



*INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA*

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Controladores Linguísticos Fuzzy**

**Andrei João Ribeiro de Sousa**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

**Orientador:**  
Doutor João Manuel Ferreira Calado

**Júri:**  
Presidente: Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio  
Vogais:  
Doutora Ana Maria Dias Madureira Pereira  
Doutor João Manuel Ferreira Calado

**Setembro de 2014**

## **Resumo**

Este trabalho tem o objetivo de estudar a utilização de controladores linguísticos Fuzzy, analisando o seu desempenho, relativamente ao uso de controladores clássicos do tipo PID.

Para a realização deste trabalho foi desenvolvido, como banco de ensaio, um processo de mistura de água fria e água quente, com duas malhas de controlo, uma para controlo do nível através da válvula de controlo da água fria e outra para controlo da temperatura através da válvula de controlo da água quente, provocando o acoplamento de efeitos entre as duas malhas de controlo, sendo assim um sistema não linear.

Foram estudados e implementados vários controladores Fuzzy, com diferentes estratégias de controlo implementadas através de vários conjuntos de regras heurísticas, estabelecendo uma comparação entre eles e relativamente à utilização de controladores clássicos do tipo PID, através da realização de diversos ensaios. O sucesso obtido com o controlo linguístico Fuzzy sugere que é uma alternativa robusta comparativamente ao controlo clássico, quando estamos perante um sistema de comportamento complexo com acoplamento de efeitos. Com as metodologias clássicas de controlo não é possível desacoplar os efeitos hipoteticamente existentes entre malhas de controlo e pretendeu-se com esta dissertação mostrar as vantagens da utilização do controlo linguístico Fuzzy, para este caso, diminuindo ou eliminando o “overshoot”, conseguindo um menor tempo de estabelecimento dos “set point” de uma forma estável e com a diminuição ou eliminação do acoplamento de efeitos.

Neste estudo o processo é simulado e controlado utilizando a plataforma computacional LabView.

## **Palavras-chave**

Lógica Fuzzy; conjuntos fuzzy; controlo linguístico fuzzy; malha de controlo; mecanismo de inferência; controlo PID.

## **Abstract**

This dissertation aims the study of use Fuzzy linguistic controllers, analyzing the performance, regarding the use of the classic PID controllers.

For this work was developed, as a test bed, a process of mixing cold and hot water, with two control loops, one for level control through a control valve of cold water and for temperature control through other control valve of hot water, causing the coupling effects between the two control loops, is thus a non-linear system.

Were studied and implemented the various Fuzzy controllers, with different control strategies implemented through multiple sets of heuristic rules, establishing a comparison between them and the use of classic PID controllers, by performing several tests. The success achieved with the Fuzzy linguistic controller suggests that is a robust alternative compared with the classical PID control, when we are dealing with a complex behavior system with coupling effects. With classical control methods is not possible decouple the effects hypothetically existing between the meshes of control and it was intended with this dissertation show the advantages of the use of Fuzzy linguistic control, in this case, reducing or eliminating the overshoot, achieving a shorter time of establishing a stable set point and decreasing or eliminating the effects of coupling effects.

In this study the process is simulated and controlled using the computing platform LabView.

## **Keywords**

Fuzzy logic; Fuzzy sets; Fuzzy linguistic controllers; feedback control loop; inference mechanism; PID controlers.

## **Agradecimentos**

Desde já agradeço à instituição ISEL por todo o conhecimento de qualidade aqui adquirido, para lidar com diversos assuntos de caráter prático transversais à engenharia mecânica, possibilitando mais facilmente uma integração em diferentes áreas no mercado de trabalho, assim como a oportunidade de acesso a uma escolha variada para a dissertação/trabalho de projeto.

De grande relevo ao desenvolvimento desta dissertação destaco o meu orientador, o Professor João Calado, que, sempre disponível e com grande objetividade me ajudou a compreender e a ser capaz de desenvolver esta dissertação.

Obviamente, agradeço aqui também aos meus familiares por me incentivarem e compreenderem a importância do tempo despendido na realização desta dissertação.

## **Publicações**

Calado, J. M. F. e Sousa, A., “Fuzzy Linguistic Controllers Applied to Decouple Control Loop Effects”, Proc. of Sixth World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC2014), Porto, Portugal, 30 de julho a 1 de agosto de 2014, pp. 109-114, ISBN: 978-1-4799-5937-2.

Calado, J. M. F. e Sousa, A., “Decoupling Control Loop Effects Based on a Fuzzy Logic Approach”, Control Engineering Practice (em preparação para ser submetido).

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1</b> – Diagrama de um sistema Fuzzy .....	7
<b>Figura 2.2</b> – Fronteira Fuzzy na forma gráfica .....	8
<b>Figura 2.3</b> – Funções de pertença do conjunto Fuzzy “pessoas altas” .....	9
<b>Figura 2.4</b> – Funções de pertença: (a) sino; (b) sino achatada; (c) triangular; (d) trapezoidal; (e) retangular; (f) “singleton”; (g) curva “S” linearizada; (h) família das curvas lineares; (i) família de curvas não-lineares. ....	9
<b>Figura 2.5</b> – Funções de pertença $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ .....	10
<b>Figura 2.6</b> – Função de pertença $\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \mu_{A \cap B}$ .....	10
<b>Figura 2.7</b> – Função de pertença $\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \mu_{A \cup B}$ .....	10
<b>Figura 2.8</b> – Função de pertença $\mu_{\bar{A}}(x)$ .....	11
<b>Figura 2.9</b> – Esquema do exemplo, com duas entradas, três regras e uma saída .....	14
<b>Figura 2.10</b> – Funções de pertença, das duas entradas (serviço e refeição) e da saída (gorjeta).....	14
<b>Figura 2.11</b> – Fuzificação da entrada 1, utilizada na 1ª regra.....	15
<b>Figura 2.12</b> – Aplicação da operação Fuzzy “ou”, com as duas entradas já fuzificadas (serviço e refeição) .....	15
<b>Figura 2.13</b> – Implicação com o operador min.....	16
<b>Figura 2.14</b> – Funcionamento do mecanismo de inferência .....	17
<b>Figura 2.15</b> – Desfuzificação através do centróide.....	17
<b>Figura 2.16</b> – Funcionamento do mecanismo de inferência incluindo a desfuzificação .....	18
<b>Figura 3.1</b> – Controlo com pêndulo centrífugo, século XVIII, à esquerda um esquema simplificado, à direita uma fotografia de parte do sistema [32] .....	20
<b>Figura 3.2</b> – Diagrama de controlo em malha aberta .....	21
<b>Figura 3.3</b> – Diagrama de controlo em malha fechada .....	21
<b>Figura 3.4</b> – Resposta da variável controlada $c(t)$ a uma variação em degrau na variável de controlo $u(t)$ .....	24
<b>Figura 3.5</b> – Diagrama do controlador Fuzzy em malha fechada .....	27
<b>Figura 3.6</b> – Estrutura típica de uma rede neuronal de 3 camadas.....	29
<b>Figura 4.1</b> – Diagrama do processo de mistura .....	32
<b>Figura 4.2</b> – Características das válvulas de controlo .....	35
<b>Figura 4.3</b> – Malhas de controlo implementadas.....	37
<b>Figura 4.4</b> – Diagrama do processo simulado no LabView .....	37
<b>Figura 5.1</b> – Resposta do nível do tanque 2, H2, para uma variação em degrau do caudal de água fria ....	39
<b>Figura 5.2</b> – Resposta da temperatura no tanque 2, T2, para uma variação em degrau do caudal de água quente .....	40
<b>Figura 5.3</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (PID) .....	41
<b>Figura 5.4</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (PID) .....	42
<b>Figura 5.5</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (PID) .....	42
<b>Figura 5.6</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (PID) .....	43
<b>Figura 5.7</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (PID).....	43
<b>Figura 5.8</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (PID).....	44
<b>Figura 5.9</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (PID).....	44
<b>Figura 5.10</b> – Resposta da malha de controlo de nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (PID).....	45
<b>Figura 6.1</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertença para caracterização do <i>erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 9 regras .....	48
<b>Figura 6.2</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertença para caracterização da <i>variação do erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 9 regras .....	48
<b>Figura 6.3</b> – Funções de pertença da variação do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 9 regras .....	48

<b>Figura 6.4</b> – Bloco de pré-processamento para a variável linguística Fuzzy <i>erro</i> na malha de controlo de L2 .....	50
<b>Figura 6.5</b> – Bloco de pré-processamento para a variável linguística Fuzzy <i>variação do erro</i> na malha de controlo de L2 .....	50
<b>Figura 6.6</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 9 regras) .....	51
<b>Figura 6.7</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 9 regras) .....	51
<b>Figura 6.8</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 9 regras) .....	52
<b>Figura 6.9</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 9 regras) .....	52
<b>Figura 6.10</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 9 regras) .....	53
<b>Figura 6.11</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 9 regras) .....	53
<b>Figura 6.12</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 9 regras) .....	54
<b>Figura 6.13</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 9 regras) .....	54
<b>Figura 6.14</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do <i>erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 15 regras .....	55
<b>Figura 6.15</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização da <i>variação do erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 15 regras .....	56
<b>Figura 6.16</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 15 regras .....	56
<b>Figura 6.17</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 15 regras) .....	57
<b>Figura 6.18</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 15 regras) .....	57
<b>Figura 6.19</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm .....	58
<b>Figura 6.20</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm .....	58
<b>Figura 6.21</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 15 regras) .....	59
<b>Figura 6.22</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 15 regras) .....	59
<b>Figura 6.23</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 15 regras) .....	60
<b>Figura 6.24</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 15 regras) .....	60
<b>Figura 6.25</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do <i>erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 25 regras .....	61
<b>Figura 6.26</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização da <i>variação do erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 25 regras .....	62
<b>Figura 6.27</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 25 regras .....	62
<b>Figura 6.28</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 25 regras) .....	63
<b>Figura 6.29</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 25 regras) .....	63
<b>Figura 6.30</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 25 regras) .....	64
<b>Figura 6.31</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 25 regras) .....	64
<b>Figura 6.32</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 25 regras) .....	65
<b>Figura 6.33</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 25 regras) .....	65

<b>Figura 6.34</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 25 regras).....	66
<b>Figura 6.35</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 25 regras).....	66
<b>Figura 6.36</b> – Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertença para caraterização do <i>erro</i> , da <i>variação do erro</i> do nível ou da temperatura do tanque 2, da <i>variação</i> do nível ou temperatura do tanque 1, do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 27 regras.....	68
<b>Figura 6.37</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras) .....	69
<b>Figura 6.38</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras) .....	69
<b>Figura 6.39</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 27 regras) .....	70
<b>Figura 6.40</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 27 regras) .....	71
<b>Figura 6.41</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 27 regras).....	71
<b>Figura 6.42</b> – Resposta da malha de controlo nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 27 regras).....	72
<b>Figura 6.43</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 27 regras).....	72
<b>Figura 6.44</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 27 regras).....	73
<b>Figura 6.45</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional) .....	74
<b>Figura 6.46</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional) .....	75
<b>Figura 6.47</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50 cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional) .....	75
<b>Figura 6.48</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50 cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional) .....	76
<b>Figura 6.49</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional).....	76
<b>Figura 6.50</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional).....	77
<b>Figura 6.51</b> – Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional).....	77
<b>Figura 6.52</b> – Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional) .....	78

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> — Propriedades das operações básicas, dos conjuntos $a$ e $b$ .....	11
<b>Tabela 6.1</b> — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 9 regras .....	49
<b>Tabela 6.2</b> — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 15 regras .....	56
<b>Tabela 6.3</b> — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 25 regras .....	62
<b>Tabela 6.4</b> — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 27 regras .....	68

## Glossário/Nomenclatura/Lista de Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

A1	Área da secção transversal do Tanque 1
A2	Área da secção transversal do Tanque 2
AF	<i>Água Fria</i>
AQ	Água Quente
C	Calor específico da água
H1	Nível da água no Tanque 1
H2	Nível da água no Tanque 2
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
Q12	Caudal de água do Tanque 1 para o Tanque 2
Q2E	Caudal de água do Tanque 2 para o Exterior
SP	Set Point
T1	Temperatura da água no Tanque 1
T2	Temperatura da água no Tanque 2
TF	Temperatura da Água Fria
TQ	Temperatura da Água Quente
VCAF	Válvula de Controlo da Água Fria
VCAQ	Válvula de Controlo da Água Quente
VP	Variável de Processo

Lista de símbolos

$\rho$	Massa específica da água
$\mu$	Grau de pertença

# Índice

<b>Capítulo 1</b> .....	1
<b>Introdução</b> .....	1
1.1 - Introdução.....	1
1.2 - Objetivos .....	2
1.3 - Motivação.....	3
1.4 - Estrutura do documento.....	3
<b>Capítulo 2</b> .....	5
<b>Sistemas Fuzzy</b> .....	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Conjuntos e Operações com Conjuntos Fuzzy.....	7
2.3 - Entradas/Saídas de Sistemas Fuzzy.....	11
2.4 - Base de Conhecimento, Mecanismo de Inferência e Desfuzificação .....	12
<b>Capítulo 3</b> .....	19
<b>Controlo Automático de Processos</b> .....	19
3.1 - Introdução.....	19
3.2 - Controlo em Sistemas Contínuos .....	19
3.3 - Controladores PID .....	22
3.4 - Controladores Linguísticos Fuzzy.....	25
3.5 - Outro Tipo de Controladores Inteligentes .....	28
3.6 - Conclusões .....	30
<b>Capítulo 4</b> .....	31
<b>O Processo de Mistura</b> .....	31
4.1 - Introdução.....	31
4.2 - Descrição do Processo.....	31
4.3 - Modelo Dinâmico .....	32
4.4 - Malhas de Controlo.....	36
<b>Capítulo 5</b> .....	38
<b>Controlo do Processo de Mistura Usando Controladores PID</b> .....	38
5.1 - Introdução.....	38
5.2 - Ajuste dos Parâmetros dos Controladores .....	38
5.3 - Desempenho dos Controladores.....	41
5.4 - Conclusões .....	45
<b>Capítulo 6</b> .....	46
<b>Controlo do Processo de Mistura Usando Controladores Fuzzy</b> .....	46
6.1 - Introdução.....	46
6.2 - Conhecimento Usado para Gerar Regras Heurísticas.....	47
6.3 - Relações Causais das Variáveis de Processo para Gerar Regras Heurísticas.....	67
6.4 - Conclusões .....	78
<b>Capítulo 7</b> .....	80
<b>Conclusões</b> .....	80
Referências Bibliográficas/Bibliografia.....	83



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 - Introdução

Desde o século XVI que tem vindo a ser construído o conhecimento científico como atualmente é conhecido. Dos cientistas mais influentes nesta construção, destacam-se: Newton, Darwin, Durkheim, Lavoisier, Adam Smith, que trabalharam e viveram entre o século XVIII e o início do século XX. Dos seus trabalhos resultou o paradigma científico dominante, que procura um conhecimento objetivo, universal e determinista. Apesar do seu sucesso, aplicado na tecnologia corrente, este paradigma tem vindo a ser posto em causa nas últimas décadas. Este colapso do paradigma dominante resulta de um conjunto de novos conhecimentos científicos, dos quais se destaca: a Relatividade da Simultaneidade de Einstein, o Princípio da Incerteza de Heisenberg, o Teorema da Incompletude de Gödel e a nova abordagem da complexidade em sistemas dinâmicos não lineares [1].

