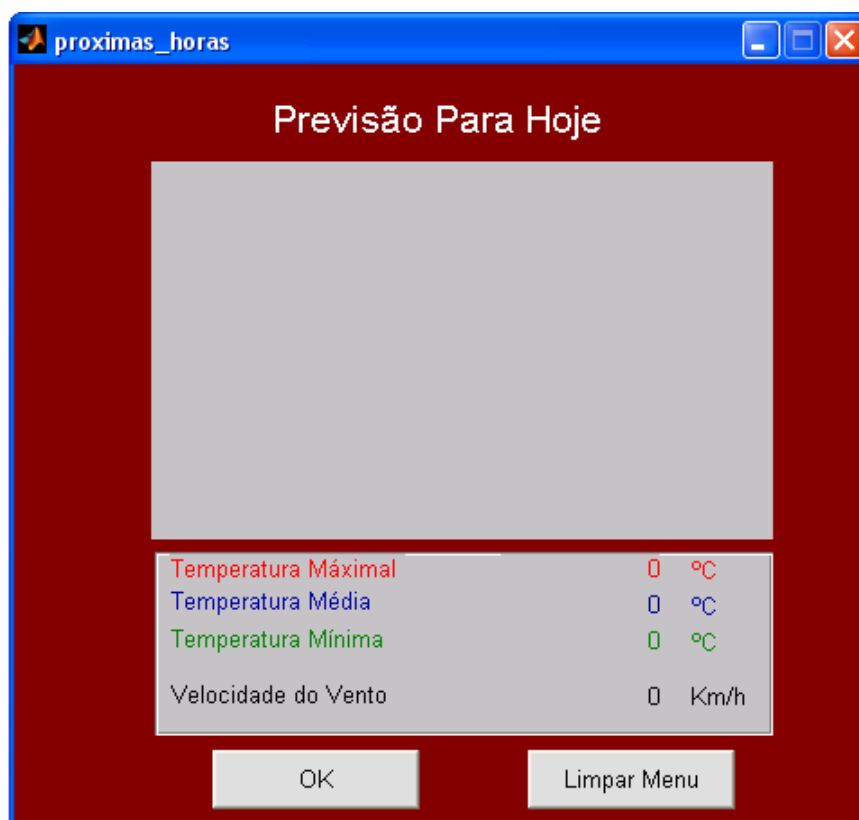


Figura 47 Mensagem no final da actualização dos dados.

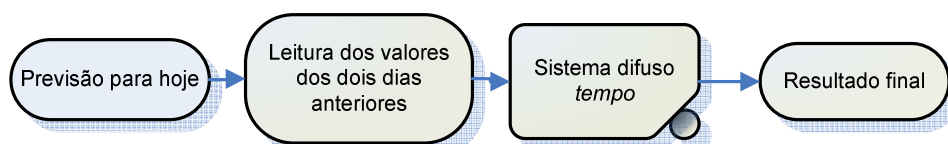
No caso da opção seleccionada ser “*Previsão Hoje*”, o menu apresentado é ilustrado na Figura 48. Neste menu será possível visualizar uma imagem correspondente à previsão obtida, assim como, a temperatura máxima, média, mínima e a velocidade do vento média para o dia actual.

A Figura 49 mostra de forma esquemática como é feita a previsão apresentada no menu ilustrado na Figura 48.

Quando seleccionar o botão de “OK”, o sistema vai ler os ficheiros correspondentes aos dois dias anteriores e retirar os valores das cinco variáveis que vão entrar no sistema difuso *tempo*, já anteriormente descrito. O resultado da previsão obtida por este sistema difuso vai ser apresentado no final como mostra a Figura 50 a título de exemplo.



**Figura 48** Menu para a previsão do dia de hoje.



**Figura 49** Esquema da estrutura de previsão para o dia corrente.



**Figura 50** Exemplo de uma previsão para o dia de hoje.

Se o utilizador pretender limpar o menu, ou seja, ficar com o menu igual ao ilustrado na Figura 48, basta clicar sobre a opção “*Limpar Menu*”.

Caso o utilizador seleccione a opção “*Previsão Próximos Dias*” no menu principal (Figura 44) o menu apresentado é o ilustrado na Figura 51. O utilizador neste menu pode obter a previsão para a manhã e para a tarde, correspondente ao dia seleccionado na opção “*Seleccionar opção*”. Neste menu será apresentada uma imagem correspondente à previsão obtida, bem como a temperatura máxima, mínima e a velocidade do vento, tanto para a manhã como para a tarde, correspondente ao dia seleccionado.

Caso o utilizador não seleccione uma das opções “*Previsão para amanhã*” ou “*Previsão para depois de amanhã*” é apresentada uma mensagem no ecrã a alertar o utilizador para a necessidade de escolher uma opção, Figura 52.

Se o utilizador seleccionar a opção “*Previsão para amanhã*” irá obter a previsão para o dia seguinte ao dia actual. A Figura 53 ilustra de forma esquemática o modo como é obtido o resultado final da previsão para a opção referida.

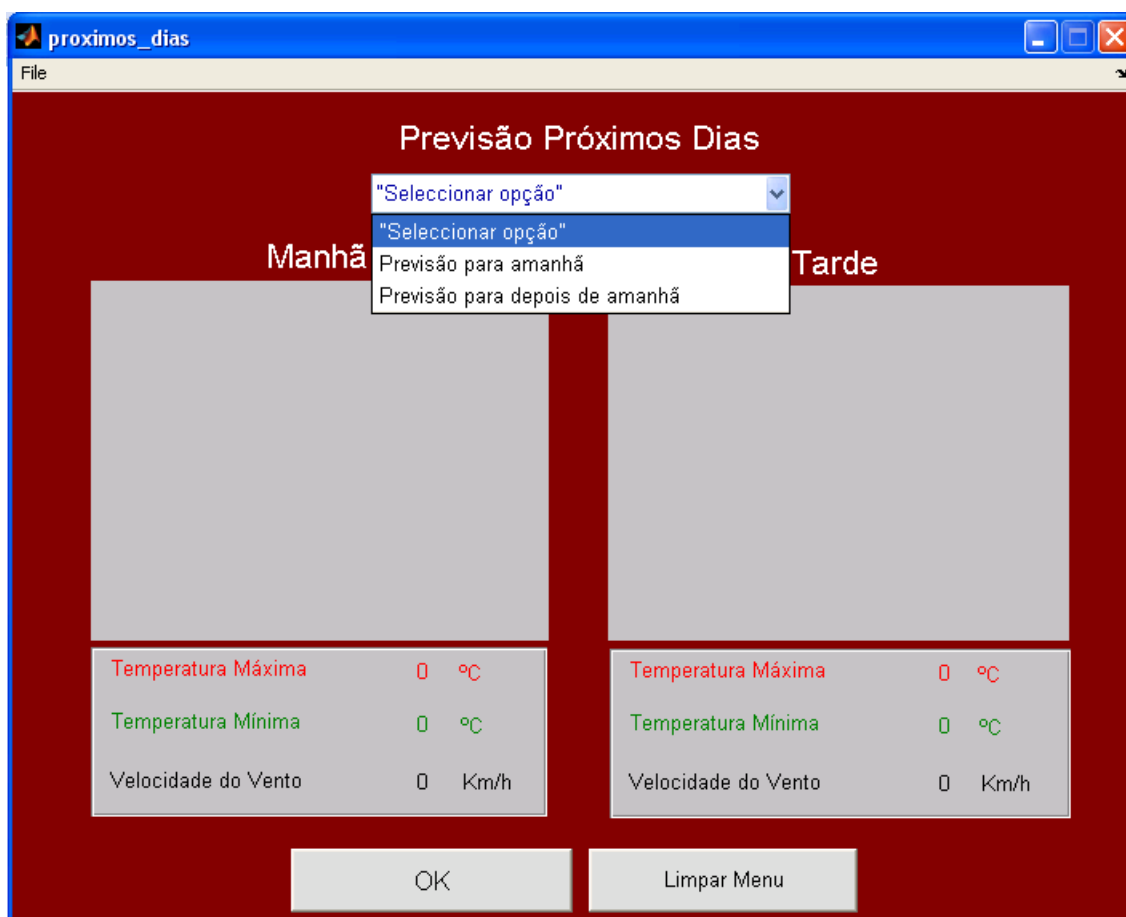


Figura 51 Menu da previsão para os dois dias seguintes à data corrente.