A complexidade de determinados problemas com características específicas necessita de uma abordagem significativamente diferente, de uma nova perspetiva, relativamente aos métodos tradicionais. Uma das abordagens, que nas últimas quatro décadas tem vindo a ser cada vez mais reconhecida como a solução para muitos problemas de diversas áreas científicas, é hoje conhecida como “*Theory of Fuzzy Sets*” [2]. Esta teoria aparenta ter aparecido nos anos 60, embora a expressão francesa “ensemble flou” tivesse sido utilizada por Menger em 1951, na análise probabilística, ao que hoje é designada pela operação *max-product*.

Os conjuntos Fuzzy e a lógica Fuzzy permitem tratar situações como, simulação de interação entre humanos, entre humanos e máquinas ou entre máquinas. Situações de grande complexidade, incerteza, variáveis linguísticas e regras linguísticas, interação entre homem máquina, são temáticas relacionadas com os Sistemas Linguísticos. Esta área do conhecimento está também subjacente à implementação de metodologias de controlo de sistemas baseado em conceitos Fuzzy, onde atualmente

surgem cada vez mais aplicações, desde pequenos eletrodomésticos até soluções para problemas específicos na indústria.

A primeira aplicação prática com a utilização da teoria dos conjuntos Fuzzy, no domínio do controlo de sistemas, foi desenvolvida por Mamdani e Assilian [3]. Os mencionados autores publicaram o artigo clássico intitulado “*An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller*”, onde é apresentado como as principais operações da lógica Fuzzy podem ser utilizadas de forma eficiente e eficaz na modelação e controlo de sistemas, que na altura não era possível tratar adequadamente através das técnicas convencionais.

A lógica Fuzzy é amplamente utilizada em diversas áreas científicas [4][5][5], obviamente na engenharia mecânica para controlo de sistemas [6][7][8], engenharia eletrotécnica [9], na modelação de fenómenos espaço-temporais [10], tomada de decisão inteligente [11][12] [11], medicina [13], gestão ativos financeiros [14][14], gestão energia [15], alterações climáticas [16][16], ensino [17], química [18], entre muitas outras. Esta abordagem emergente tem dado origem a milhares de artigos científicos, que refletem a evolução na aplicação da lógica Fuzzy à resolução de problemas nos mais diversos domínios de conhecimento.

A dissertação aqui desenvolvida tem o objetivo de demonstrar as vantagens, sem nunca esquecer as desvantagens, da aplicação do controlo Fuzzy em relação às metodologias de controlo clássico, nomeadamente utilizando controladores com ações de controlo proporcional+integral+derivativo (PID), principalmente para sistemas não lineares e com acoplamento de efeitos entre diferentes malhas de controlo. Será utilizado como banco de ensaio, um processo de mistura de água fria e água quente, com duas malhas de controlo, em que uma das malhas servirá para controlar o nível através do controlo do caudal proveniente da válvula de água fria, a 20°C, e a outra malha para controlo da temperatura, através do caudal proveniente da válvula de água quente, a 80°C, observando-se acoplamento de efeitos entre elas.

## **1.2 - Objetivos**

Esta dissertação tem como principal objetivo a aprendizagem relativamente à conceção de controladores linguísticos Fuzzy e ajuste dos seus parâmetros, compreender as vantagens e desvantagens deste tipo de controlo face às metodologias de controlo clássico, bem como sentir as dificuldades reais na sua implementação.

Pretende-se demonstrar uma das grandes vantagens desta metodologia do controlo, a cuja implementação está subjacente a lógica Fuzzy, ou seja, serão desenvolvidos controladores linguísticos Fuzzy em que se pretende obter desacoplamento de efeitos entre diferentes malhas de controlo. Para comparação de resultados e avaliação do desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy desenvolvidos, as duas malhas de controlo acima mencionadas foram implementadas recorrendo a controladores clássicos do tipo PID de modo a gerar resultados de referência.

### **1.3 - Motivação**

Desde que completei a Licenciatura em 2006, desenvolvi, como hobby, a aquisição de conhecimentos de programação de microcontroladores com o objetivo de adquirir competências acerca do controlo de máquinas e sistemas. Criei uma interface com várias entradas e saídas de dados entre um microcontrolador e a plataforma computacional LabView, construí uma impressora 3D aproveitando o movimento “*open source*” nesta área, assim como muitas outras pequenas experiências. Embora o microcontrolador “Arduíno” seja um dos mais conhecidos e fáceis de programar, sempre preferi o “Propeller” da empresa Parallax, pois permite o controlo de 8 processos em paralelo, o que para controlo de máquinas e sistemas tem vantagens, sendo este também relativamente fácil de programar.

Embora seja possível criar muitas soluções com o conhecimento até aqui adquirido, era para mim óbvio que para poder desenvolver projetos mais elaborados de controlo de sistemas teria que adquirir conhecimentos teórico-práticos relativamente à teoria de controlo e fundamentalmente no que se refere às metodologias de controlo inteligente. Em conversa com o Professor João Calado foi-me sugerida esta dissertação, em que inicialmente gostaria de ter aplicado o controlo Fuzzy diretamente num microcontrolador [19]. Todavia o meu conhecimento da teoria subjacente a este tipo de controlo não era nenhum, apenas tinha ouvido falar, pelo que era assim necessário utilizar inicialmente uma abordagem mais simples que me permitisse adquirir conhecimento, antes de querer implementá-lo diretamente num microcontrolador. A utilização da plataforma computacional LabView foi assim a melhor opção, uma vez que já tinha alguns conhecimentos desta linguagem gráfica de programação.

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação tornava-se claro que tinha escolhido o tema correto e do qual desconhecia completamente as suas grandes vantagens face ao controlo clássico e desvantagens que também são muito importantes, nomeadamente por se tratar de uma metodologia de controlo que permite lidar com situações em que as metodologias de controlo clássico não tem revelado um desempenho aceitável. Para além disso este tema tem um interesse enorme para todas as áreas científicas e até mesmo do ponto de vista filosófico.

Espero ter a oportunidade de num futuro próximo poder aplicar este conhecimento a outros projetos.

### **1.4 - Estrutura do documento**

No capítulo 2 é efetuada uma abordagem teórica aos sistemas linguísticos Fuzzy e à sua conceção em geral, sendo também analisado o caso particular dos controladores linguísticos Fuzzy, onde será apresentado todo o conhecimento necessário para a sua compreensão. No capítulo 3 enquadra-se esta solução nas diferentes técnicas de controlo existentes.

No capítulo 4 é descrito o processo utilizado como caso de estudo, obtido o correspondente modelo dinâmico utilizado na sua simulação. São ainda definidas as malhas de controlo utilizadas na implementação do controlo automático do processo, bem como é apresentada a implementação da correspondente simulação utilizando a plataforma computacional LabVIEW.

O 5º capítulo descreve como foi aplicado o controlo clássico utilizando controladores PID, para efeitos de comparação de resultados e avaliação de desempenho dos controladores Fuzzy desenvolvidos. É efetuada uma abordagem ao 1º método de Ziegler-Nichols, utilizado para efetuar o ajuste dos parâmetros dos controladores PID utilizados, sendo também apresentados os resultados obtidos.

O 6º capítulo aborda a conceção e implementação de controladores linguísticos Fuzzy, sendo utilizadas duas metodologias para gerar as regras heurísticas responsáveis pela implementação da estratégia de controlo dos controladores, em que na primeira as regras heurísticas são obtidas a partir de conhecimento e na segunda metodologia são geradas a partir de relações causais entre as variáveis de processo. É ainda efetuada uma avaliação de desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy concebidos e implementados.

No capítulo 7 são apresentadas algumas conclusões relativamente aos trabalhos realizados e resultados obtidos, bem como, delineadas algumas linhas de trabalho futuro no âmbito do domínio do conhecimento em apreço.

## Capítulo 2

### Sistemas Fuzzy

#### 2.1 - Introdução

Quando comparadas as ciências exatas com as ciências humanas, grande parte dos potenciais conflitos entre elas foi superada pela extensão da “*Fuzzy Set Theory*”, por um novo campo de pesquisa chamado “*approximate reasoning*” [20][21][22][50]. A lógica Fuzzy foi pela primeira vez referida por Lotfi A. Zadeh da Universidade da Califórnia em Berkeley no ano 1965 [2]. Zadeh elaborou em 1973 um artigo onde introduz o conceito das “variáveis linguísticas”, estabelecendo neste artigo os conjuntos Fuzzy das respectivas variáveis. Um outro estudo que se seguiu, foi com a primeira aplicação industrial num forno de cimento construído na Dinamarca em 1975. Posteriormente foram desenvolvidas no Japão diversas aplicações de sistemas Fuzzy. Em 1988 foi criado o “*Laboratory for International Fuzzy Engineering (LIFE)*”, onde 48 companhias cooperaram no desenvolvimento da investigação nesta área, em que apenas a Volkswagen foi a única empresa estrangeira a participar neste programa que teve a duração de 3 anos.

A lógica Fuzzy é uma extensão da lógica booleana tradicional, que através de variáveis linguísticas permite expressar valores lógicos intermédios entre o falso e o verdadeiro, permitindo descrever com maior eficácia a incerteza do mundo real.

Esta abordagem é baseada em dois conceitos fundamentais:

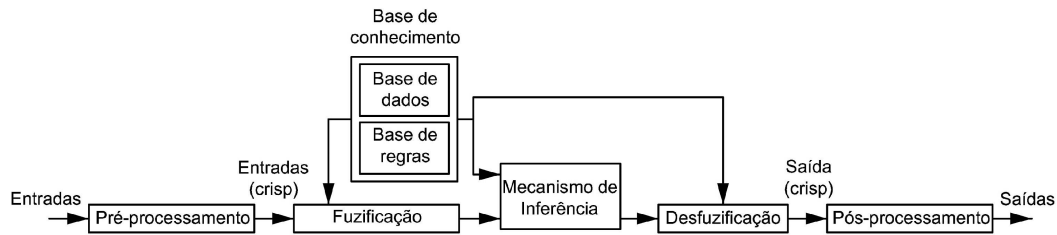
- a) Uma variável linguística é definida por palavras ou expressões em linguagem natural (por exemplo: “idade” pode ser vista como uma variável linguística se os seus valores forem “jovem”, “velho”, etc.);
- b) As regras de inferência e as operações Fuzzy, que nos permitem chegar a uma conclusão a partir de premissas caracterizadas por algum grau de incerteza.

Esta abordagem, genericamente lida bem com ruído, inexactidão dos parâmetros do processo e imprecisão das leituras das variáveis do processo.

Os conjuntos Fuzzy e a lógica Fuzzy não tratam apenas estes assuntos mas também áreas de simulação em computador entre humanos, entre humanos e máquinas ou entre máquinas. A estas áreas estão normalmente associadas características como complexidade e incerteza, sendo o seu comportamento passível de ser modelado através variáveis linguísticas e regras linguísticas. Por outro lado, no âmbito da interação homem/máquina é de realçar o caso particular dos **Controladores Linguísticos**, a cuja implementação poderá estar subjacente a lógica Fuzzy. Efetivamente, esta é uma área do conhecimento onde está intrínseco o controlo de sistemas baseado nos conceitos Fuzzy, que nos nossos dias tem cada vez mais aplicações em produtos de grande consumo (eletrodomésticos, automóveis), assim como em soluções para problemas pontuais da indústria.

Desta forma, estabelecendo uma comparação prática entre a lógica booleana tradicional e a lógica Fuzzy, considere-se como exemplo o controlo de um aparelho de ar condicionado. Quando o controlo é realizado através de um termostato com a capacidade de reconhecer apenas dois estados, ou acima, ou abaixo de determinada temperatura, o controlo irá desligar ou ligar o equipamento, mantendo a temperatura a oscilar num determinado intervalo previamente estabelecido, com a desvantagem de que nem todas as situações do mundo real, permitem que a sua descrição seja simplesmente do tipo sim/não ou verdadeiro/falso passível de ser modelada utilizando lógica Booleana. Quando o controlo é concebido com base em lógica Fuzzy permite reconhecer a temperatura aproximada de um espaço (muito frio, frio, pouco frio, pouco quente, quente, muito quente), conseguindo-se assim uma maior precisão na manutenção da temperatura particularmente constante, com o equipamento a responder de uma forma mais adequada quando há uma perturbação. As regras heurísticas utilizadas na conceção dos controladores Fuzzy, embora utilizem declarações menos precisas do que as regras formuladas com base na lógica booleana, permitem no entanto responder a um maior número de diferentes situações, fazendo com que nesta aplicação do controlo haja uma resposta mais aproximada àquilo que será a sensibilidade do ser humano à temperatura. Um exemplo deste tipo de regras heurísticas é a que a seguir se apresenta: **Se** a temperatura de um espaço é quente e aumenta ligeiramente, **então** aumentar o arrefecimento. Na implementação da estratégia de controlo de um controlador linguístico Fuzzy terá de haver uma coleção de regras verbais/ linguísticas. Várias variáveis poderão estar incluídas em cada regra, no lado do “Se” e no lado do “então”, fazendo com que seja possível do ponto de vista lógico ter decisões semelhantes aos humanos, refletindo opiniões de especialistas, permitindo aos computadores funcionarem com declarações imprecisas. Os controladores linguísticos Fuzzy são adequados a resolver problemas que exijam capacidade do controlador se adaptar a mudanças e não linearidades do sistema controlado, lidar com incertezas nos parâmetros e variáveis do processo ao qual o controlador estará associado.

Neste capítulo será apresentado o que é e como funciona um sistema linguístico Fuzzy, ilustrando-se na Figura 2.1 as principais operações que lhe estão subjacentes.



**Figura 2.1**– Diagrama de um sistema Fuzzy

No bloco de **Pré-Processamento** o sinal é normalizado para que pertença ao universo dos conjuntos Fuzzy para os quais são definidas as correspondentes funções de pertinência.

O **Processo de Fuzificação** transforma os valores numéricos em valores linguísticos (conjuntos Fuzzy).

A **Base de Conhecimento** é onde o operador implementa as regras heurísticas que definem a estratégia de funcionamento do sistema Fuzzy.

O **Mecanismo de Inferência** é apenas um algoritmo desenvolvido para alcançar conclusões a partir do estado atual do sistema, isto é, a partir dos valores de entrada, com base nas regras heurísticas que constituem a base de conhecimento.

O **Desfuzificador** converte a conclusão obtida pelo sistema Fuzzy, resultante do mecanismo de inferência, em informação clássica. Há vários métodos de desfuzificação, sendo os mais comuns em aplicações de controlo de sistemas, os designados por centróide e a altura máxima.

O bloco de **Pós-Processamento** é caracterizado por possuir um ganho ajustável por forma a colocar o valor resultante do processo de desfuzificação numa gama de valores específica. No caso dos controladores linguísticos Fuzzy, esta gama de valores será a do sinal a transmitir ao órgão final da malha de controlo, sendo também este bloco frequentemente utilizado para implementar ações de controlo, como por exemplo, uma ação integral sobre a variável controlada.

No próximo subcapítulo será efetuada uma abordagem teórica aos conjuntos Fuzzy e às operações que podem ser realizadas com esses conjuntos.

## 2.2 - Conjuntos e Operações com Conjuntos Fuzzy

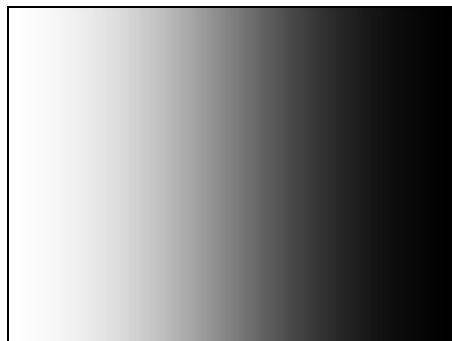
De acordo com os pressupostos de Zadeh, há muitos conjuntos nos quais não é possível estabelecer um critério preciso dos elementos que fazem parte desse conjunto em contraste com o que acontece na teoria clássica de conjuntos. Para resolver este tipo de situação, Zadeh sugere estabelecer um grau de pertinência, ou seja uma escala gradual que define o grau de um elemento pertencer a um determinado conjunto, em contraste à transição abrupta da teoria clássica, onde determinado elemento pertence ou não a determinado conjunto [2]. Assim um conjunto Fuzzy é caracterizado pelos graus de pertinência de todos os elementos que constituem o universo no qual o conjunto é definido. Estes valores são números reais que variam entre 0 e 1, normalmente representados pela letra grega  $\mu$ . Quanto mais

próximo de 1 for o valor, do grau de pertença, maior é a possibilidade de determinado elemento pertencer a determinado conjunto.

O conjunto clássico tem uma fronteira bem definida, isto é um determinado elemento ou está dentro ou está fora do conjunto, enquanto num conjunto Fuzzy há uma fronteira gradual definida pela função de pertença, normalmente designada por  $\mu(x)$ , ou em inglês “*membership function*”. Na Figura 2.2 não é possível definir com rigor uma linha que separe o branco do preto, isto porque temos uma transição gradual entre o conjunto dos pontos brancos e o conjunto dos pontos pretos, ou seja, temos entre os dois grupos de pontos mencionados uma escala de cinzentos. Qualquer linha que se determine para separar os conjuntos dos pontos brancos dos pontos pretos terá alguma dificuldade em lidar com a escala de cinzentos, de tal forma que os pontos imediatamente à esquerda e imediatamente à direita teriam uma tonalidade idêntica mas iriam pertencer a conjuntos distintos. Recorrendo à utilização de conjuntos Fuzzy será possível representar matematicamente uma fronteira gradual, através da função de pertença, como já referido, e assim para um determinado ponto com tom cinzento, será possível definir o respetivo grau de pertença relativamente aos conjuntos dos pontos brancos ou pretos. Este grau de pertença, não é uma probabilidade mas sim uma possibilidade de um determinado ponto pertencente ao universo em que os conjuntos Fuzzy são definidos, pertencer a um conjunto Fuzzy ou a outro.

Desta forma, embora a função de pertença associada a um conjunto Fuzzy seja semelhante a uma função de distribuição de probabilidade estatística, na verdade o conceito que lhe está subjacente é muito diferente. A função de pertença define o grau de possibilidade com que determinado elemento pertence a um conjunto, enquanto na função de probabilidade estatística define a probabilidade de determinado elemento pertencer a determinado conjunto, ou não.

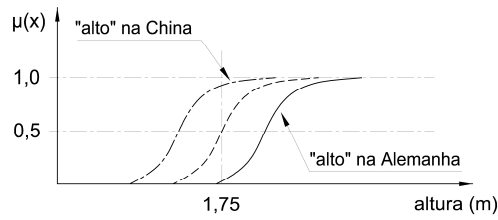
Assim o conjunto Fuzzy  $A$  definido no universo  $X$  é expresso como o conjunto de pares ordenados:  $A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\}$ . Desta forma, se  $x$  pertence ao universo de  $X$  então  $\mu_A(x)$  é o grau de possibilidade de  $x$  pertencer a  $A$ . Um simples par  $(x, \mu_A(x))$  é chamado de Fuzzy “*singleton*”, desta forma um conjunto Fuzzy pode ser visto como uma união de todos os “*singletons*” que o constituem.



**Figura 2.2**– Fronteira Fuzzy na forma gráfica

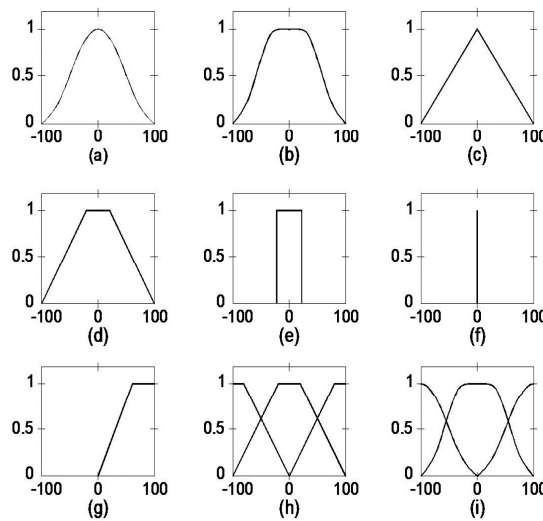
Um exemplo de senso comum é o conjunto das “pessoas altas”, em que na Figura 2.3 são representadas hipotéticas funções de pertença para caracterizar esse conjunto Fuzzy. Este exemplo simples acrescenta uma noção importante: a aprendizagem é fundamental para um adequado ajuste da

função de pertinência que caracteriza um determinado conjunto Fuzzy, a qual reflete alguma subjetividade e cuja definição depende do contexto em que ocorre.



**Figura 2.3**– Funções de pertinência do conjunto Fuzzy “pessoas altas”

Na Figura 2.4, apresentam-se vários exemplos comuns para a forma das funções de pertinência.



**Figura 2.4**– Funções de pertinência: (a) sino; (b) sino achatada; (c) triangular; (d) trapezoidal; (e) retangular; (f) “singleton”; (g) curva “S” linearizada; (h) família das curvas lineares; (i) família de curvas não-lineares [24].

De uma forma semelhante ao que acontece com as variáveis algébricas, em que os números são valores, com uma variável linguística Fuzzy as palavras ou frases são também valores [23]. Um conjunto de valores que pertençam a uma variável linguística Fuzzy é designado por conjunto de termos. Cada valor desse conjunto de termos é um conjunto Fuzzy ao qual estará associada uma função de pertinência. Obviamente as operações com conjuntos Fuzzy são essenciais para definir novos subconjuntos a partir de outros conjuntos previamente definidos. Com o intuito de formalizar as operações básicas com conjuntos Fuzzy, vão ser considerados dois conjuntos  $A$  e  $B$ , definidos como conjuntos Fuzzy.

Nesta conformidade, considere-se dois conjuntos Fuzzy  $A$  e  $B$  em que as correspondentes funções de pertinência são  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , definidas graficamente na Figura 2.5.

Sendo três as operações básicas entre conjuntos Fuzzy, ou seja a operação “e” ou “interseção”, operação “ou” ou “união” e a operação “negação” ou “complemento”, apresenta-se a seguir a forma de resolver estas operações no âmbito da lógica Fuzzy:

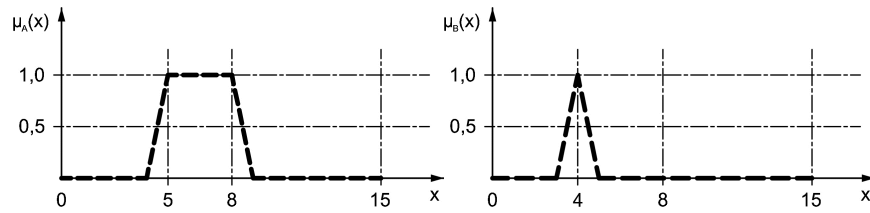


Figura 2.5– Funções de pertinência  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$

- a) Conforme a teoria dos conjuntos Fuzzy, a interseção do conjunto Fuzzy  $A$  com o conjunto Fuzzy  $B$  é definida da seguinte forma:  $A \text{ e } B \triangleq \min(a, b)$ .

O operador,  $\min$ , é resolvido através da determinação do valor mínimo, elemento a elemento, do grau de pertinência que pertence aos dois conjuntos,  $A$  e  $B$ . Desta forma, a resolução da operação “e” passa pela determinação da interseção da função de pertinência associada ao conjunto Fuzzy  $A$  com a função de pertinência associada ao conjunto Fuzzy  $B$ ,  $\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \mu_{A \cap B}$ , obtendo-se a função de pertinência representada na Figura 2.6.

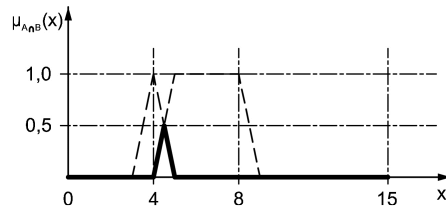


Figura 2.6– Função de pertinência  $\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \mu_{A \cap B}$

- b) Da mesma forma, a união do conjunto Fuzzy  $A$  com o conjunto Fuzzy  $B$  é definida de acordo com a seguinte relação:  $A \text{ ou } B \triangleq \max(a, b)$

O operador,  $\max$ , é resolvido através da determinação do valor máximo, também definido elemento a elemento, do grau de pertinência entre estes dois conjuntos,  $A$  e  $B$ . Da mesma forma a união do conjunto Fuzzy  $A$  com o conjunto Fuzzy  $B$ ,  $\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \mu_{A \cup B}$ , será determinada conforme representado na Figura 2.7.

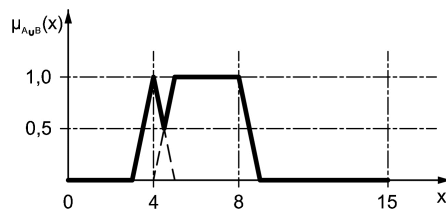


Figura 2.7– Função de pertinência  $\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \mu_{A \cup B}$

- c) O complemento ou a negação do conjunto Fuzzy  $A$  é definido da seguinte forma:  $\text{não } A \triangleq 1 - a$ .

Onde o grau de pertinência de cada elemento, do conjunto Fuzzy  $A$ , é subtraído a 1, ou seja, a negação do conjunto  $A$ ,  $\mu_{\bar{A}}(x)$ , será determinada conforme representado na Figura 2.8.

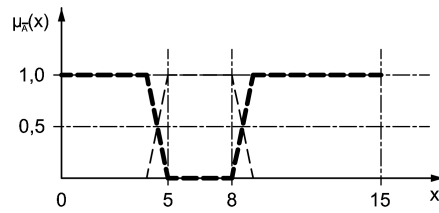


Figura 2.8— Função de pertinência  $\mu_A(x)$

À semelhança com o que acontece com a álgebra Booleana, também à lógica Fuzzy está subjacente uma axiomática específica, a qual se apresenta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 — Propriedades das operações básicas, dos conjuntos  $a$  e  $b$  [24]

PROPRIEDADE	NOME DA PROPRIEDADE
$a \text{ OU } b = b \text{ OU } a$ $a \text{ E } b = b \text{ E } a$	Comutatividade
$(a \text{ OU } b) \text{ OU } c = a \text{ OU } (b \text{ OU } c)$ $(a \text{ E } b) \text{ E } c = a \text{ E } (b \text{ E } c)$	Associatividade
$a \text{ E } (b \text{ OU } c) = (a \text{ E } b) \text{ OU } (a \text{ E } c)$ $a \text{ OU } (b \text{ E } c) = (a \text{ OU } b) \text{ E } (a \text{ OU } c)$	Distributividade
$\text{não } (a \text{ E } b) = (\text{não } a) \text{ OU } (\text{não } b)$ $\text{não } (a \text{ OU } b) = (\text{não } a) \text{ E } (\text{não } b)$	Leis de Morgan
$(a \text{ E } b) \text{ OU } a = a$ $(a \text{ OU } b) \text{ E } a = a$	Absorção
$a \text{ OU } a = a$ $a \text{ E } a = a$	Idempotência
$a \text{ OU } \text{não } a \neq 1$ $a \text{ E } \text{não } a \neq 0$	Exclusão <b>não é satisfeita</b>

## 2.3 - Entradas/Saídas de Sistemas Fuzzy

Antes de desenharmos as funções de pertinência associadas aos conjuntos Fuzzy utilizados para caracterizar o comportamento das diferentes variáveis envolvidas num sistema linguístico Fuzzy, de forma a ser possível escrever as regras heurísticas da correspondente base de conhecimento será necessário começar por definir as variáveis de entrada e saída e o seu respetivo intervalo de variação, assim como caracteriza-las convenientemente.

Nesta conformidade, no caso particular de um controlador linguístico Fuzzy o projetista será inevitavelmente confrontado com as questões, de como escrever as regras heurísticas que constituirão a base de conhecimento do sistema Fuzzy, bem como, construir o conjunto dos termos associado a cada variável envolvida. Nesta perspetiva, o projetista terá que encontrar resposta para as duas questões que a seguir se colocam:

- Como determinar a função de pertinência associada a cada termo, ou conjunto Fuzzy?
- Como determinar quantos termos, ou conjuntos Fuzzy, são necessários e suficientes para descrever o comportamento de determinada variável?