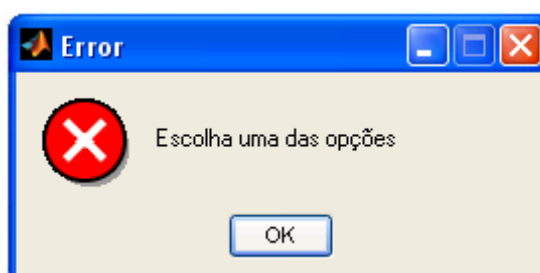


Figura 52 Mensagem caso não seja seleccionada nenhuma opção.

O utilizador depois de seleccionar a opção “*Previsão para amanhã*”, escolhendo o botão “OK” o sistema vai ler os valores dos ficheiros relativos aos dois dias anteriores ao actual, retendo os valores das duas manhãs (tardes) para posteriormente serem usados na previsão da manhã (tarde) do dia pretendido. Os valores lidos das cinco variáveis para a manhã (tarde) entram no sistema difuso *tempo*, e o resultado da sua saída vai fazer média com o resultado obtido na previsão para o dia actual.

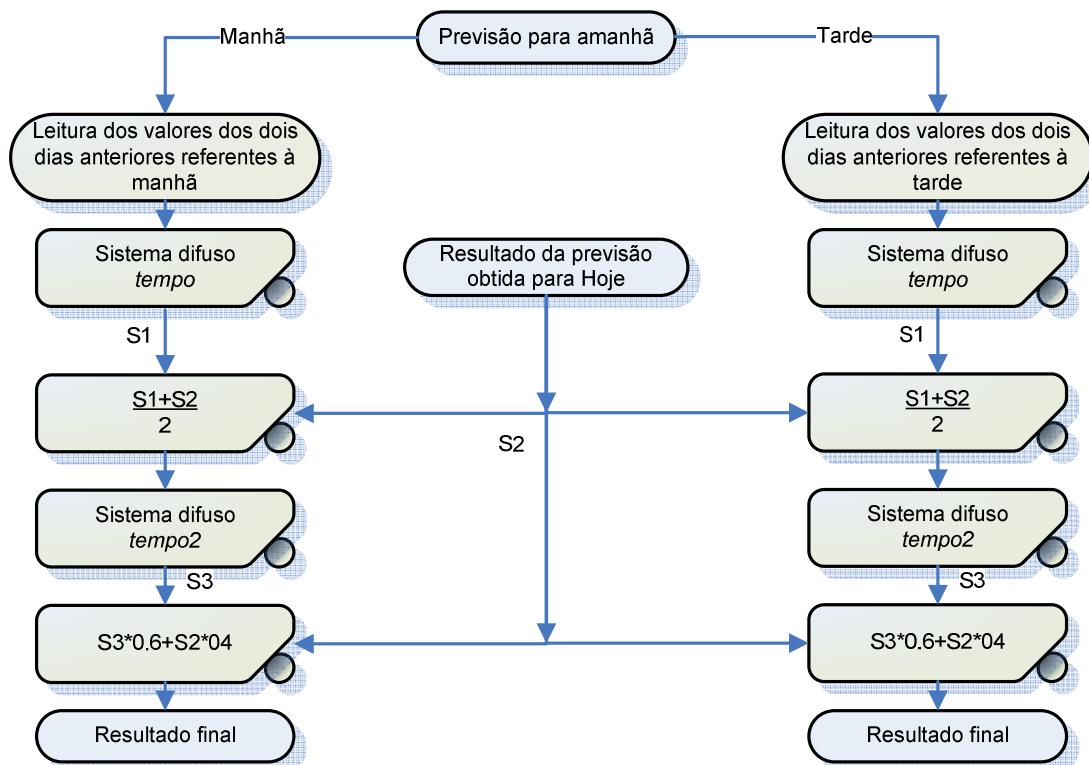
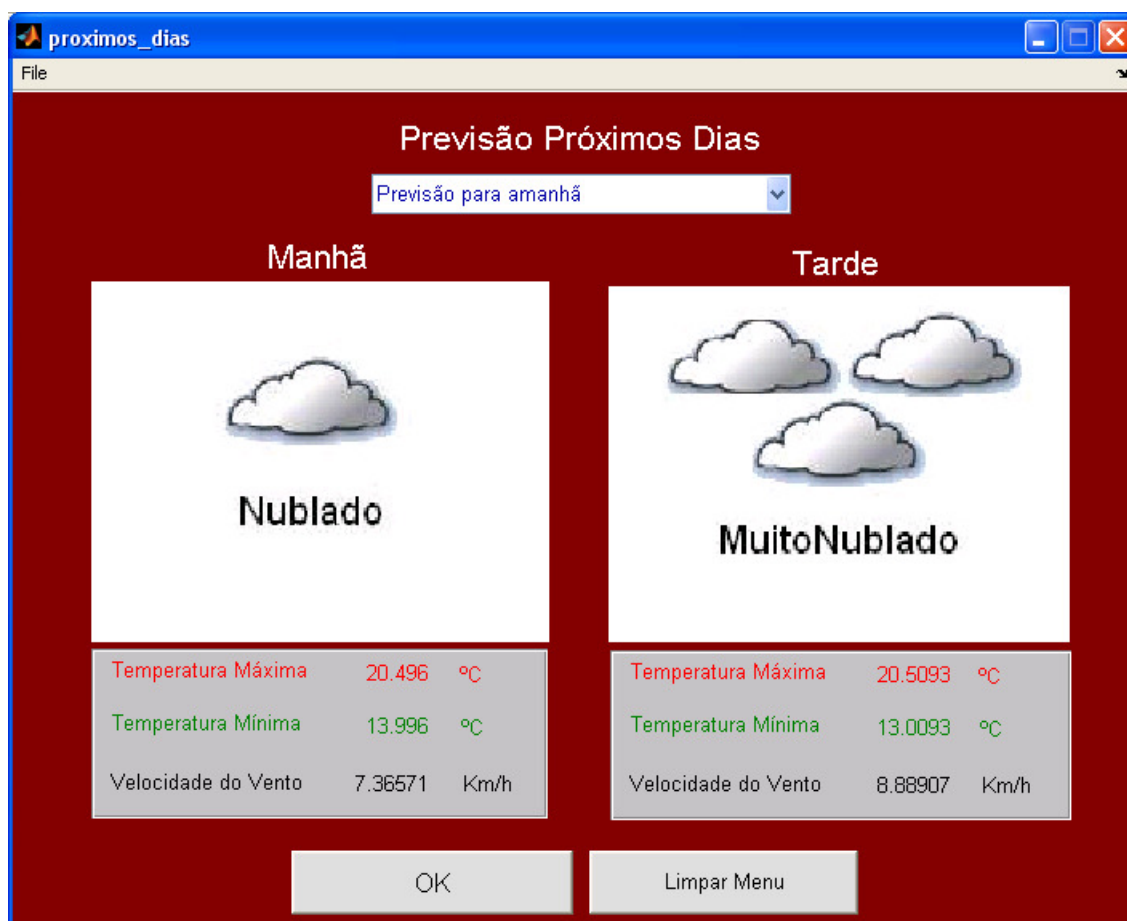


Figura 53 Esquema da estrutura de previsão para um dia depois do dia corrente.

O resultado desta média entra no segundo sistema difuso *tempo2*, contribuindo a sua saída com 60% para o resultado final do sistema, e a previsão do dia actual com os restantes 40%, obtendo-se assim, o resultado final do sistema para a manhã (tarde) pretendida. As percentagens atribuídas foram estabelecidas por “tentativa/erro” de acordo com os resultados que eram obtidos, de forma a conseguir-se no final a melhor sintonia do controlador e consequentemente resultados mais fiáveis. A Figura 54 ilustra um exemplo.

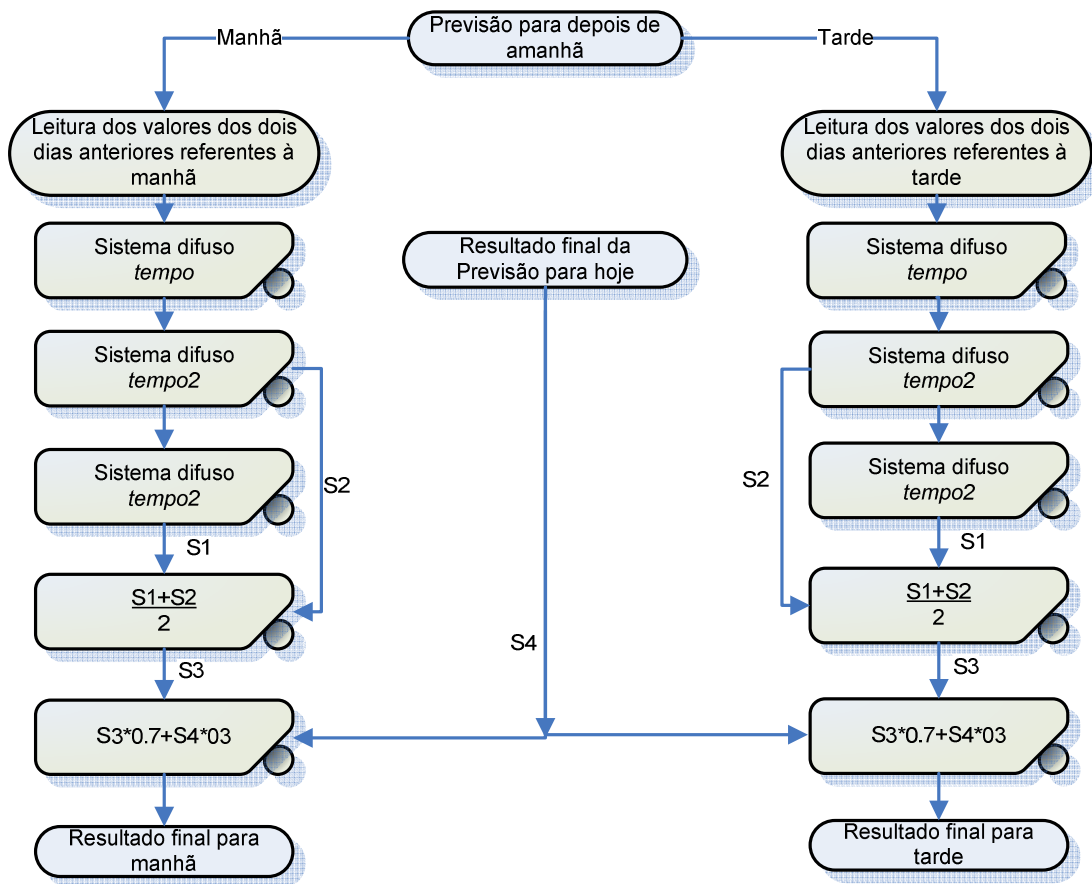
Neste menu também existe a opção de “Limpar Menu”, que permite limpar o menu, voltando ao menu apresentado na Figura 51.

No caso da opção escolhida ser “Previsão para depois de amanhã”, o utilizador irá obter a previsão para o dia posterior ao dia de amanhã. A Figura 55 ilustra de forma esquemática o modo como é obtido o resultado final da previsão para a respectiva escolha.



**Figura 54 Exemplo de uma previsão para um dia depois do dia actual.**

Depois de o utilizador seleccionar a opção “Previsão para depois amanhã”, fazendo “OK”, o sistema vai ler os valores existentes nos ficheiros relativos aos dois dias anteriores ao qual se encontra. Os valores das manhãs (tardes) vão ser usados para obter a previsão para a manhã (tarde). Os valores das cinco variáveis lidas para a manhã (tarde) entram no sistema difuso *tempo*. Os resultados deste sistema difuso vão entrar no sistema difuso *tempo2*, voltando a entrar no sistema difuso *tempo2*, formando-se assim uma cascata de dois níveis. O valor final do segundo nível da cascata do sistema difuso *tempo2* vai fazer média com o resultado do primeiro nível. O resultado da previsão final vai ser obtido com 70% do valor da média referida anteriormente e 30% do valor da previsão do dia actual, obtendo-se assim a previsão final tanto para a manhã como para a tarde, como se pode verificar na Figura 56 a título de exemplo.



**Figura 55** Esquema da estrutura de previsão para dois dias depois do dia actual.

As percentagens atribuídas foram estabelecidas de acordo com os resultados que eram obtidos segundo o método de “tentativa erro”, de forma a obter-se no final os melhores resultados possíveis.

Neste menu também existe a opção de “*Limpar Menu*”, que permite limpar o menu, obtendo-se o menu apresentado na Figura 51.

Por fim, é de salientar que o sistema possui oito imagens para representar o resultado da previsão (*Forecast*) correspondendo cada figura ao seu conjunto difuso de saída, pelo que, existe uma figura que representa: neve, chuva forte, chuva, aguaceiros, céu muito nublado, céu nublado, céu pouco nublado e céu limpo.



Figura 56 Exemplo de uma previsão para dois dias depois do dia corrente.



# 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados vários resultados obtidos através do sistema de inferência difusa desenvolvido. Os estudos aqui apresentados foram efectuados para diferentes dias, e comparados com os valores reais apresentados na página *web* que serviu de base a este trabalho, com vista a testar a fiabilidade do sistema aqui apresentado.

Para o teste do sistema desenvolvido, foram considerados os dias compreendidos no período de 22 de Julho a 10 de Agosto de 2008. A escolha deste intervalo de tempo, teve por objectivo demonstrar que o sistema implementado respeita correctamente as transições dos meses, segundo o algoritmo anteriormente apresentado. Para tal, foram guardados os dados reais fornecidos pela estação meteorológica através da página *web* e posteriormente comparados com os obtidos através do sistema difuso.

A previsão para o dia de hoje é uma previsão média diária, baseada também nos valores médios do dia anterior ao actual, disponibilizados pela estação meteorológica. Esta metodologia teve por base o facto do utilizador, quando recorre a uma previsão para o dia em curso, apenas procurar informações relativamente a eventuais alterações climáticas quando comparadas com as que pode constatar directamente, recorrendo à observação do exterior. Por outro lado, não faria sentido estar a fornecer uma previsão para a manhã de hoje quando já se estava na parte de tarde desse dia. Claro está, que esta situação também

poderia ser resolvida recorrendo ao relógio interno do computador, que no caso de já ter ultrapassado as 12 horas apenas daria a previsão para a tarde. Mais ainda, o facto de se terem utilizado dois algoritmos diferentes, para os casos em que se pretendem fazer as previsões para o dia actual ou para dias posteriores, recorrendo à recolha de dados, também estes diferentes (valores de 10 em 10 minutos, ou os valores médios), permite deixar em aberto a possibilidade de adaptação deste controlador a situações mais específicas como por exemplo a percentagem de humidade do ar.

Normalmente, não existem alterações muito significativas do estado do tempo em dois dias consecutivos já que os fenómenos meteorológicos respeitam as características dos processos evolutivos. Por este motivo, ao recorrermos aos valores médios do dia anterior para fazer a previsão para o dia de hoje, não iríamos incorrer em erros acentuados e por outro lado, como o número dos dados a analisar era significativamente menor, iria permitir diminuir o tempo computacional do algoritmo dando uma resposta mais rápida ao utilizador.

É de referir que para os dias seguintes ao actual, se fez a divisão da previsão em manhã e tarde, devido ao facto de serem disponibilizados ficheiros com os dados de 10 em 10 minutos referentes aos dias anteriores ao actual, o que iria permitir uma melhor sintonia do controlador e consequentemente um maior rigor na previsão, já que a percentagem de erro introduzida nos resultados quando se efectuam previsões a longo prazo, tem tendência a aumentar significativamente.

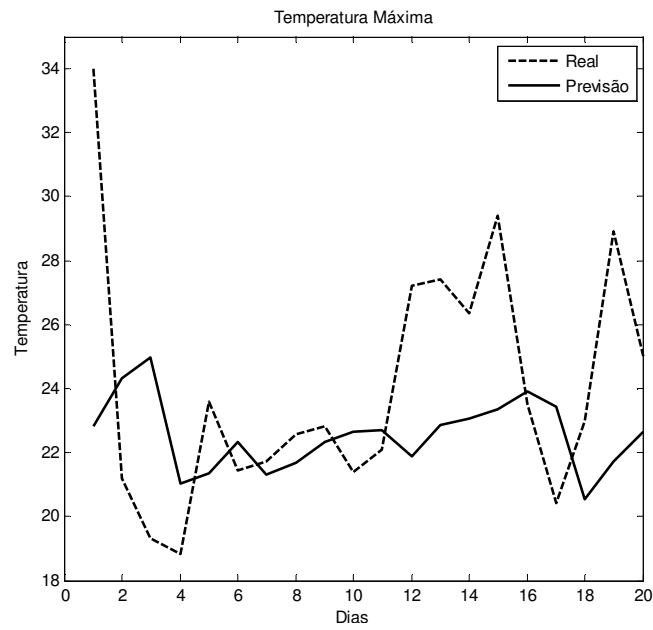
Nas tabelas seguintes é possível analisar a fiabilidade dos resultados obtidos por comparação com os valores reais.

A Tabela 2 mostra os resultados da previsão para o dia de hoje (sistema da Figura 48), em comparação com os seus correspondentes valores reais.