De acordo com a teoria dos conjuntos Fuzzy, já mencionada, a escolha das funções de pertinência é uma tarefa que envolve um grau de subjetividade elevado. Todavia, no caso particular da

concepção/projeto de controladores linguísticos Fuzzy existe um conjunto de regras práticas e que tem vindo a ser adotadas pela comunidade científica [4][4], envolvendo também bom senso, que podem ser aplicadas no sentido de ajudar a determinar as funções de pertença mais adequadas, nomeadamente quando pretendemos conceber/projetar este tipo particular de sistemas Fuzzy, as quais se apresentam a seguir:

- O conjunto Fuzzy deverá ser definido para que o ruído associado às variáveis de medida não afete o comportamento do controlador. Será desejável que se inicie o projeto/concepção do controlador utilizando três conjuntos Fuzzy. Se for verificado que o controlador utiliza preferencialmente um dos conjuntos Fuzzy definidos, então deverão ser adicionados mais conjuntos Fuzzy. Por outro lado, se o universo tiver um centro ou zero, a utilização de um número ímpar de conjuntos Fuzzy conduz normalmente a melhores resultados que um número par;
- Será desejável a existência de sobreposição entre as funções de pertença associadas aos diferentes conjuntos Fuzzy definidos num determinado universo. Caso contrário poderemos ter o controlador a operar em estados indefinidos, o que conduziria a um comportamento mal definido da sua saída;
- É frequente, em aplicações comerciais, ser sugerido que se inicie o projeto/concepção do controlador com uma sobreposição das funções de pertença a ocorrer para  $\mu = 0,5$  ou superior;
- É frequente, em aplicações comerciais, ser sugerido que se inicie o projeto/concepção do controlador utilizando funções de pertença trapezoidais e/ou triangulares, devendo os triângulos ser equiláteros ou isósceles, tendo igual base;
- Deverá ser assegurado que, no início do projeto do controlador, cada valor do universo de determinada variável será membro de pelo menos dois conjuntos Fuzzy, com um grau de pertença diferente de zero, com exceção dos elementos que se situem nos extremos do universo.

A utilização de três conjuntos Fuzzy para descrever o comportamento de determinada variável permitirá abranger os valores baixo, médio e alto, associados a essa variável, tornando o desempenho do controlador insensível ao ruído que eventualmente possa estar associado às medidas. Por outro lado, estudos experimentais têm demonstrado que o desempenho do controlador não é muito sensível a alterações na forma da função de pertença [24]. A sobreposição de funções de pertença terá como consequência que mais do que uma regra heurística será disparada para cada elemento do universo, fazendo com que a resposta do controlador seja mais suave do que seria na ausência de sobreposição. A existência de intervalos entre funções de pertença faria com que nenhuma regra heurística fosse disparada para valores contidos nesses intervalos, o que conduziria a descontinuidades no comportamento do controlador.

## **2.4 - Base de Conhecimento, Mecanismo de Inferência e Desfuzificação**

Como já foi referido, a base de conhecimento é composta por regras heurísticas envolvendo conjuntos Fuzzy caracterizados pelas respetivas funções de pertença, através das quais o mecanismo de

inferência obtém conclusões face aos valores atuais assumidos pelas variáveis de entrada do sistema Fuzzy, ou em particular do controlador linguístico Fuzzy.

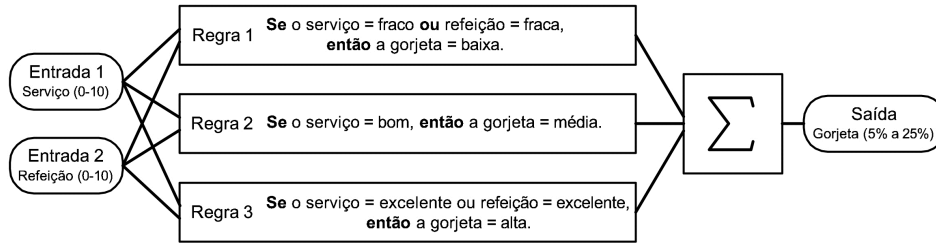
As regras podem ser obtidas através de conhecimento de especialista ou extraídas de dados numéricos ou outros, sendo expressas na forma SE-ENTÃO, como já ilustrado anteriormente no exemplo de uma hipotética regra heurística utilizada para definir a estratégia de controlo de um aparelho de ar condicionado. A condição, associada ao SE da regra heurística é designada por antecedente da regra e o resultado associado ao ENTÃO da regra heurística é por consequente da regra. Para cada conjunto Fuzzy utilizado na construção da base de conhecimento será necessário definir as respetivas funções de pertença caracterizadoras do comportamento da variável a que o conjunto Fuzzy estará associado.

Relativamente ao mecanismo de inferência, a utilização de plataformas computacionais como o LabView ou o MatLab torna-o transparente para o projetista do sistema Fuzzy e para o utilizador do sistema, uma vez que o respetivo algoritmo está embebido na plataforma. Por outro lado, como já foi anteriormente referido a inferência é o processo pelo qual se obtém os valores de saída do sistema. Um vetor com os valores das variáveis de entrada é utilizado para disparar as regras heurísticas cujo antecedente assuma um grau de possibilidade diferente de zero de ser verdadeiro. Todavia, como quer o antecedente, quer o consequente das regras heurísticas, podem ser constituídos por mais do que uma condição ligadas pelas conectivas “e” e/ou “ou”, o mecanismo de inferência poderá utilizar diversos métodos para se obter a saída do sistema Fuzzy, sendo o mais comum o designado na literatura pela composição *max-min* [23][25]. Conforme foi mencionado atrás a função *min* é usada para resolver a conectiva “e”, enquanto a função *max* é utilizada para resolver a conectiva “ou”. No caso de mais do que uma regra heurística ser disparada em simultâneo, a composição do resultado de saída do sistema Fuzzy é obtido através da aplicação da conectiva “ou” aos resultados individuais de cada uma das regras heurísticas disparadas [26][27].

Por outro lado, assumindo que o “ENTÃO” associado às regras heurísticas é analiticamente resolvido através da operação implicação e que esta operação é resolvida através da função *min*, o grau de possibilidade de uma determinada regra heurística ser verdadeira induz o limite de ativação da ação resultante dessa regra, expressa no respetivo consequente. De salientar que embora a utilização da função *min* na resolução da operação implicação seja a mais utilizada, outras funções podem ser utilizadas conforme descrito na literatura da especialidade [23].

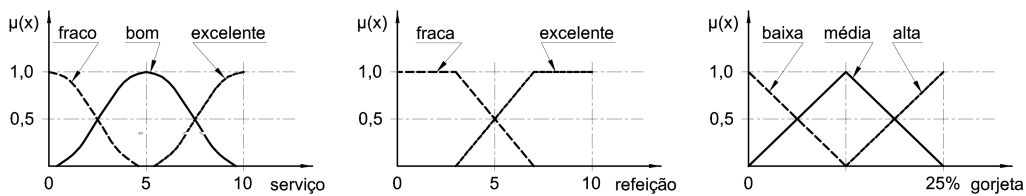
Apresenta-se a seguir um exemplo muito simples que serve apenas para ilustrar o funcionamento do mecanismo de inferência acima descrito e ilustrar o que se entende por processo de desfuzificação do sinal gerado através do algoritmo associado ao mecanismo de inferência. O exemplo apresentado avalia o valor da gorjeta a dar a um empregado de mesa, considerando um jantar envolvendo até quatro pessoas [27]. A descrição deste problema é ilustrada na Figura 2.9, de onde se pode inferir a existência de:

- 2 variáveis de entrada, avaliadas de 1 a 10, a Qualidade do Serviço de mesa e a Qualidade da Refeição;
- 3 regras heurísticas;
- 1 variável de saída, com o valor da gorjeta a variar entre 5% a 25% (obviamente discutível).



**Figura 2.9**– Esquema do exemplo, com duas entradas, três regras e uma saída

Visando a implementação da base de conhecimento referente ao sistema Fuzzy que irá modelar a situação descrita na Figura 2.9, começaremos por definir os conjuntos Fuzzy caracterizadores do comportamento das variáveis de entrada e da variável de saída, bem como, as respectivas funções de pertinência, conforme representado na Figura 2.10.



**Figura 2.10**– Funções de pertinência, das duas entradas (serviço e refeição) e da saída (gorjeta)

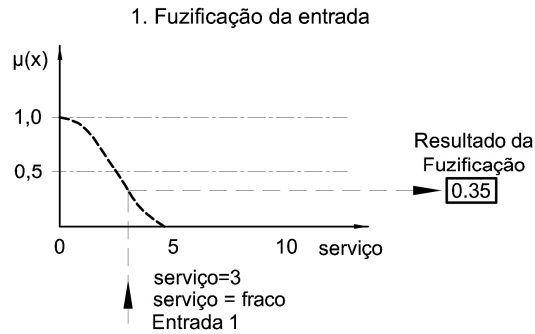
Construída a base de conhecimento, que será constituída por apenas 3 regras heurísticas, devido ao fato de se utilizar o “ou” a ligar as conetivas associadas aos antecedentes das regras diminuindo a quantidade de regras necessárias para cobrir todas as combinações possíveis entre as variáveis de entrada do sistema Fuzzy, simplificando o exemplo apresentado.

Para exemplificar o funcionamento do sistema Fuzzy em apreço considere-se que o valor assumido pela Entrada 1, relativo à Qualidade do Serviço de mesa é 3, e para a Entrada 2, relativo à Qualidade da Refeição é 8.

Por forma a ilustrar como é processada a informação é efetuada de seguida uma análise passo a passo ao funcionamento do sistema Fuzzy:

Passo 1 – Fuzificação das entradas:

As entradas Qualidade do Serviço e Qualidade da Refeição já estão normalizadas para o intervalo de valores de 1 a 10. Na Figura 2.11 ilustramos a Fuzificação da Entrada da Qualidade do Serviço relativa apenas à primeira regra heurística. Neste caso com a Qualidade do Serviço avaliada com o valor de 3, obtemos como resultado da Fuzificação que a variável de entrada correspondente terá um grau de possibilidade de 0,35 de pertencer ao conjunto Fuzzy “fraco”.

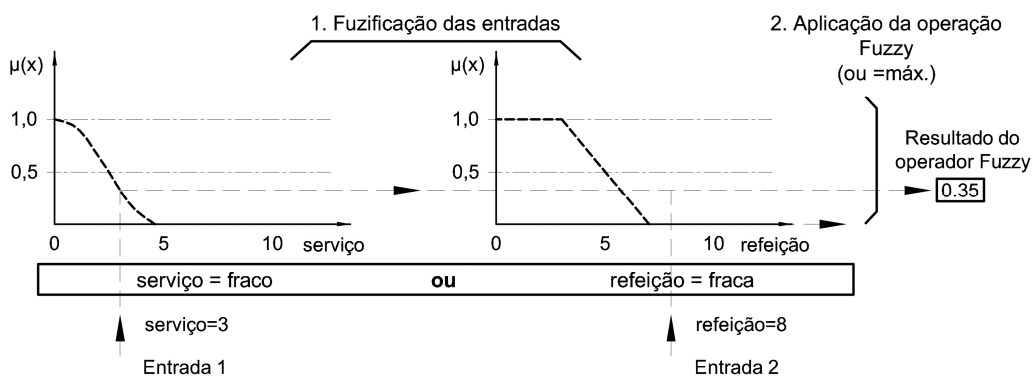


**Figura 2.11**– Fuzificação da entrada 1, utilizada na 1ª regra

Passo 2 – Aplicação da operação Fuzzy:

Nesta fase são realizadas as operações entre os conjuntos Fuzzy impostas pelos antecedentes das regras heurísticas, em que neste caso sendo utilizada a conectiva “ou” (ver Figura 2.7), o resultado será obtido simplesmente selecionando o máximo dos dois valores. Na Figura 2.12 ilustramos a Fuzificação das duas entradas e a aplicação da operação Fuzzy “ou” para apenas a primeira regra heurística. Considerando a Qualidade do Serviço avaliada em 3 que ao cruzar a função de pertinência associada ao conjunto Fuzzy “fraco” obtemos como resultado da Fuzificação o correspondente grau de possibilidade com valor igual a 0,35 e a Qualidade da Refeição avaliada em 8 que ao cruzar a função de pertinência associado ao conjunto Fuzzy “fraca” obtemos como resultado da Fuzificação o correspondente grau de possibilidade com o valor igual a 0,00. Aplicando o operador Fuzzy “ou” obtemos o peso com que esta regra heurística será disparada, ou seja, neste caso com o valor de 0,35, que representa o grau de possibilidade da regra ser verdadeira.

O grau de possibilidade de a condição de uma regra ser verdadeira, determina a intensidade com que essa regra é disparada (ver Figuras 2.12).



**Figura 2.12**– Aplicação da operação Fuzzy “ou”, com as duas entradas já fuzificadas (serviço e refeição)

Passo 3 – Operação de implicação (utilizando o operador min):

Visando obter o contributo de cada uma das regras heurística para o resultado final a ser fornecido pelo sistema Fuzzy, neste exemplo utilizou-se a função *min* para resolver a operação

implicação. Todavia, como mencionado atrás, também poderia ser eventualmente utilizado outro operador, como por exemplo o operador multiplicação, \*. A operação multiplicação tem a vantagem de não alterar a forma inicial das funções de pertinência, apenas alterando a sua escala. Para além disso, no caso particular de um controlador Fuzzy, o sinal de controlo resultante da resolução da operação multiplicação, \*, conduz normalmente a uma resposta mais suave do controlador.

Antes de aplicar a operação implicação, é necessário determinar o peso de cada regra, (um número entre 0 e 1), que é determinado pelo valor do grau de possibilidade do antecedente ser verdadeiro. Depois de determinado o peso da regra, a operação implicação é implementada. Como ilustrado na Figura 2.13, com o operador implicação *min*, o peso da regra ao intercepar a função de pertinência correspondente ao conjunto Fuzzy caracterizador da variável de saída, Gorjeta, que para esta regra heurística é o conjunto Fuzzy “baixa”, define-se uma área conforme representado na Figura 2.14.

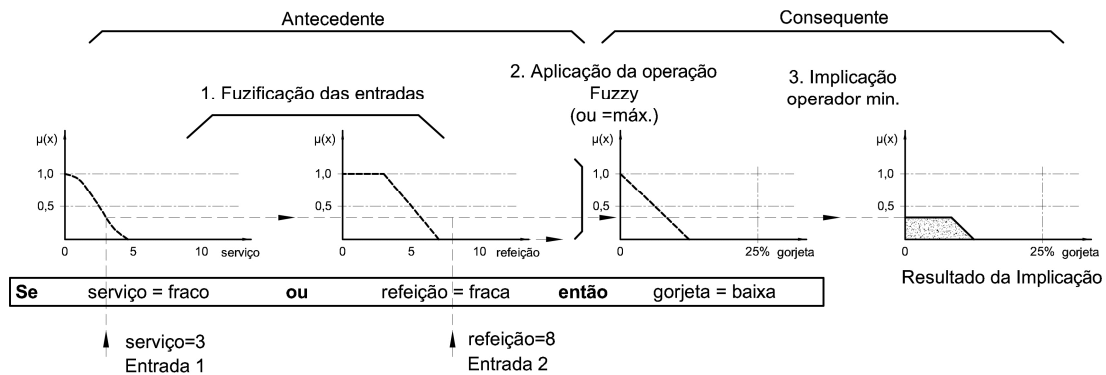


Figura 2.13– Implícção com o operador min.