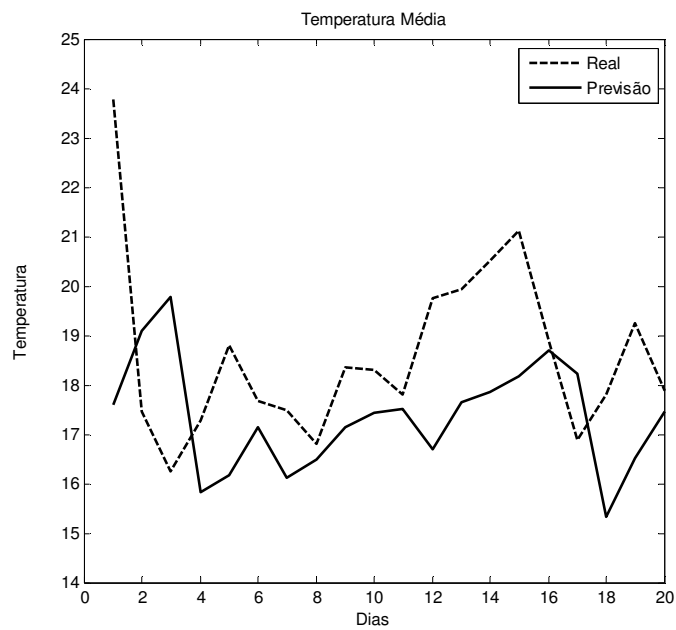
Fazendo uso dos valores da Tabela 2 foram efectuados os gráficos abaixo representados, referentes à temperatura máxima, média, mínima e à velocidade do vento, de forma a termos uma melhor compreensão dos resultados obtidos, e por conseguinte uma análise mais fiável do sistema. É de salientar que o vector representado nos gráficos no eixo das abcissas referente aos “Dias” vai de 0 a 20, representando os dias de 22 de Julho a 10 de Agosto respectivamente.

**Tabela 3 Valores reais e valores da previsão para dia “Hoje”.**

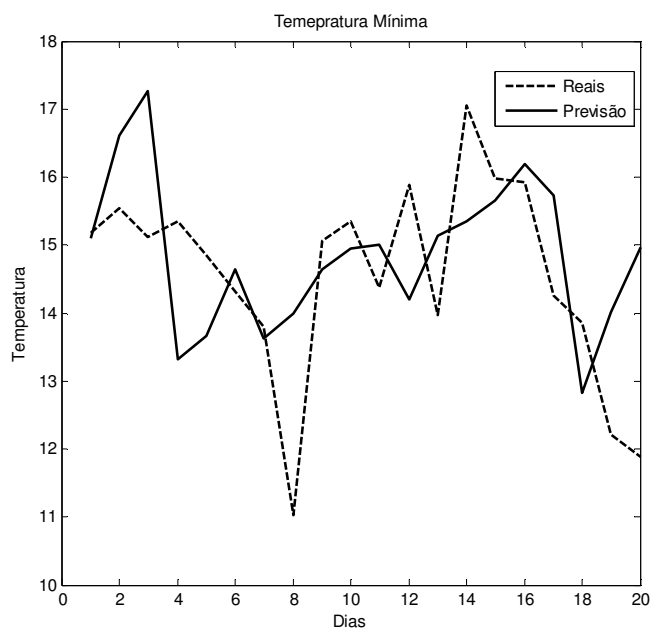
Data	Reais				Sistema Difuso			
	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Méd</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Méd</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]
22/7/08	34,00	23,77	15,18	11,74	22,80	17,60	15,10	7,97
23/7/08	21,19	17,47	15,54	16,38	24,30	19,10	16,60	10,11
24/7/08	19,34	16,26	15,12	15,98	24,97	19,77	17,27	9,20
25/7/08	18,83	17,28	15,35	11,23	21,02	15,82	13,32	7,03
26/7/08	23,60	18,80	14,86	8,28	21,37	16,17	13,67	6,12
27/7/08	21,43	17,66	14,31	10,01	22,34	17,14	14,64	6,78
28/7/08	21,72	17,50	13,80	10,84	21,33	16,13	13,63	8,25
29/7/08	22,57	16,80	11,02	7,27	21,69	16,49	13,99	8,28
30/7/08	22,83	18,35	15,06	13,93	22,34	17,14	14,64	7,11
31/7/08	21,40	18,29	15,35	18,76	22,64	17,44	14,94	10,98
1/8/08	22,07	17,81	14,38	8,24	22,71	17,51	15,01	5,61
2/8/08	27,20	19,75	15,89	6,52	21,90	16,70	14,20	8,26
3/8/08	27,40	19,94	13,97	10,98	22,85	17,65	15,15	10,51
4/8/08	26,37	20,51	17,06	10,44	23,05	17,85	15,35	14,23
5/8/08	29,39	21,12	15,98	7,49	23,36	18,16	15,66	10,69
6/8/08	23,50	18,87	15,92	9,83	23,90	18,70	16,20	10,81
7/8/08	20,43	16,89	14,25	4,14	23,44	18,24	15,74	11,94
8/8/08	22,97	17,81	13,85	8,71	20,52	15,32	12,82	7,69
9/8/08	28,93	19,25	12,22	7,96	21,70	16,50	14,00	14,73
10/8/08	25,00	17,88	11,89	5,80	22,66	17,46	14,96	12,00



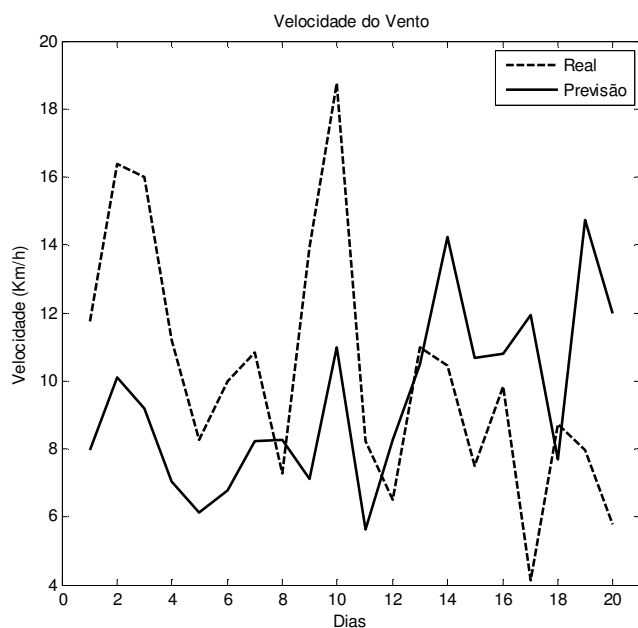
**Figura 57** Comparação da temperatura máxima para o dia de “Hoje”.



**Figura 58** Comparação da temperatura média para o dia de “Hoje”.



**Figura 59** Comparação da temperatura mínima para o dia de “Hoje”.



**Figura 60** Comparação da velocidade do vento para o dia de “Hoje”.

Através da análise da Tabela 2 e dos gráficos das Figuras 57, 58, 59, 60 pode-se calcular a média do erro, ou seja a média das diferenças entre o estado real e o previsto, dada pela equação  $e = \frac{\sum_1^n (Valor_{Real} - Valor_{previsão})}{n}$ , que para a temperatura máxima é de  $\pm 3,18$  °C, para a temperatura média é de  $\pm 1,90$  °C, para a temperatura mínima é de  $\pm 1,20$  °C e para a velocidade do vento  $\pm 3,96$  Km/h. Como se pode verificar, a velocidade do vento é a que

apresenta maior erro, pois é um dos factores meteorológicos mais instáveis. Ao efectuar-se as leituras na estação meteorológica, muitas vezes, os períodos de amostragem coincidem com rajadas mais fortes o que leva a valores amostrados com grandes variações, dando origem a previsões um pouco díspares.

Como já foi descrito na secção anterior, nas previsões para os dois dias a seguir ao actual os resultados são apresentados para a manhã e para a tarde em separado. Assim, na Tabela 3 são apresentadas as previsões para a manhã do dia seguinte ao actual, e os correspondentes valores reais.