Passo 4 – Agregação de todas as saídas (utilizando o operador *max*):

Os contributos das regras disparadas são agregados através da operação união, que como acima mencionado é resolvida através do operador *max*, dando origem ao gráfico no canto inferior direito, como resultado da agregação, da Figura 2.14.

Passo 5 – Desfuzificação:

Embora existindo várias metodologias para desfuzificar o resultado do sistema Fuzzy, o método mais comum é o do cálculo do centróide, sendo o resultado final do sistema Fuzzy determinado conforme representado na Figura 2.15[28]. Nesta conformidade, na Figura 2.16 apresenta-se a representação gráfica de todo o mecanismo de funcionamento do sistema Fuzzy que tem vindo a ser utilizado como exemplo, incluindo o processo de desfuzificação do resultado obtido através do mecanismo de inferência.

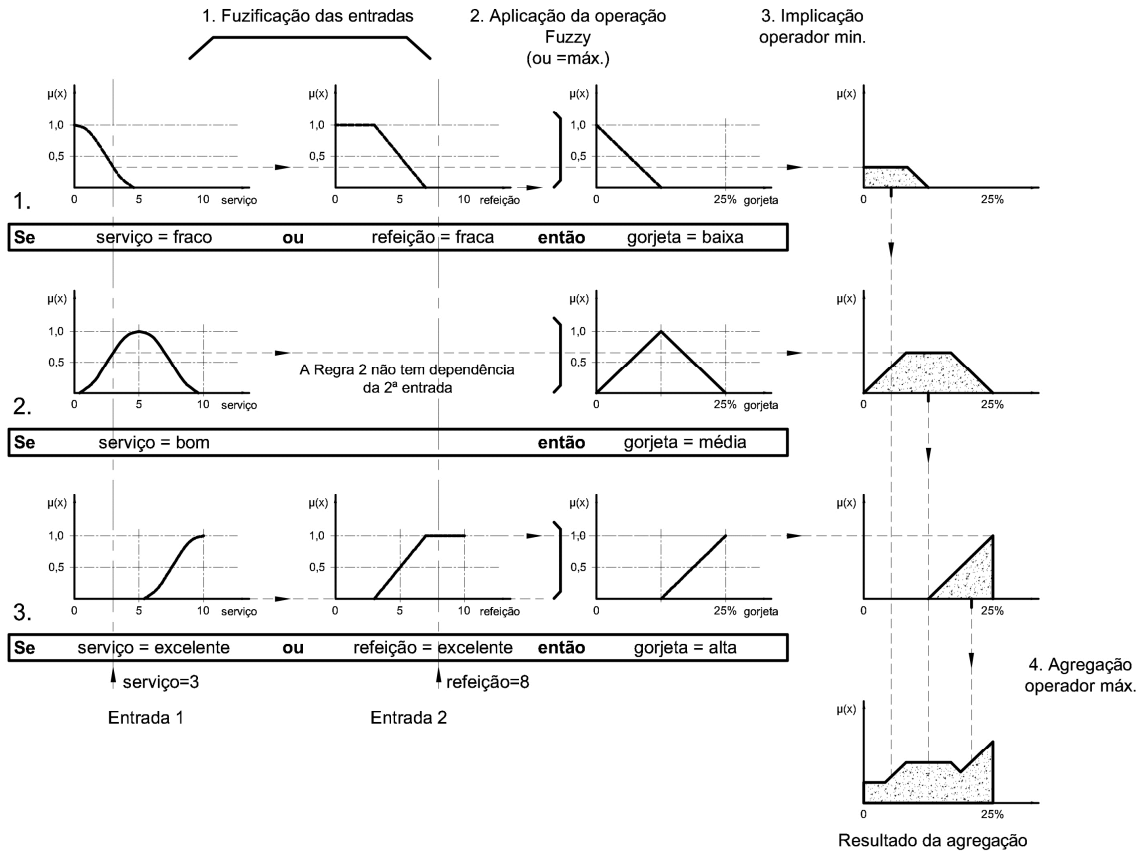


Figura 2.14– Funcionamento do mecanismo de inferência

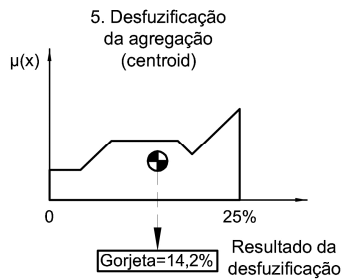
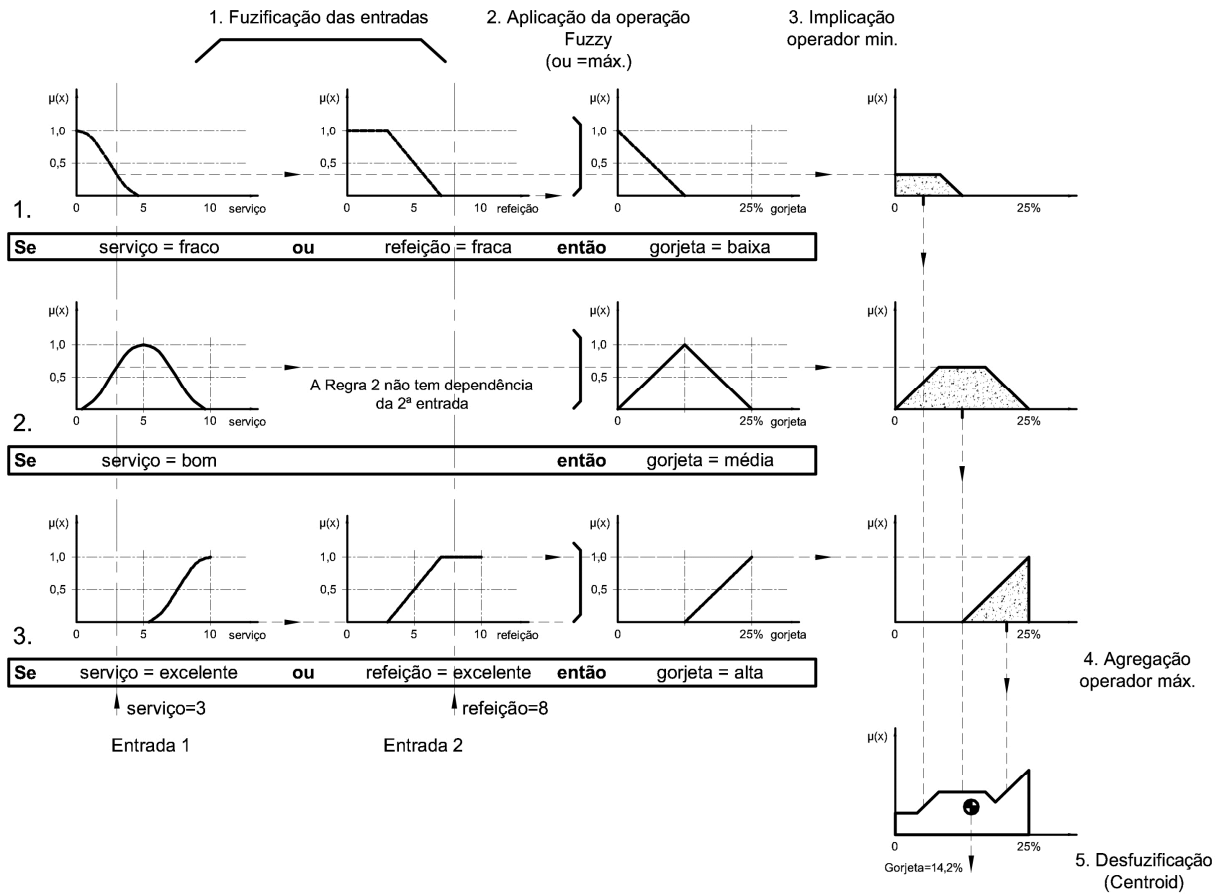


Figura 2.15– Desfuzificação através do centróide

Muitos outros métodos de desfuzificação podem ser considerados. Estudos têm demonstrado que as metodologias baseadas na determinação do máximo possuem um bom desempenho quando se trata de sistemas de raciocínio Fuzzy, enquanto que os métodos que se baseiam na determinação das áreas ou distribuição dos valores conduzem a um melhor resultado quando se tratam de controladores linguísticos Fuzzy [28][29].



**Figura 2.16**– Funcionamento do mecanismo de inferência incluindo a desfuzificação

## **Capítulo 3**

### **Controlo Automático de Processos**

#### **3.1 - Introdução**

Neste capítulo será efetuada uma abordagem aos conceitos fundamentais subjacentes ao controlo automático de processos, nomeadamente no que se refere ao controlo em malha fechada.

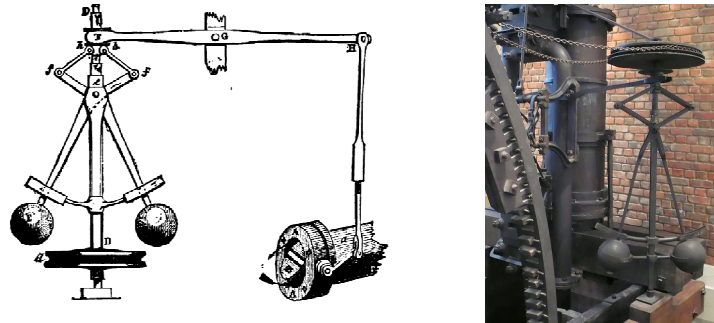
Desde tempos remotos que o controlo em malha fechada foi utilizado para possibilitar o controlo de diversos sistemas. Ao longo dos tempos as técnicas de controlo evoluíram, desde mecanismos de controlo do nível de tanques, relógios de água, no século XVIII o motor a vapor de James Watt e Matthew Boulton controlado através de um pendulo centrífugo [30] (ver Figura 3.1), no século XIX com os primeiros estudos de análise de estabilidade, no século XX deu-se uma grande evolução, com o desenvolvimento dos controladores PID, e até aos dias de hoje com várias técnicas de controlo inteligentes [31].

O controlo automático de processos tornou-se tecnologicamente importante para a sociedade moderna. Pode ser encontrado desde uma simples torradeira até a complexos sistemas nas naves espaciais, fazendo parte do nosso quotidiano.

#### **3.2 - Controlo em Sistemas Contínuos**

Os sistemas contínuos correspondem a processos ou equipamentos em que as suas variáveis assumem valores contínuos no tempo, cujo funcionamento automático depende da implementação de metodologias tratadas no âmbito daquilo que na literatura é designado por controlo de sistemas ou controlo automático de processos.

No âmbito do controlo automático de processos, ou seja, no controlo de sistemas em que as suas variáveis variam de uma forma continua no tempo, as metodologias adotadas são normalmente agrupadas



**Figura 3.1**– Controlo com pêndulo centrífugo, século XVIII, à esquerda um esquema simplificado, à direita uma fotografia de parte do sistema [32]

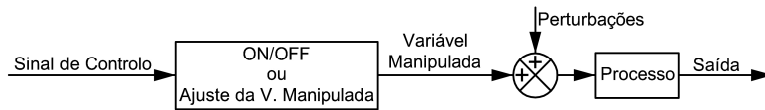
em dois grandes grupos, ou seja, o controlo automático em malha aberta e o controlo automático em malha fechada, em que enormes diferenças separam estas duas abordagens, conforme se poderá constatar a seguir.

Neste capítulo serão tratadas algumas questões fundamentais do controlo automático de sistemas dinâmicos, tais como a importância da realimentação (feedback) e o conflito inerente entre precisão e estabilidade.

O controlo automático em malha aberta (ver Figura 3.2) consiste num sistema de controlo sem realimentação (sem “feedback”). Consiste em aplicar um sinal de controlo na entrada de um sistema, esperando que na saída a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento desejado, sendo esta metodologia caracterizada pela incapacidade de autocorreção perante possíveis perturbações normalmente existentes nos processos reais. Neste tipo de sistema de controlo não se observa a evolução da variável controlada para determinar o sinal de controlo. A variável manipulada não depende da variável controlada, esperando-se que na saída tenhamos o sinal desejado sem que possamos tirar informações dela para ajustarmos a variável manipulada. O problema deste tipo de controlo é que só teremos a saída desejada se não ocorrerem perturbações, internas ou externas, isto é, modificação dos parâmetros, pois o controlador atuará como se não tivesse ocorrido qualquer perturbação e assim não haverá uma resposta adaptada às novas características do sistema. A precisão do sistema dependerá da calibração e das perturbações.

Todavia, o controlo em malha aberta caracteriza-se por apresentar como vantagens o seu baixo custo e a simplicidade de implementação. De salientar que para sistemas em que as entradas são conhecidas e onde as perturbações sejam negligenciáveis é aconselhável a utilização do controlo em malha aberta.

Qualquer sistema de controlo que funcione com base no tempo, através de um temporizador, será hipoteticamente um sistema de controlo em malha aberta. São exemplos desta metodologia de controlo: Controlo de tráfego com semáforos temporizados; Controlo de um forno sem termóstato, em que o operador estima o tempo e potência com base na experiência, a temperatura ficará um pouco acima ou um pouco abaixo da temperatura desejada.



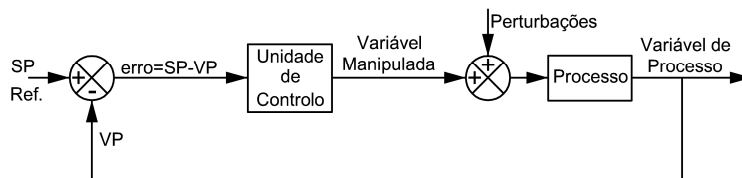
**Figura 3.2**– Diagrama de controlo em malha aberta

O outro grande grupo de metodologias de controlo automático de processos enquadra-se no que na literatura se designa por controlo em malha fechada “*Closed-Loop*” (ver Figura 3.3). A vantagem deste tipo de arquitetura relativamente à malha aberta de controlo reside no facto de existir realimentação da variável controlada (com “*feedback*”), fazendo com que o sistema reaja a perturbações, internas ou externas, tentando corrigir os seus efeitos no comportamento da variável controlada. Desta forma, o valor da variável controlada é medido através de sensores ou transdutores, o qual é realimentado e comparado com o sinal de referência “*SetPoint*” ou valor desejado, calculando-se o respetivo erro através da diferença entre os dois valores, o qual será processado por um controlador que terá subjacente uma determinada lei de controlo, que irá gerar um sinal de controlo visando anular o erro.

É com este tipo de arquitetura de controlo, em malha fechada, que surgem os problemas de estabilidade, inexistentes com o controlo em malha aberta, devido ao fato de quando o sistema de controlo tenta anular o erro entre o sinal de referência e o valor da variável de processo poderá causar oscilações e/ou variações de amplitude na variável controlada levando à instabilidade da malha de controlo.

Os sistemas automáticos de controlo em malha fechada são caracterizados pela vantagem de terem capacidade de corrigir efeitos indesejáveis resultantes de algumas perturbações imprevisíveis e/ou variações imprevisíveis no comportamento dos componentes do sistema.

Relativamente a aplicações industriais, o controlador mais utilizado em sistemas de controlo automático em malha fechada é vulgarmente designado pela abreviatura PID, que são as iniciais das ações de controlo que lhe estão subjacentes, ou seja, proporcional, integral e derivativa, como já referido acima. Sendo este o tipo de controlador foi utilizado no âmbito do trabalho realizado conducente à escrita desta dissertação, conforme resultados apresentados no capítulo 5. No subcapítulo seguinte será efetuada uma análise detalhada do seu princípio de funcionamento. Em situações específicas em que os controladores PID não revelam o desempenho desejado, ainda no âmbito das metodologias de controlo clássico, poderá ser utilizado outro tipo de controladores, menos conhecidos na indústria, mas devidamente caracterizados na literatura da especialidade [30].



**Figura 3.3**– Diagrama de controlo em malha fechada

### 3.3 - Controladores PID

Atualmente é o tipo de controladores mais utilizado na indústria, bastante bem conhecidos, matematicamente bem definidos e de fácil implementação. O seu estudo teve início no séc. XIX, embora tenha sido no séc. XX a sua grande evolução. Foram vitais para o avanço da engenharia e da ciência. Com extrema importância no controlo automático de processos e equipamentos, nos sistemas de veículos espaciais, no sistema de pilotagem automática, robótica e no desenvolvimento da indústria automóvel.

No âmbito das metodologias clássicas do controlo automático de processos, nomeadamente em arquiteturas de controlo em malha fechada, ou seja com realimentação, o tipo de controladores mais utilizado na indústria são os amplamente conhecidos controladores PID, como já atrás foi mencionado. São caracterizados por um desempenho eficaz em muitas aplicações na indústria transformadora. Contudo, apresentam algumas limitações, como sejam um desempenho variável quando utilizados em processos não-lineares com uma gama de operação alargada, mau desempenho em processos em que haja limitações no número e qualidade das variáveis de medida e a ação derivativa pode amplificar o ruído com consequências desastrosas no sinal de controlo obtido à saída do controlador.

Analiticamente o funcionamento de um controlador PID pode ser expresso pela expressão 3.1, na qual é utilizada a seguinte nomenclatura:

$u(t)$  - Função de saída do controlador;

$erro(t)$  - Função do erro;

$K_p$  - Ganho proporcional;

$K_i$  - Ganho integral;

$K_d$  - Ganho derivativo;

$T_p$  - Tempo proporcional (s);

$T_i$  - Tempo integral (s);

$T_d$  - Tempo derivativo (s);

$$u(t) = K_p \times erro(t) + K_i \times \int erro(t) \cdot dt + K_d \times \frac{d erro(t)}{dt} \quad (3.1)$$

A equação (3.1) pode ser reescrita da seguinte forma, tendo em conta que,  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  e  $K_d = K_p \times T_d$

$$u(t) = K_p \cdot \left[ erro(t) + \frac{1}{T_i} \times \int erro(t) \cdot dt + T_d \times \frac{d erro(t)}{dt} \right] \quad (3.2)$$

Da análise das expressões anteriores é possível concluir que os controladores PID possuem três graus de liberdade para que seja alcançado o desempenho desejado quando inseridos numa malha de controlo específica, ou seja, possuem três parâmetros ajustáveis: ganho proporcional; tempo integral; e tempo derivativo. Para um melhor entendimento do funcionamento dos controladores PID, será efetuada de seguida uma análise relativa à influência de cada uma das ações de controlo no seu desempenho:

### **Controlo Proporcional**

A ação proporcional do controlador resulta do produto entre o sinal de erro e uma constante  $K_p$ , designada por ganho proporcional do controlador. O controlador funciona apenas com ação de controlo proporcional se os seus parâmetros assumirem os valores a seguir indicados:  $K_p = \text{constante}$ ;  $T_d = 0$ ; e  $T_i = \infty$ ; em que a *constante* assume um valor diferente de zero. Apenas com esta ação de controlo não será possível eliminar o erro em regime estacionário, caso exista, sendo apenas possível diminuir o seu valor através do aumento do valor do ganho proporcional. Contudo, este procedimento para tentar baixar o valor do erro em regime estacionário conduz, em geral, a um aumento do tempo de estabilização podendo eventualmente levar à instabilidade da malha de controlo.

A incapacidade da ação proporcional eliminar o erro em regime estacionário resulta do facto de neste modo de operação o controlador não considerar a variação no tempo do sinal de entrada. Assim, a melhor forma de solucionar a eventual existência de erro em regime estacionário será adicionar à ação de controlo proporcional uma ação de controlo integral.

### **Controlo Proporcional e Integral**

Para que o controlador exiba um comportamento subjacente à existência simultânea das ações de controlo proporcional e integral, os seus parâmetros deverão assumir os valores a seguir indicados:  $K_p = \text{constante}_1$ ;  $T_i = \text{constante}_2$ ; e  $T_d = 0$ ; em que a *constante*<sub>1</sub> e a *constante*<sub>2</sub> assumem valores diferentes de zero. A parte integral tendencialmente elimina o erro em regime estacionário, desde que o sistema em malha fechada seja estável, apesar da possível presença de perturbações. No entanto a resposta demorará mais tempo a atingir o valor desejado, ou seja, a ação integral aumenta o tempo de estabilização. A combinação das ações de controlo proporcional e integral é vantajosa porque reduz os efeitos desestabilizadores do modo integral enquanto é capaz de eliminar o erro em regime estacionário.

A eliminação do erro em regime estacionário é conseguida através da integração no tempo desse desvio, e cujo resultado é multiplicado pelo coeficiente  $K_i$ , designado por ganho integral, sendo o resultado posteriormente somado ao resultado da ação proporcional.

Visando obter uma resposta mais rápida do controlador e até que seja refletida na ação de controlo alguma antecipação do comportamento da variável controlada, poderá ser adicionada a ação de controlo derivativa conforme descrito a seguir.

### **Controlo Proporcional, Integral e Derivativo**

A ação derivativa manifesta-se como uma função da variação do valor absoluto do erro. Analiticamente esta ação de controlo é obtida derivando o erro em função do tempo e multiplicando o resultado por uma constante  $K_d$ , designada por ganho derivativo. Esta ação de controlo tem a responsabilidade de adaptar a resposta do controlador às variações da variável de processo, já que uma

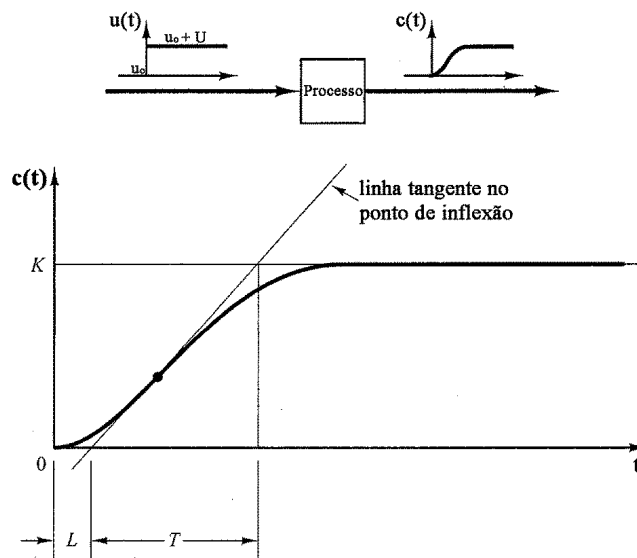
maior derivada corresponde a uma variação mais rápida do erro. A ação derivativa permite que a resposta do controlador antecipe o comportamento da variável controlada, podendo contribuir para uma redução do tempo de estabilização do valor instantâneo assumido pela variável controlada.

Para que o controlador exiba um comportamento subjacente à existência simultânea das ações de controlo proporcional, integral e derivativa, os seus parâmetros deverão assumir os valores a seguir indicados:  $K_p = constante_1$ ;  $T_i = constante_2$ ; e  $T_d = constante_3$ ; em que a  $constante_1$ , a  $constante_2$  e a  $constante_3$  assumem valores diferentes de zero.

Existem diversas metodologias para determinar os valores dos parâmetros ( $K_p$ ;  $K_i$ ;  $K_d$ ), dos controladores PID, ou seja, recorrendo ao do modelo matemático do processo a controlar ou através de uma abordagem experimental. Das metodologias experimentais a mais conhecida é a designada por regras de Ziegler-Nichols, da qual existem dois métodos. Os valores dos parâmetros assim determinados serão apenas um ponto de partida para o ajuste dos parâmetros do controlador, podendo eventualmente verificar-se a necessidade de um ajuste fino usando a metodologia tentativa-erro [30][33].

Os controladores PID utilizados no âmbito do trabalho realizado conducente à escrita desta dissertação foram ajustados com o auxílio do 1º Método de Ziegler-Nichols, cujos resultados se apresentam no Capítulo 5, sendo de seguida efetuada uma descrição da metodologia subjacente ao mencionado método, para determinar o ganho proporcional " $k_p$ ", o tempo integral " $T_i$ ", e o tempo derivativo " $T_d$ " de um controlador PID.

Desta forma, para aplicar o 1º Método de Ziegler-Nichols no ajuste dos parâmetros do controlador, começa-se por obter experimentalmente a resposta do processo  $c(t)$ , a uma variação em degrau da variável de controlo  $u(t)$ , em malha aberta. A resposta do processo  $c(t)$  é caracterizada pela forma de "S" da qual se obtém duas constantes, conforme se verifica graficamente, " $L$ " e " $T$ ", que são determinadas traçando uma tangente à resposta do processo  $c(t)$  no ponto de inflexão, conforme representado na Figura 3.4.



**Figura 3.4**– Resposta da variável controlada  $c(t)$  a uma variação em degrau na variável de controlo  $u(t)$

De acordo com 1º Método de Ziegler-Nichols os parâmetros do controlador PID são determinados a partir das seguintes fórmulas:

$$k_p = 1,2 \cdot \frac{T}{L} \quad (3.3)$$

$$T_i = 2 \cdot L \quad (3.4)$$

$$T_d = \frac{1}{2} \cdot L \quad (3.5)$$

### 3.4 - Controladores Linguísticos Fuzzy

Este tipo de controladores constitui um caso particular dos sistemas Fuzzy anteriormente descritos, como aliás já tinha sido mencionado. É uma forma de controlo inteligente já bastante aplicada atualmente, com imensas soluções em bens de grande consumo, tais como eletrodomésticos, soluções na área automóvel, mas também em soluções específicas na indústria, fundamentalmente quando nos referimos ao controlo de máquinas, sistemas e processos industriais.

A grande evolução da utilização em aplicações concretas dos controladores linguísticos Fuzzy, como iremos de seguida referir neste capítulo, é devida ao facto de dar respostas com desempenho adequado em situações em que os controladores clássicos PID têm alguma dificuldade em exibir um desempenho aceitável, principalmente no que diz respeito ao controlo de sistemas não lineares e eventualmente mal caracterizados [34]. Quando um controlador PID tem bons resultados no controlo de determinado sistema não se justifica o investimento na conceção/projeto de um controlo linguístico Fuzzy, dado que é bastante mais difícil de afinar devido a ter um maior número de parâmetros [35]. Um controlador PID tem apenas três parâmetros, o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo, existindo metodologias sistemáticas de apoio à determinação desses parâmetros, enquanto num controlador linguístico Fuzzy depois de definidas as variáveis de entrada é necessário proceder à definição dos conjuntos Fuzzy que irão caracterizar o seu comportamento em termos linguísticos, bem como, definir as correspondentes funções de pertença e as regras heurísticas que daí resultam, afinar os ganhos dos blocos de pré e pós-processamento. Para além do número de graus de liberdade ser muito superior no caso dos controladores linguísticos Fuzzy quando comparados com os controladores clássicos do tipo PID, resultando em inúmeras possibilidades diferentes na afinação dos parâmetros do controlador com um elevado grau de subjetividade associado, não existem metodologias sistemáticas para ajuda à sua determinação, sendo normalmente utilizada a metodologia de tentativa-erro até ser encontrado o desempenho desejado para o controlador. Nesta conformidade, com facilidade se conclui que só mesmo em situações em que o controlo PID tenha um fraco desempenho se justifica a conceção/projeto de um controlador linguístico Fuzzy.

O controlo Fuzzy foi bastante implementado no Japão [36]. O interesse por esta técnica foi despoletado por Seiji Yasunobu e Shoji Miyamoto de Hitachi que, em 1985 realizaram simulações que demonstraram a fiabilidade dos sistemas com controlo Fuzzy nos comboios em Sendai [37], onde esta técnica de controlo foi aplicada no controlo da aceleração, travagem e paragem dos comboios, tendo sido colocada em uso em 1987. Ainda 1987, Takeshi Yamakawa demonstrou a aplicação do controlo Fuzzy na

conhecida experiência do pêndulo invertido [38]. Posteriormente foram desenvolvidas no Japão diversas aplicações de controlo Fuzzy para bens de consumo e para a indústria [39]. Em 1988 foi criado o “Laboratory for International Fuzzy Engineering (LIFE)”, onde 48 companhias cooperaram no desenvolvimento da investigação nesta área, em que apenas a Volkswagen foi a única empresa estrangeira a participar neste programa que teve a duração de 3 anos [38]. Entre algumas das mais conhecidas aplicações, pode-se enunciar:

\_o sistema de limpeza automática dos aspiradores Matsushita com otimização da potência [40];

\_o sistema de focagem automática da Canon [41];

\_o controlo de ar condicionado, com melhorias na performance, com redução do consumo de energia, aumento da estabilidade da temperatura com o uso de apenas alguns sensores [38]**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**[42].

E muitas outras aplicações, desde reconhecimento de escrita manual [43], robots [44], helicópteros [45], elevadores [46], etc.

Na Europa e USA os primeiros estudos do controlo Fuzzy foram realizados pela “US Environmental Protection Agency” que realizou investigações no domínio do conhecimento do controlo Fuzzy para aumentar a eficiência energética de motores [47]. A NASA fez diversos estudos para aplicação do controlo Fuzzy [48]. Empresas como Boeing, General Motors, Allen-Bradley, Chrysler, Eaton e Whirlpool desenvolveram aplicações para refrigeração de baixo consumo, melhorando a transmissão nos automóveis e aumentando a eficiência energética nos motores elétricos [49]**Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Estudos e aplicações do controlo Fuzzy poderão também ser integrados com redes neuronais artificiais [50] e com os algoritmos genéticos [51][52], com o objetivo da autoaprendizagem dos sistemas concebidos com base na lógica Fuzzy [38].