**Tabela 4 Valores reais e valores da previsão para a manhã de “Amanha”**

Data	Reais			Sistema Difuso		
	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]
22/7/08	30,65	15,18	9,94	23,03	16,53	9,94
23/7/08	18,68	15,54	8,22	23,17	16,67	8,22
24/7/08	19,34	15,51	10,05	24,52	18,02	10,05
25/7/08	18,05	15,35	9,17	22,03	15,53	9,17
26/7/08	22,68	15,95	7,68	20,50	14,00	7,68
27/7/08	20,7	14,31	6,99	19,36	12,86	6,99
28/7/08	20,11	15,30	8,44	22,09	15,59	8,44
29/7/08	21,11	11,02	6,76	20,13	13,63	6,76
30/7/08	21,08	15,06	8,49	21,62	15,12	8,49
31/7/08	19,63	16,99	9,60	22,09	15,59	9,60
1/8/08	20,54	14,38	10,36	22,37	15,87	10,36
2/8/08	22,38	15,94	6,77	20,61	14,11	6,77
3/8/08	25,09	13,97	9,43	21,12	14,62	9,43
4/8/08	25,14	17,06	10,00	22,46	15,96	10,00
5/8/08	24,62	15,98	12,28	20,82	14,32	12,28
6/8/08	21,82	17,03	10,32	23,31	16,81	10,32
7/8/08	17,74	14,25	10,39	23,54	17,04	10,39
8/8/08	20,51	14,28	8,03	21,34	14,84	8,03
9/8/08	24,91	12,22	10,02	20,09	13,59	10,02
10/8/08	22,56	11,89	11,02	21,59	15,09	11,02

Através dos valores da Tabela 3 foram criados os gráficos abaixo representados, referentes à temperatura máxima, à temperatura mínima e à velocidade do vento.

Analisando os gráficos das Figuras 61, 62 e 63 e a equivalente Tabela 3 pode-se calcular o erro médio dado pela formula  $e = \frac{\sum_1^n (Valor_{Real} - Valor_{previsão})}{n}$  referente às previsões efectuadas para a manhã do dia “Amanhã”, ou seja previsão a dois dias. O erro médio para a temperatura máxima que se obteve foi de  $\pm 2,94$  °C, para a temperatura mínima é de  $\pm 1,39$  °C e para a velocidade do vento é de  $\pm 4,06$  Km/h. Obtendo-se novamente um erro superior para a velocidade do vento, devido às razões já apresentadas anteriormente. No entanto, pode-se concluir que os erros obtidos para a manhã do dia seguinte apresentam valores similares aos obtidos para o dia de hoje, o que vem reforçar a fiabilidade do controlador desenvolvido.

A Tabela 4, por sua vez, apresenta os valores reais e os obtidos através do sistema difuso, para as temperaturas máximas e mínimas e também para o vento, para a tarde do dia seguinte ao de hoje. Com base nesses valores foram criados os gráficos representados nas Figuras 64, 65, 66, referentes a temperatura máxima, temperatura mínima e velocidade do vento.

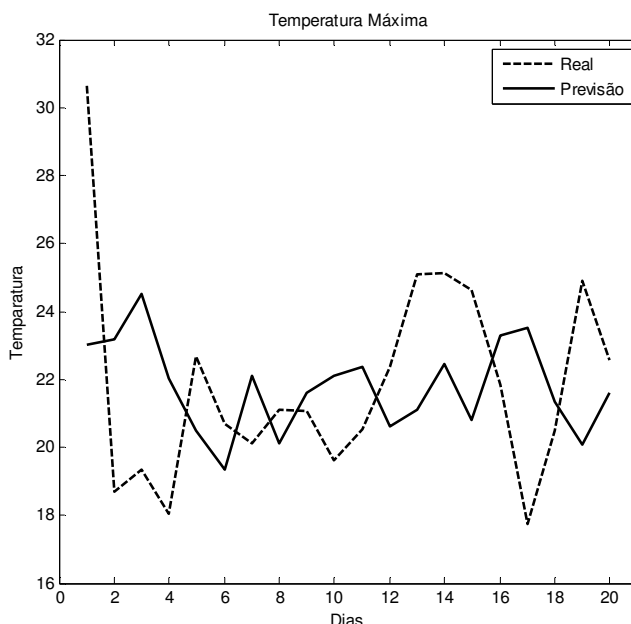
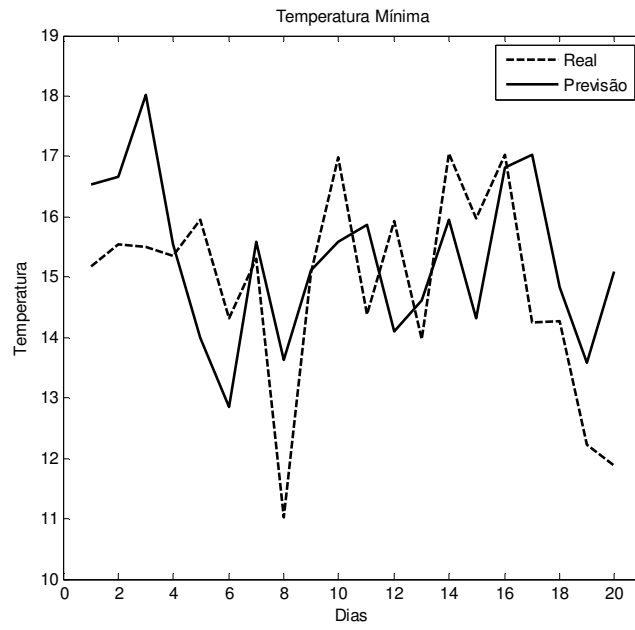
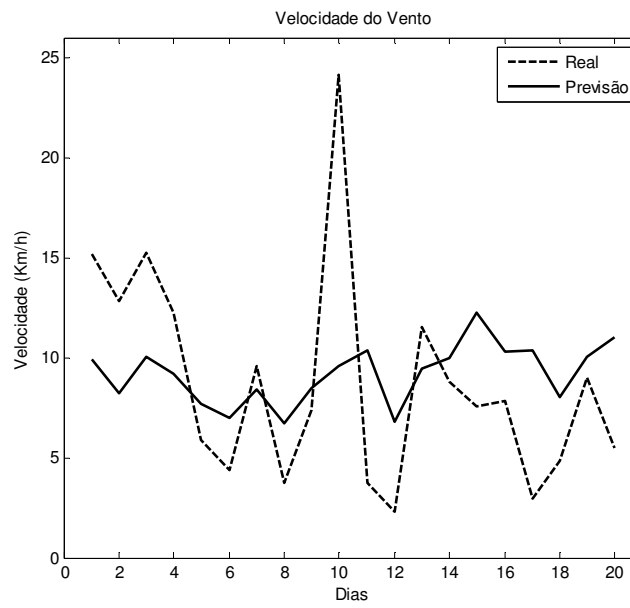


Figura 61 Comparação da temperatura máxima para a manhã de “Amanhã”.



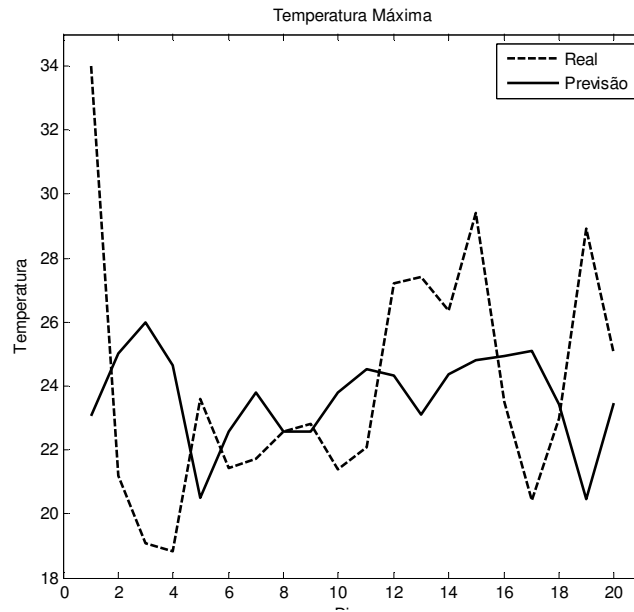
**Figura 62** Comparação da temperatura mínima para a manhã de “Amanhã”.



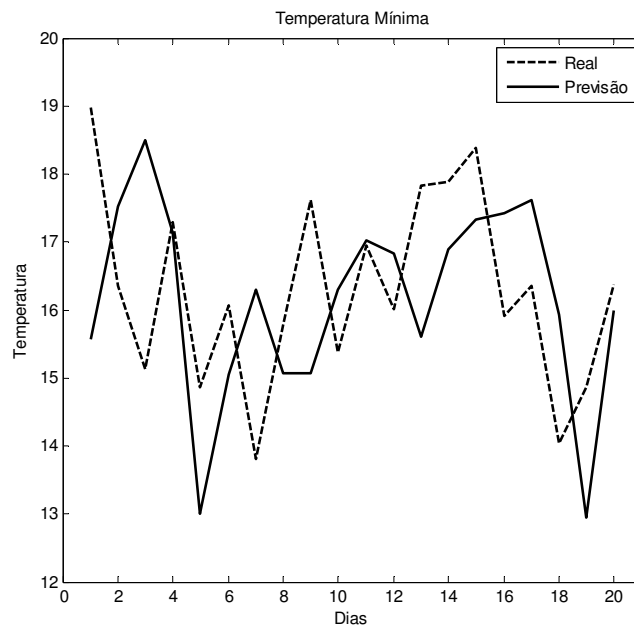
**Figura 63** Comparação da velocidade do vento para a manhã de “Amanhã”.

**Tabela 5 Valores reais e valores da previsão para a tarde de “Amanha”.**

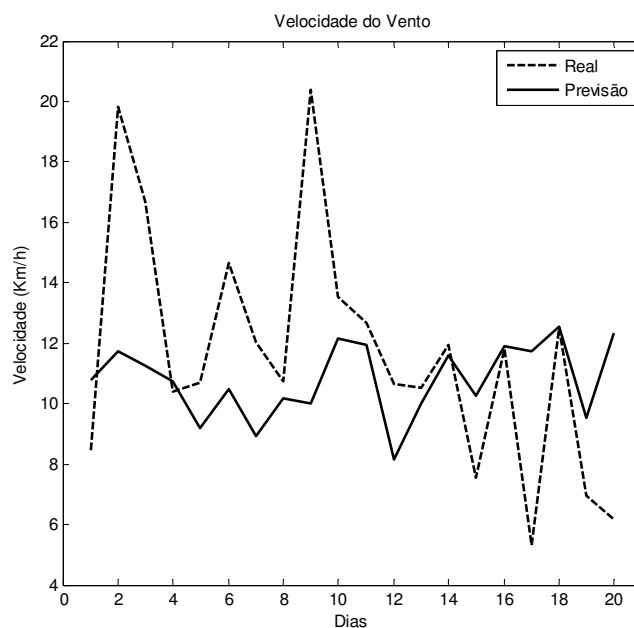
Data	Reais			Sistema Difuso		
	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]
22/7/08	34,00	18,97	8,47	23,08	15,58	10,79
23/7/08	21,19	16,35	19,81	25,01	17,51	11,73
24/7/08	19,06	15,12	16,67	25,99	18,49	11,26
25/7/08	18,83	17,29	10,38	24,63	17,13	10,73
26/7/08	23,60	14,87	10,69	20,51	13,01	9,20
27/7/08	21,43	16,06	14,64	22,56	15,06	10,47
28/7/08	21,72	13,80	12,01	23,81	16,31	8,94
29/7/08	22,57	15,78	10,74	22,58	15,08	10,18
30/7/08	22,83	17,62	20,40	22,58	15,08	10,02
31/7/08	21,40	15,38	13,53	23,81	16,31	12,17
1/8/08	22,07	16,94	12,70	24,53	17,03	11,96
2/8/08	27,20	16,01	10,67	24,34	16,84	8,15
3/8/08	27,40	17,83	10,51	23,11	15,61	10,01
4/8/08	26,37	17,89	11,95	24,38	16,88	11,60
5/8/08	29,39	18,38	7,57	24,83	17,33	10,26
6/8/08	23,50	15,92	11,80	24,92	17,42	11,88
7/8/08	20,43	16,36	5,33	25,11	17,61	11,74
8/8/08	22,97	14,04	12,50	23,43	15,93	12,55
9/8/08	28,93	14,87	6,95	20,45	12,95	9,53
10/8/08	25,00	16,37	6,18	23,48	15,98	12,31



**Figura 64** Comparação da temperatura máxima para a tarde de “Amanhã”.



**Figura 65** Comparação da temperatura mínima para a tarde de “Amanhã”.



**Figura 66 Comparação da velocidade do vento para a tarde de “Amanhã”.**

Analisando os gráficos e a Tabela 4 pode-se calcular o erro médio das previsões efectuadas para a tarde do dia “Amanhã” através da equação  $e = \frac{\sum_{i=1}^n (Valor_{Real} - Valor_{previsão})}{n}$ .

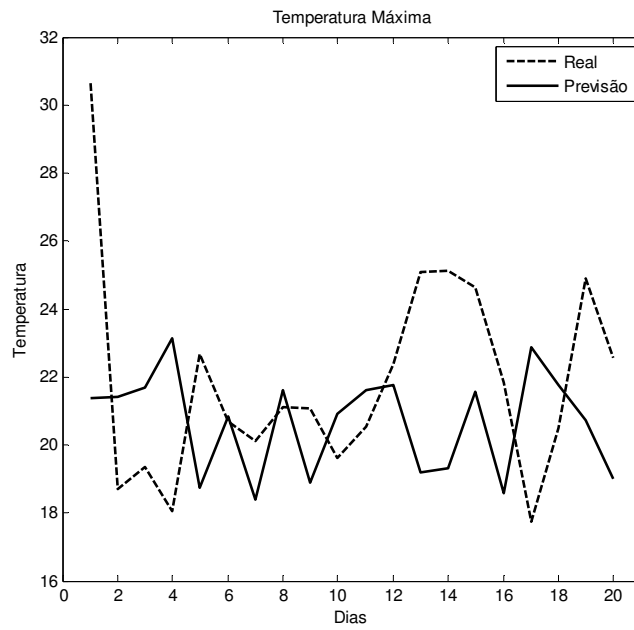
O erro médio para a temperatura máxima é de  $\pm 3,46$  °C, para a temperatura mínima é de  $\pm 1,49$  °C e para a velocidade do vento é de  $\pm 2,96$  Km/h.

Mais uma vez, a variação dos erros médios para os diferentes parâmetros, da tarde de amanhã, não são significativos quando comparados com a manhã desse dia ou mesmo com as do dia anterior.

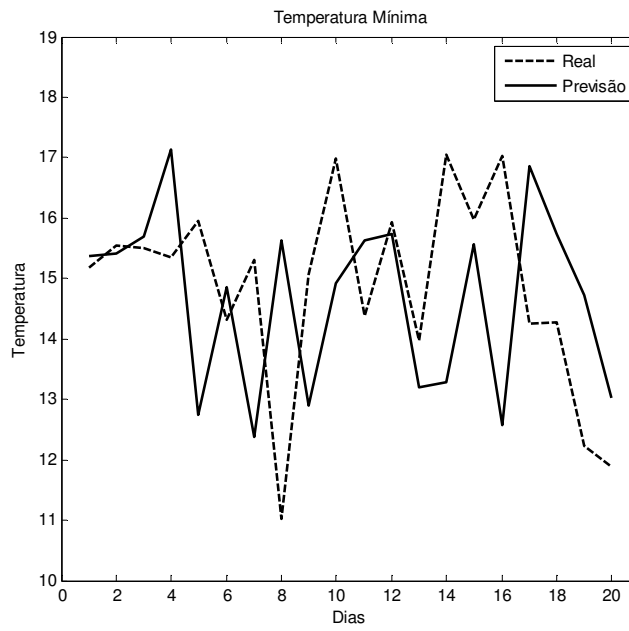
Em relação aos valores das previsões para a manhã do dia “Depois de Amanhã”, encontram-se registados na Tabela 5, assim como ao valores reais, podendo-se assim, efectuar uma comparação entre valores reais e valores da previsão e construir os gráficos abaixo ilustrados (Figura 67, 68, 69).