É também importante aqui referir as duas metodologias distintas que no âmbito deste trabalho vão ser utilizadas no desenvolvimento dos controladores linguísticos Fuzzy para gerar regras heurísticas. A mais genérica, que não depende do processo, é a que tem por base o conhecimento de especialistas no comportamento de um controlador clássico com as funções proporcional e derivativa, a partir do qual se desenvolvem as regras heurísticas (ver capítulo 6.2). A outra metodologia é a partir das relações causais das variáveis do processo, estas dependem do processo que tem de ser analisado para se compreender que relações poderão ser estabelecidas e a partir delas estabelecer a estratégia de controlo com base em regras heurísticas (ver capítulo 6.3).

Na Figura 3.5 é apresentado o diagrama de blocos de um controlador linguístico Fuzzy, nomeadamente quando implementado numa malha de controlo com realimentação, com as principais operações que lhe estão subjacentes. Comparando a Figura 3.5 com a Figura 2.1 é possível concluir,

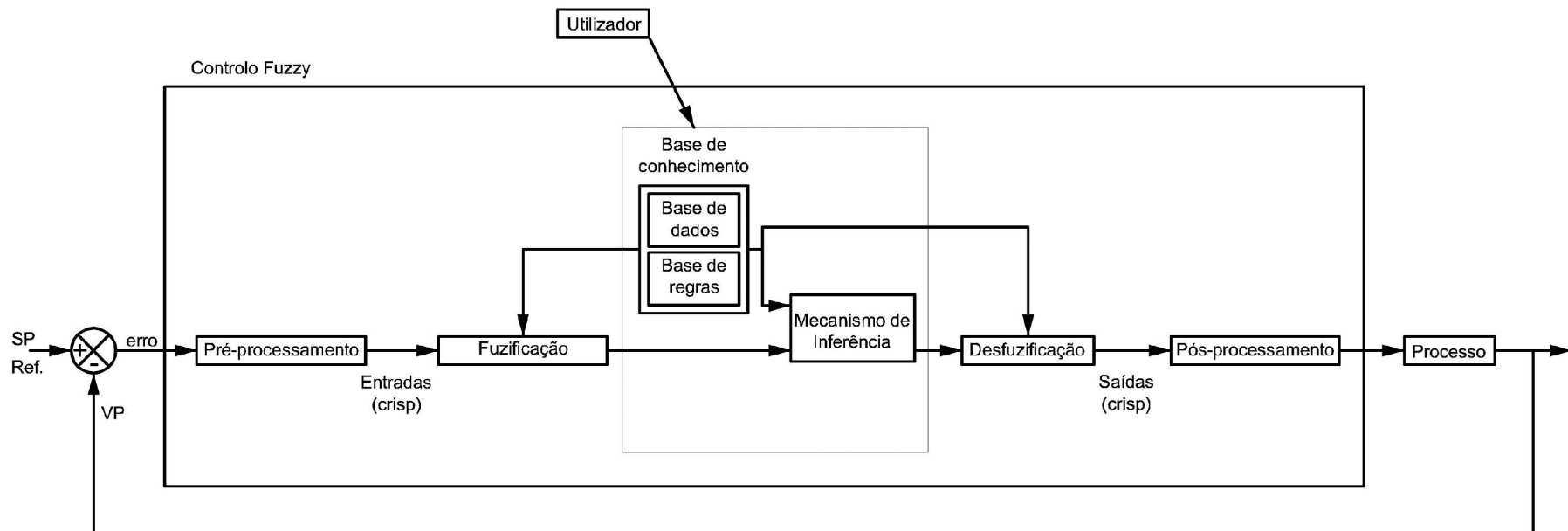


Figura 3.5– Diagrama do controlador Fuzzy em malha fechada

como aliás já foi referido, que a estrutura de um controlador linguístico é semelhante à de um sistema Fuzzy genérico, tendo a função dos respetivos blocos já sido descrita no Capítulo 2.

### **3.5 - Outro Tipo de Controladores Inteligentes**

Para além dos controladores linguísticos Fuzzy é de realçar que existem outras metodologias de controlo inteligente, nomeadamente quando são utilizados métodos com capacidade de aprendizagem, de decisão, que têm como base de funcionamento processos de “raciocínio” que de alguma forma imitam seres inteligentes, ou seja, com capacidade de realizar algumas atividades mentais do ser humano, mas também, em processos de controlo que imitam soluções “inteligentes” da natureza, por exemplo, metodologias de controlo baseadas em redes neuronais artificiais e eventualmente utilizando algoritmos genéticos em processos de otimização de parâmetros.

O Controlo Inteligente é conseguido com recurso aos microprocessadores, com variadas arquiteturas, que permitem a implementação de rotinas. As atividades realizadas por este tipo de controlo podem ter diversas variáveis de entrada, (p.ex: tato, audição, visão), podem ter capacidade de aprender e ter raciocínio dedutivo e memória, assim como utilizarem linguagem natural (verbal e gráfica) e concentrar a atenção, no sentido de concentrar as atividades sobre um determinado estímulo.

Esta tecnologia permite que máquinas possam realizar tarefas complexas no lugar de um operador humano, libertando-nos de atividades repetitivas, perigosas ou aumentar a eficiência do humano na sua interação com equipamentos sofisticados. Permite ainda, que o conhecimento de especialistas seja compartilhado e utilizado em máquinas [53].

Quando falamos de controlo inteligente é incontornável falar de metodologias de controlo que utilizam redes neuronais artificiais. O funcionamento do cérebro humano desde sempre fascinou os próprios humanos, desde os filósofos da Grécia antiga até aos dias de hoje em que podemos referenciar o “Human Brain Project” [54]. O conceito de neurónio, como constituinte estrutural elementar do cérebro é atribuído a S. Ramón y Cajal, no início do século XX [55][56]. W.S. McCulloch, psiquiatra e neuroanatomista, e W. Pitts, matemático, foram pioneiros na procura de circuitos que simulassem neurónios biológicos [57]. Em 1958, F. Rosenblatt introduziu o conceito de “Perceptron”, enquanto em 1960 B. Widrow e M.E. Hoff Jr. utilizaram o conceito de mínimos quadrados para formular o “Adaline” (Adaptive Linear Element).

Em 1969, M. Minsky e S. Papert publicaram o seu livro sobre “Perceptrons” em que se demonstravam as suas limitações. Este facto, aliado às limitações de tecnológicas, levou muitos cientistas a diminuírem as suas pesquisas nesta área.

Em 1982, J.J. Hopfield utilizou a ideia de funções de energia e estabeleceu conexões com a física e estatística, levando às redes de Hopfield. Também nesta data, 1982, T. Kohonen publicou os seus resultados sobre mapas auto-organizáveis. Em 1983, A.R. Barto, R.S. Sutton e C.W. Anderson introduziram o conceito de Reinforcement Learning. Em 1986, o algoritmo de aprendizagem designado por Back-Propagation foi desenvolvido por D.E. Rumelhart, G.E. Hinton e R.J. Williams. Em 1988, D.S. Broomhead e D. Lowe descreveram redes neuronais artificiais utilizando funções de base radial (Radial

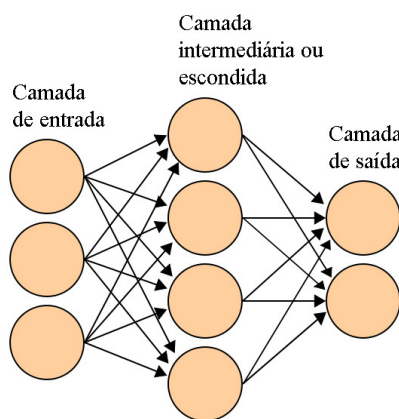
Basis Functions) [58][59].

Desta forma, chegou-se às redes neuronais artificiais como são hoje apresentadas na literatura, em que a sua arquitetura é constituída por neurónios ou nós ligados entre si, dispostos por camadas. A sua disposição nas camadas e o padrão de ligação entre estas definem a arquitetura da rede. A rede neuronal mais comum é sem realimentação (feedforward) mas existem também com realimentação ou recorrentes (recurrent). Há variantes nas redes neuronais artificiais, onde estas poderão ser utilizadas em conjunto com a lógica Fuzzy.

A forma mais simples de descrever uma rede neuronal é admitir apenas três camadas. Tem-se a 1ªcamada com as entradas, a camada intermediária ou escondida, onde é feito o processamento e a camada de saída, que conclui e apresenta os resultados finais, conforme representado na Figura 3.6. Quanto maior o número de camadas maior a capacidade de aprendizagem embora muitos autores defendam que com apenas três camadas é possível aproximar qualquer função [56].

Nos modelos mais simples tem-se um número fixo de camadas. Mais recentemente, são utilizados algoritmos genéticos para desenvolver e otimizar a estrutura da rede neuronal, bem como incorporados no algoritmo da aprendizagem das mesmas.

Aplicações desenvolvidas com base em redes neuronais artificiais, para resolver problemas nos mais variados domínios do conhecimento, têm revelado bons resultados, sendo exemplo disso: aproximação de funções [60], reconhecimento de padrões (imagens, sons) [61], previsão [62], diagnóstico [63], assim como nas mais diversas aplicações de controlo de sistemas [64][65][66][67][68][69].



**Figura 3.6**– Estrutura típica de uma rede neuronal de 3 camadas

Nos anos 70, John Holland introduziu um novo conceito no âmbito do domínio do conhecimento da inteligência artificial, a dos Algoritmos Genéticos, mais tarde popularizados por um dos seus alunos David Goldberg, nos finais dos anos 80. São assim chamados porque se inspiram na evolução biológica, genética e molecular, isto é, nos mecanismos de evolução das populações de seres vivos. Seguem assim o princípio da seleção natural e sobrevivência dos mais aptos, princípio este enunciado em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, no seu livro “A Origem das Espécies”, onde é referido,

“Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será a probabilidade de sobreviver e gerar descendentes” [70][71][72].

Estes algoritmos fazem evoluir uma população de indivíduos sujeitos a ações aleatórias semelhantes às que atuam na evolução biológica, com mutações e recombinações genéticas, assim como também a uma seleção de acordo com critérios, em se identificam os indivíduos mais aptos, que sobrevivem e os menos aptos que são descartados. Um algoritmo genético é um método de seleção baseada na probabilidade, sendo possível demonstrar que este algoritmo converge para o valor ótimo. Quanto maior o número de iterações a probabilidade de se obter um resultado ótimo tende para 1.

A otimização é a procura da melhor solução para um dado problema. A partir de várias soluções e com a informação obtida neste processo, encontram-se soluções cada vez melhores. Um exemplo simples de otimização é o ajuste manual da posição de uma antena interior para obter a melhor imagem possível na televisão, em que várias soluções são testadas, guiadas pela qualidade da imagem, até obter a melhor resposta. Esta técnica de otimização tem vindo a ser aplicada no âmbito do controlo de processos e equipamentos, nomeadamente na procura de valores ótimos para os parâmetros dos controladores [referências]. Todavia, a sua aplicação sai fora do âmbito do trabalho realizado conducente à escrita desta dissertação, bem como, o estudo da utilização de redes neuronais artificiais no controlo automático de processos.

### **3.6 - Conclusões**

O controlo clássico, PID, responde com qualidade aos sistemas lineares, no entanto uma grande parte dos sistemas reais são sistemas não lineares. É aqui que o controlo clássico encontra as suas limitações, com diminuição na qualidade do seu desempenho ou impossibilitando por completo a sua utilização, nomeadamente quando os processos possuem uma gama alargada de funcionamento.

Assim, para dar resposta a aplicações de controlo automático em processos ou equipamentos com um comportamento não linear, surge o chamado controlo inteligente, com vários algoritmos e metodologias para solucionar diferentes problemas. Não é fácil perceber qual ou quais as melhores soluções para dar resposta a um problema em concreto, embora se possam identificar tipologias de controlo em função dos sistemas a controlar. Para tal é necessário conhecer muito bem os diversos algoritmos e metodologias e estudar a sua aplicabilidade.

Com a conjugação de diferentes formas de controlo inteligente é possível obter soluções de grande qualidade, para uma grande variedade de aplicações, sendo esta uma área que evolui a cada dia, com o desenvolvimento de novos algoritmos e metodologias. Iremos assistir, certamente a uma grande evolução do controlo inteligente nos próximos anos e ainda se desconhecem os limites da sua aplicabilidade.

No âmbito do presente trabalho serão projetados controladores linguísticos Fuzzy visando lidar com situações em que as técnicas de controlo clássico não têm revelado bom desempenho, nomeadamente quando se pretende implementar controlo automático em processos ou equipamentos em que se verifica acoplamento de efeitos entre malhas de controlo.

## **Capítulo 4**

### **O Processo de Mistura**

#### **4.1 - Introdução**

A escolha do processo a seguir descrito deve-se à existência de acoplamento de efeitos entre duas malhas de controlo das variáveis de processo, fazendo deste sistema um sistema não linear, uma situação muito comum em processos reais e onde o controlo Fuzzy tem resultados com melhor desempenho face ao controlo clássico, nomeadamente utilizando controladores PID. Neste capítulo será efetuada uma descrição do processo, bem como a determinação do seu modelo analítico de fundamental importância para efetuar a sua simulação utilizando a plataforma computacional LabView. Serão ainda descritas as variáveis a controlar, bem como as correspondentes malhas de controlo. Apesar de ser um processo relativamente simples inclui o fenómeno de acoplamento de efeitos entre malhas de controlo, acima mencionado. As metodologias de controlo clássico têm revelado baixo desempenho quando perante este tipo de comportamentos sendo expectável que a utilização de controladores linguísticos Fuzzy apresente um melhor desempenho. Esta é efetivamente a razão fundamental para a escolha deste processo de mistura de um fluido a diferentes temperaturas.

#### **4.2 - Descrição do Processo**

No diagrama da Figura 4.1 temos o esquema do princípio de funcionamento do processo considerado, onde irá ocorrer uma mistura de água fria (AF) com água quente (AQ), sendo os correspondentes caudais regulados respetivamente através da válvula de controlo de água fria (VCAF) e da válvula de controlo de água quente (VCAQ).

Como se pode observar na Figura 4.1, existem dois tanques ligados em série, pretendendo-se controlar o nível e a temperatura do tanque 2. A VCAF será o órgão final da malha de controlo do nível e a VCAQ será o atuador da malha de controlo da temperatura.

A água fria proveniente da rede abastece todo o sistema passando pela Válvula Principal da Rede (VPR), vai para o tanque 1 passando pela VCAF e para o tanque de aquecimento. A água proveniente do tanque de água quente, passa pela válvula 5 apenas utilizada para manutenção, e vai para o tanque 1 passando pela VCAQ. O tanque 1 e 2 estão diretamente ligados e ao mesmo nível, a válvula 1 está normalmente aberta, assim como a válvula 2 e 3, de onde vem a água do tanque 2 para o reservatório. A válvula 4 encontra-se normalmente fechada apenas utilizada para manutenção e criação de outras hipotéticas configurações para o processo. A água do reservatório é bombeada para o tanque de aquecimento.