**Tabela 6** Valores reais e valores da previsão para a manhã de “Depois de Amanha”.

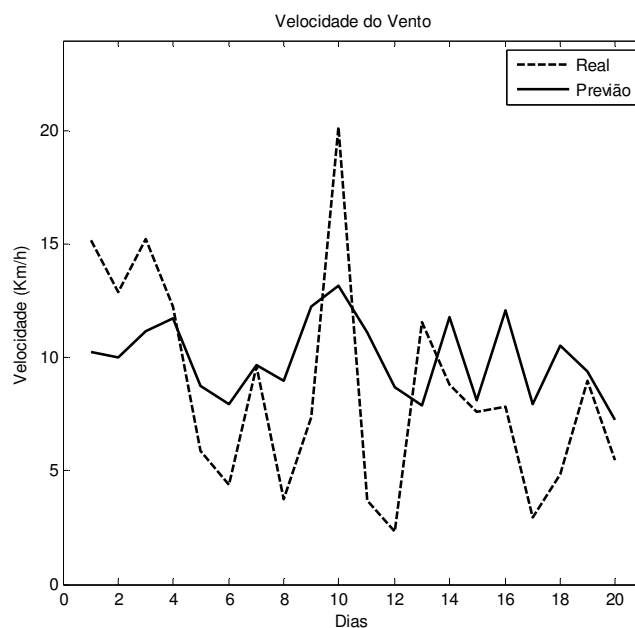
Data	Reais			Sistema Difuso		
	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]
22/7/08	30,65	15,18	9,94	21,37	15,37	10,25
23/7/08	18,68	15,54	8,22	21,42	15,42	9,99
24/7/08	19,34	15,51	10,05	21,68	15,68	11,16
25/7/08	18,05	15,35	9,17	23,13	17,13	11,76
26/7/08	22,68	15,95	7,68	18,75	12,75	8,75
27/7/08	20,7	14,31	6,99	20,86	14,86	7,97
28/7/08	20,11	15,30	8,44	18,39	12,39	9,70
29/7/08	21,11	11,02	6,76	21,62	15,62	8,99
30/7/08	21,08	15,06	8,49	18,89	12,89	12,26
31/7/08	19,63	16,99	9,60	20,92	14,92	13,19
1/8/08	20,54	14,38	10,36	21,62	15,62	11,11
2/8/08	22,38	15,94	6,77	21,75	15,75	8,69
3/8/08	25,09	13,97	9,43	19,20	13,20	7,88
4/8/08	25,14	17,06	10,00	19,29	13,29	11,80
5/8/08	24,62	15,98	12,28	21,57	15,57	8,13
6/8/08	21,82	17,03	10,32	18,57	12,57	12,10
7/8/08	17,74	14,25	10,39	22,87	16,87	7,97
8/8/08	20,51	14,28	8,03	21,75	15,75	10,54
9/8/08	24,91	12,22	10,02	20,73	14,73	9,36
10/8/08	22,56	11,89	11,02	19,02	13,02	7,28



**Figura 67** Comparação da temperatura máxima para a manhã de “Depois de Amanhã”.



**Figura 68** Comparação da temperatura mínima para a manhã de “Depois de Amanhã”.



**Figura 69** Comparação da velocidade do vento para a manhã de “Depois de Amanhã”.

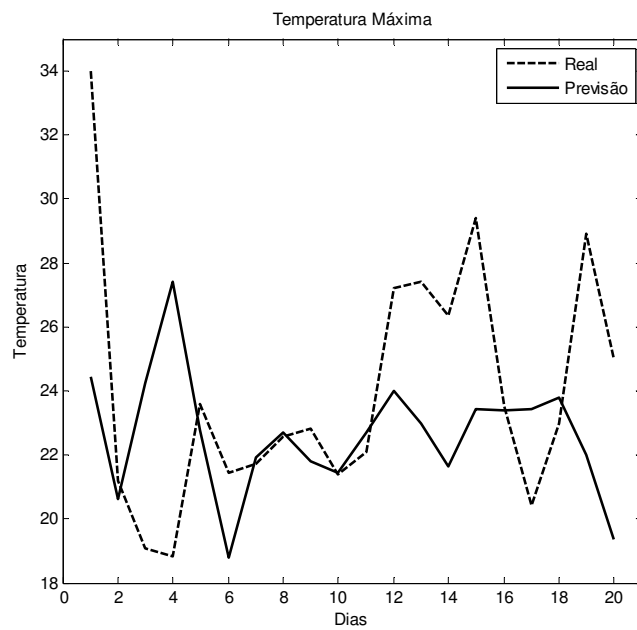
Mais uma vez, e pela análise da Tabela 5 e dos gráficos anteriores calculou-se o erro médio da previsão para a manhã do dia “Depois de Amanhã” e obteve-se um erro de  $\pm 3,15$  °C para a temperatura máxima, de  $\pm 1,82$  °C para a temperatura mínima e de  $\pm 4,18$  Km/h para a velocidade do vento.

Por fim, na Tabela 6 estão representados os valores referentes à tarde do dia de “Depois de Amanhã”. Os gráficos das Figura 70, 71, 72, foram criados com os valores da referida tabela para se poder analisar mais facilmente os resultados obtidos.

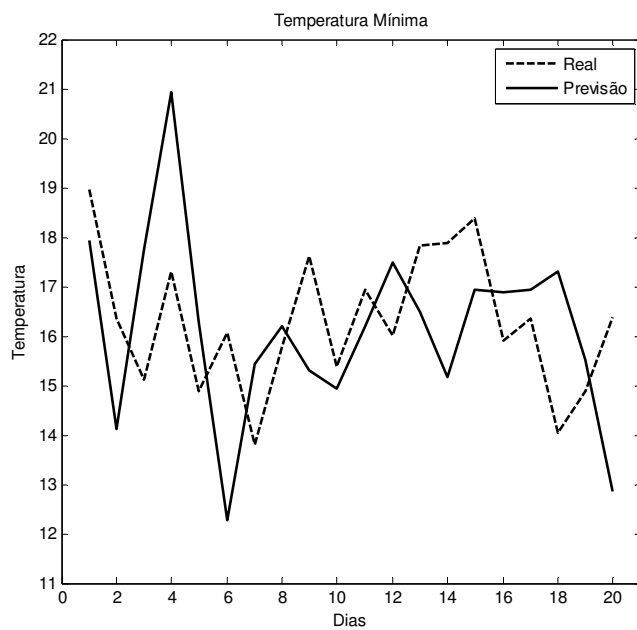
Com base na Tabela 6 e nos gráficos efectuados calculou-se o erro médio para a referida previsão, obtendo-se um erro de  $\pm 3,21$  °C para a temperatura máxima,  $\pm 1,81$  °C para a temperatura mínima e de  $\pm 3,36$  Km/h para a velocidade do vento.

**Tabela 7 Valores reais e valores da previsão para a tarde de “Depois de Amanha”.**

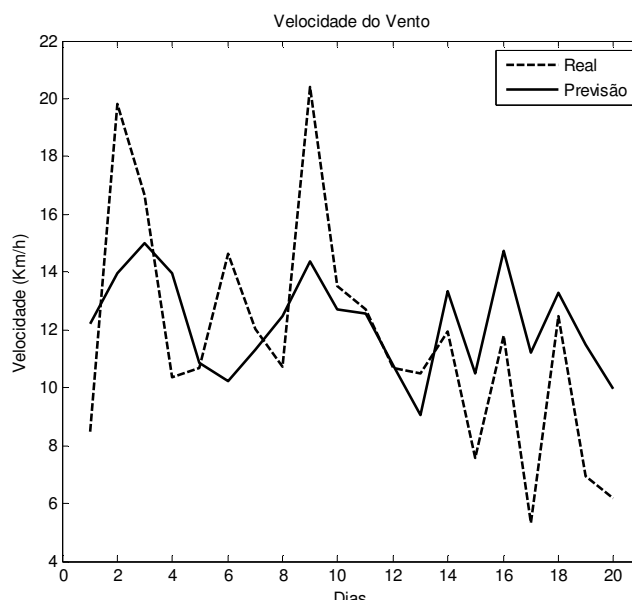
Data	Reais			Sistema Difuso		
	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]	T <sub>Máx</sub> [°C]	T <sub>Mín</sub> [°C]	Vento [km/h]
22/7/08	34,00	18,97	8,47	24,44	17,94	12,21
23/7/08	21,19	16,35	19,81	20,63	14,13	13,96
24/7/08	19,06	15,12	16,67	24,24	17,74	14,98
25/7/08	18,83	17,29	10,38	27,42	20,92	13,96
26/7/08	23,60	14,87	10,69	22,78	16,29	10,88
27/7/08	21,43	16,06	14,64	18,79	12,29	10,22
28/7/08	21,72	13,80	12,01	21,92	15,42	11,31
29/7/08	22,57	15,78	10,74	22,69	16,19	12,50
30/7/08	22,83	17,62	20,40	21,81	15,31	14,36
31/7/08	21,40	15,38	13,53	21,43	14,93	12,72
1/8/08	22,07	16,94	12,70	22,69	16,19	12,58
2/8/08	27,20	16,01	10,67	23,98	17,48	10,77
3/8/08	27,40	17,83	10,51	22,99	16,49	9,05
4/8/08	26,37	17,89	11,95	21,63	15,17	13,33
5/8/08	29,39	18,38	7,57	23,43	16,93	10,52
6/8/08	23,50	15,92	11,80	23,39	16,89	14,72
7/8/08	20,43	16,36	5,33	23,43	16,93	11,22
8/8/08	22,97	14,04	12,50	23,80	17,30	13,30
9/8/08	28,93	14,87	6,95	22,02	15,52	11,49
10/8/08	25,00	16,37	6,18	19,34	12,84	9,98



**Figura 70** Comparação da temperatura máxima para a tarde de “Depois de Amanhã”.



**Figura 71** Comparação da temperatura mínima para a tarde de “Depois de Amanhã”.



**Figura 72 Comparação da velocidade do vento para a tarde de “Depois de Amanhã”.**

A realização de uma previsão meteorológica não é um processo simples e exacto, já que implica obter um resultado futuro de fenómenos muito instáveis e com um elevado índice de variação em pequenos períodos de tempo. No entanto, o sistema desenvolvido apresenta resultados bastante bons, apesar de possuir um erro não nulo que é normal em sistemas de previsão meteorológicos. Contudo, é de referir que a previsão da velocidade do vento é a que possui o erro mais elevado, devido às grandes variações que lhe são inerentes, como aliás se pode constatar através da análise dos gráficos (Figuras 60, 63, 66, 69, 72), o que se traduz por uma não linearidade muito elevada.

Mais, pela análise dos valores dos erros para todos estes gráficos, pode-se concluir que o sistema difuso desenvolvido é robusto para qualquer uma das previsões para os três dias, pelo que se pode concluir, que com pequenos ajustes ao algoritmo desenvolvido para dois dias após o actual, se iriam obter previsões também bastante razoáveis. No entanto, e devido à evolução inerente às previsões a longo prazo, é de prever que o algoritmo deste controlador com lógica difusa a um maior número de dias, iria ter como consequência um aumento do erro entre os valores obtidos por este método e os reais, o que os tornaria menos fiáveis. Esta conclusão vai, de qualquer forma, de encontro aos conceitos teóricos já expostos nos capítulos anteriores, ou seja que a previsão para mais de 10 dias será uma previsão probabilística, pelo que automaticamente será menos realista.



## 6. CONCLUSÕES

O ser humano transmite a sua experiência através de linguagens verbais ou escritas. Desta forma, para ser possível a representação das experiências vividas através de sistemas computacionais, foi necessário criar uma metodologia capaz de representar numericamente a experiência humana. Foi assim, que surgiram os sistemas de controlo difuso, que se baseiam na linguagem verbal e a convertem numa linguagem numérica, capaz de ser manipulada computacionalmente. O princípio de funcionamento destes sistema, usufrui de um universo de regras, que maioritariamente têm uma correspondência linguística estabelecida pela teoria dos conjuntos difusos, que definem o grau de verdade ou de falsidade de uma afirmação em relação a um determinado conjunto.

A meteorologia é a ciência que estuda os fenómenos atmosféricos, baseando-se em conceitos bastante vagos, pelo que consequentemente, também fornece informações muito vagas e algumas vezes resultantes do senso comum do ser humano. Assim sendo, optou-se por criar um modelo de previsão meteorológica que com o menor erro possível, fornece-se o estado meteorológico para um ou vários dias, recorrendo à inferência difusa que tem como suporte os conceitos da lógica e do controlo difuso.

Na aplicação desenvolvida optou-se por disponibilizar a previsão do estado do tempo para no máximo três dias, isto devido às previsões superiores a três ou quatro dias não serem de grande fiabilidade, independentemente do sistema de previsão que seja usado.

Desta forma, as previsões fornecidas dizem respeito ao dia actual e aos dois dias imediatamente a seguir. Caso a previsão seja efectuada para o dia em que o utilizador se encontra, é apresentada a temperatura máxima, média, mínima e a velocidade do vento, assim como, uma imagem que traduz o estado do tempo (exemplo: nublado, chuva, aguaceiros, etc.). Nos dois dias seguintes é apresentado, tanto para a manhã como para a tarde, a temperatura máxima, mínima e a velocidade do vento e a imagem que traduz o estado do tempo.

Para o estudo da fiabilidade do sistema foi efectuada a comparação dos resultados obtidos através do sistema difuso com os valores reais provenientes de uma estação meteorológica. Podemos constatar que se obtiveram previsões bastante boas, apesar de possuir um erro que é inevitável a qualquer sistema de previsão. É de salientar, que os valores reais que serviram de apoio a este sistema são oriundos da região da Galiza, que é caracterizada por fenómenos atmosféricos inconstantes nomeadamente a nível da velocidade do vento.

## **6.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Esta secção identifica alguns aspectos do sistema de previsão meteorológica que podem vir a ser melhorados.

O desempenho de um sistema difuso depende essencialmente da sua base de regras, do tipo de agregação, do tipo de colapsagem, do número de conjuntos difusos, do tipo de inferência e do tipo de funções de pertença. Assim, para o melhoramento do desempenho de um sistema difuso será necessário fazer ajustes nos referidos parâmetros.

Numa primeira fase, deverão ser acrescentados mais conjuntos difusos para cada variável de entrada e conseqüentemente fazer um ajuste na base de regras de forma a melhorar a resposta do sistema. Em relação aos outros parâmetros de desempenho de um sistema difuso não será necessário fazer qualquer alteração significativa, já que as opções escolhidas são as que se revelaram melhores para o problema em questão, pois foi com elas que se obtiveram os resultados mais aproximados aos reais, depois de efectuados vários ensaios e testes.

Um outro aspecto importante que deverá ser implementado é o acesso remoto ao sistema através da *web*, deixando o sistema de estar limitado apenas a uma máquina (computador).

Uma solução que poderá ser adoptada é colocar a base do sistema desenvolvido a ‘correr’ num servidor e criar o ambiente gráfico de interface utilizador/sistema numa aplicação *web*,

em que os comandos e as respostas são disponibilizados pelo sistema numa página de Internet.

A previsão foi baseada e comparada com valores reais de uma estação meteorológica da região da Galiza que, apesar de não ser uma região muito afastada do território português revela fenómenos atmosféricos bastante adversos, o que leva, a que as previsões efectuadas por este sistema de previsão meteorológica não sejam válidas para o território nacional, mesmo para a região norte do país. Uma boa solução seria utilizar valores obtidos em estações meteorológicas nacionais de forma a que as previsões refletissem o estado do tempo para Portugal e nomeadamente para a zona norte. Uma outra solução para este problema, já que os dados meteorológicos em Portugal não são de fácil acesso, por razões alheias a este trabalho, seria efectuar um estudo aprofundado sobre as diferenças entre os fenómenos atmosféricos da Galiza e as diferentes regiões de Portugal e adaptar o sistema difuso desenvolvido de forma a utilizar valores lidos na Galiza e fazer a previsão para as regiões de Portugal.



## Referências Documentais

- (<http://www.meteogalicia.es/galego/observacion/estacions/estacionsActual.asp?Nest=10124>).
- Barabalho, Valéria M. S.—*Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Difusa para Simulação do Processo Chuva-Vazão*. Tese de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2001.
- Barros, Laécio Carvalho—*Teoria Fuzzy X Biomatemática – Tese de Mestrado – IMECC-UNICAMP*, 2001.
- Coelho, Bruno F. V. M.—*Modelo de Previsão da Evolução do Biodiesel no Brasil Utilizando Lógica Fuzzy*. Rio de Janeiro, 2007, Brasil.
- Gomide, F., Rocha, A.—*Neurofuzzy Components Based on Threshold- IFAC SICICA Symposium*, Malaga, Espanha, 1992-c.pp.425-430.
- Jantzen, Jan—*Design of Fuzzy Controllers*, Denmark, 1998.
- Lopes, Maria — *Uso das Metodologias Promethee e F. Promethee na Avaliação de Clientes*. Tese de Pós-Graduação em Engenharia – Programação Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005.
- Luna, Guillermo M.—*Elementos de lógica difusa*. 2000. CINVESTAV-IPN.
- Matlab—*The Language of Technical Computing*, version 7.3.0.267(R2006b), The MathWorks, 2006.
- Miranda, Vladimiro— *Fundamentos de Controlo Difuso*, Porto, 1998
- Oliveira, Paulo J. C. Ramalho—*Supervisão de Controladores*, Lisboa, 1991.
- Ortega, Neli Regina Siqueira— *Aplicação de Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina – Tese de Doutorado*, Brasil, 2001.
- Romão, Wesley, Outros—*Algoritmos Genéticos e Conjuntos Difusos Aplicados ao Controle de um Processo Técnico*, Brasil.
- Satellites, Small: 1960-1969 from the Surrey Satellite Technology Ltd website.
- Souza, Nelson —*Controladores Lógico Difusos: uma alternativa para o controlo de processos industriais críticos*. Santa Catarina, Brasil, 2000.
- Zanette, Adriano, RADANOVITSCK, Eduardo Aguiar, GONÇALVES, William Wolmann—*Fuzzy Logic*, Brasil, 2006.