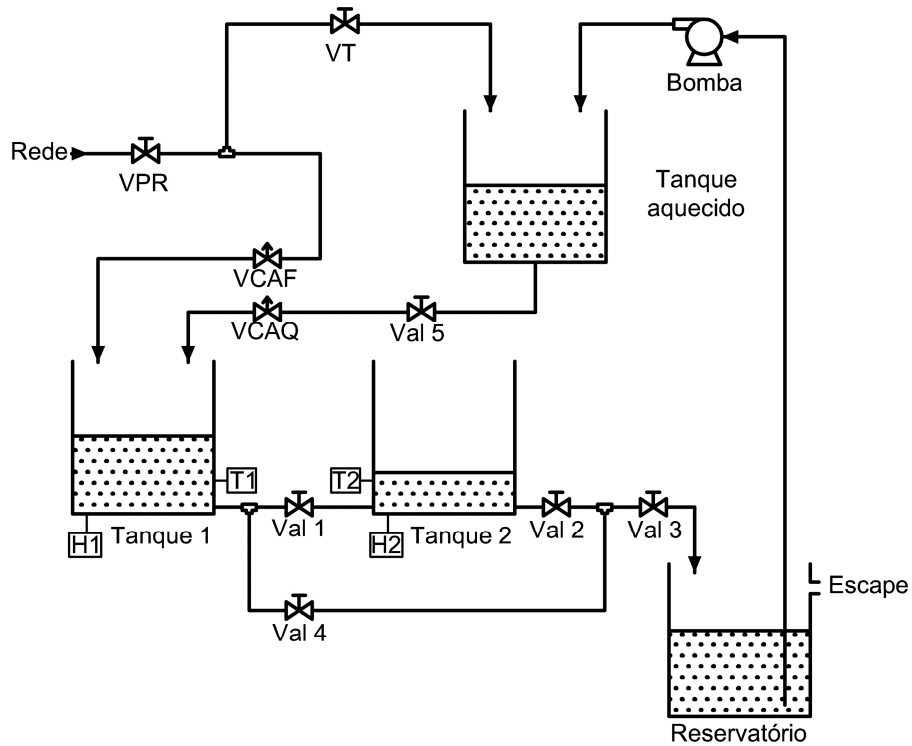


Figura 4.1 – Diagrama do processo de mistura

### 4.3 - Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico do processo de mistura de um fluido a diferentes temperaturas foi determinado efetuando balanços de massa e de temperatura aos tanques principais do processo. O modelo obtido foi posteriormente utilizado para efetuar a simulação do processo na plataforma computacional LabView.

Efetuando um balanço mássico ao Tanque 1 obtém-se a seguinte equação,

$$d(A_1 H_1 \rho) / dt = \rho (Q_f + Q_q) - \rho Q_{12} \quad (4.1)$$

uma vez que  $\rho = const.$  a equação (4.1) pode ser simplificada, obtendo-se,

$$A_1 \cdot \frac{dH_1}{dt} = Q_f + Q_q - Q_{12} \quad (4.2)$$

Da mesma forma, efetuando um balanço mássico ao Tanque 2 obtém-se a seguinte equação,

$$d(A_2 \cdot H_2 \cdot \rho) / dt = \rho \cdot (Q_{12} - Q_{2E}) \quad (4.3)$$

uma vez que  $\rho = const.$  a simplificação da equação (4.3) resulta em,

$$A_2 \cdot \frac{dH_2}{dt} = Q_{12} - Q_{2E} \quad (4.4)$$

Efetuando um balanço térmico ao Tanque 1, obtém-se a seguinte equação,

$$d(C \cdot \rho \cdot A_1 \cdot H_1 \cdot T_1) / dt = C \cdot \rho \cdot Q_f \cdot T_f + C \cdot \rho \cdot Q_q \cdot T_q - C \cdot \rho \cdot Q_{12} \cdot T_1 \quad (4.5)$$

uma vez que  $C = const.$  a equação (4.5) pode ser simplificada, obtendo-se,

$$A_1 \cdot T_1 \cdot \frac{dH_1}{dt} + A_1 \cdot H_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = Q_f \cdot T_f + Q_q \cdot T_q - Q_{12} \cdot T_1 \quad (4.6)$$

Multiplicando em ambos os lados da equação (4.2) por  $T_1$ , e substituindo na equação (4.6), obtemos,

$$A_1 \cdot H_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = Q_f \cdot (T_f - T_1) + Q_q \cdot (T_q - T_1) \quad (4.7)$$

Da mesma forma podemos escrever a equação correspondente ao balanço térmico para o tanque 2 da seguinte forma,

$$d(C \cdot \rho \cdot A_2 \cdot H_2 \cdot T_2) / dt = C \cdot \rho \cdot Q_{12} \cdot T_1 - C \cdot \rho \cdot Q_{2E} \cdot T_2 \quad (4.8)$$

uma vez que  $C = const.$  podemos simplificar a equação (4.8) obtendo-se a seguinte equação,

$$A_2 \cdot T_2 \cdot \frac{dH_2}{dt} + A_2 \cdot H_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = Q_{12} \cdot T_1 - Q_{2E} \cdot T_2 \quad (4.9)$$

Multiplicando em ambos os lados da equação (4.4) por  $T_2$  e substituindo na equação (4.9), obtemos,

$$A_2 \cdot H_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = Q_{12} \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.10)$$

O caudal de saída dos dois tanques,  $Q_{12}$  e  $Q_{2E}$ , é determinado através dos valores de pressão no fundo dos tanques e pelas características das válvulas, ou seja pode ser determinado pela aplicação da *equação de Bernoulli* ao escoamento de fluídos incompressíveis, podendo ser determinados pelas seguintes equações,

$$Q_{12} = k_1 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (4.11)$$

$$Q_{2E} = k_2 \sqrt{H_2} \quad (4.12)$$

Resumidamente, o modelo dinâmico do processo de mistura é apresentado pelas seguintes equações, da (4.13) à (4.18).

Através do balanço mássico obtivemos:

$$A_1 \cdot \frac{dH_1}{dt} = Q_f + Q_q - Q_{12} \quad (4.13)$$

$$A_2 \cdot \frac{dH_2}{dt} = Q_{12} - Q_{2E} \quad (4.14)$$

Pelo balanço térmico:

$$A_1 \cdot H_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = Q_f \cdot (T_f - T_1) + Q_q \cdot (T_q - T_1) \quad (4.15)$$

$$A_2 \cdot H_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = Q_{12} \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.16)$$

E sabemos que o caudal à saída através das válvulas é proporcional à raiz da diferença de pressões hidrostáticas sobre as válvulas:

$$Q_{12} = k_1 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (4.17)$$

$$Q_{2E} = k_2 \sqrt{H_2} \quad (4.18)$$

A nomenclatura utilizada foi a seguinte:

$A_1$  - Área da secção transversal do tanque 1 ( $cm^2$ );

$A_2$  - Área da secção transversal do tanque 2 ( $cm^2$ );

$H_1$  - Nível da água no tanque 1 ( $cm$ );

$H_2$  - Nível da água no tanque 2 ( $cm$ );

$T_1$  - Temperatura da água no tanque 1 ( $^{\circ}C$ );

$T_2$  - Temperatura da água no tanque 2 ( $^{\circ}C$ );

$T_f$  - Temperatura da água fria  $A_1$  ( $^{\circ}C$ );

$T_q$  - Temperatura da água quente  $A_1$  ( $^{\circ}C$ );

$Q_f$  - Caudal de água fria ( $cm^3/s$ );

$Q_q$  - Caudal de água quente ( $cm^3/s$ );

$Q_{12}$  - Caudal de água do tanque 1 para o tanque 2 ( $cm^3/s$ );

$Q_{2E}$  - Caudal de água do tanque 2 para o exterior ( $cm^3/s$ );

$t$  - Tempo (s);

$\rho$  - Massa específica da água  $A_1$  ( $g/cm^3$ );

$C$  - Calor específico da água  $A_1$  ( $J/g \cdot ^\circ C$ );

Foram definidas as seguintes constantes para a simulação do processo:

Área to tanque 1:  $A_1 = 290 \text{ cm}^2$

Área do tanque 2:  $A_2 = 150 \text{ cm}^2$

Valores característicos das válvulas obtidos experimentalmente:  $k_1 = k_2 = 30 \text{ cm}^{5/2}/s$ ;

Caudal máximo igual para as válvulas completamente abertas:

Caudal máximo de água fria:  $Q_{fmax.} = 500 \text{ cm}^3/s$ ;

Caudal máximo de água quente:  $Q_{qmax.} = 500 \text{ cm}^3/s$ ;

Temperatura da água fria:  $T_f = 20 \text{ }^\circ C$ ;

Temperatura da água quente:  $T_q = 80 \text{ }^\circ C$ ;

Altura do tanque 1 = Altura do tanque 2 = 100 cm

É importante salientar que na simulação efetuada as válvulas de controlo, da água fria e água quente, foram consideradas válvulas ideais, isto é, com um comportamento perfeitamente linear ao longo de toda a sua gama de operação (ver Figura 4.2), tendo sido desprezados os atritos, os fenómenos de histerese e zonas de banda morta [73].

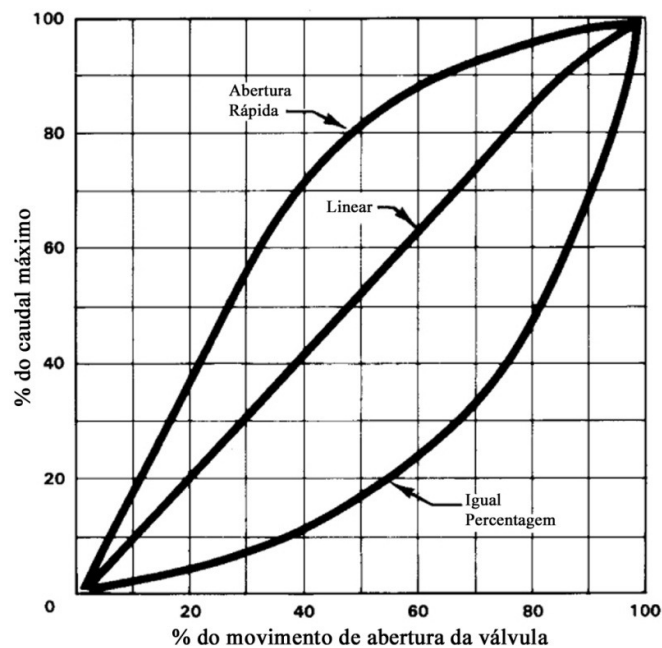


Figura 4.2– Características das válvulas de controlo

Com o intuito de reproduzir a comportamento de uma válvula de controlo real, a velocidade de abertura e fecho foi limitada para uma velocidade máxima de 60 segundo, para o curso completo de toda aberta para toda fechada e vice-versa [74].

De referir ainda que na determinação do modelo acima apresentado foram consideradas as seguintes aproximações:

- A diferença do valor da massa específica entre a AF e AQ é negligenciável;
- A diferença do valor do calor específico entre a AF e AQ é negligenciável;
- A mistura é perfeita;
- A água não ferve;
- Coeficientes de transmissão de calor são constantes;
- Os coeficientes de transmissão de calor para o exterior são negligenciáveis.

No subcapítulo seguinte é efetuada uma descrição das malhas de controlo utilizadas para efetuar o controlo automático do nível e da temperatura do fluido no Tanque 2.

#### **4.4 - Malhas de Controlo**

Para se controlar o nível e a temperatura, neste caso do tanque 2, serão necessárias duas malhas fechadas de controlo. O nível será controlado regulando o caudal de água fria, enquanto a temperatura será controlada regulando o caudal de água quente, conforme representado na Figura 4.3. Neste processo com estas duas malhas de controlo será inevitável o acoplamento de efeitos entre elas: quando a VCAF se movimentar para corrigir o nível, irá provocar alteração do valor da temperatura do fluido nos tanques, provocando a reação do controlador de temperatura; por outro lado, quando a VCAQ se movimentar para corrigir o valor da temperatura, irá provocar alteração do valor do nível do fluido dentro dos tanques, obrigando o respetivo controlador a reagir.

Nos testes realizados e cujos resultados se apresentam nos capítulos seguintes, foram utilizados controladores PID com o objetivo de gerar comportamentos de referência no controlo automático do processo em questão, os quais foram comparados com as respostas obtidas utilizando controladores linguísticos Fuzzy, permitindo avaliar o desempenho destes últimos, bem como a sua capacidade de lidar com acoplamento de efeitos entre malhas de controlo.

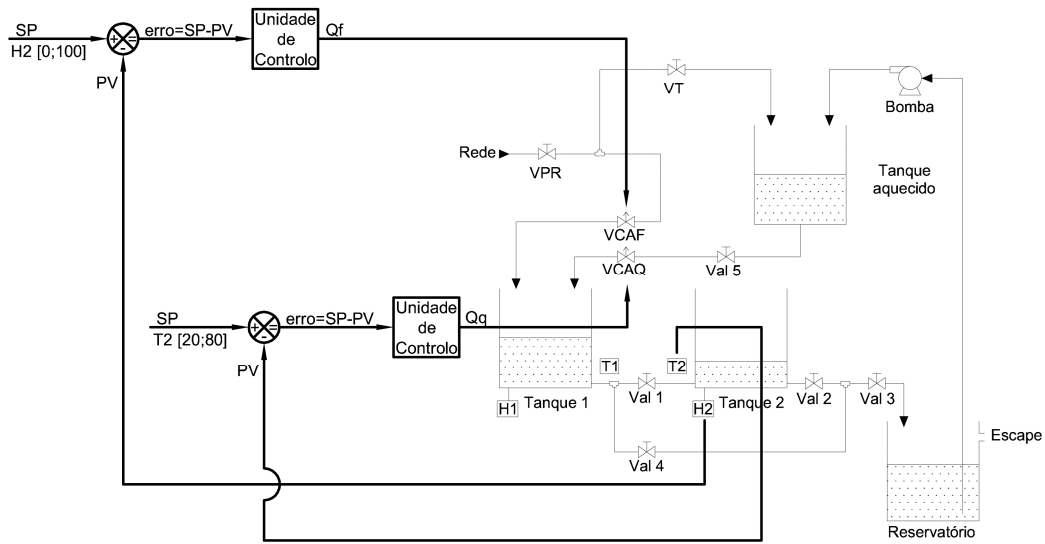


Figura 4.3– Malhas de controlo implementadas

A simulação do processo utilizando a plataforma computacional LabView foi realizada conforme o seguinte diagrama (ver Figura 4.4):

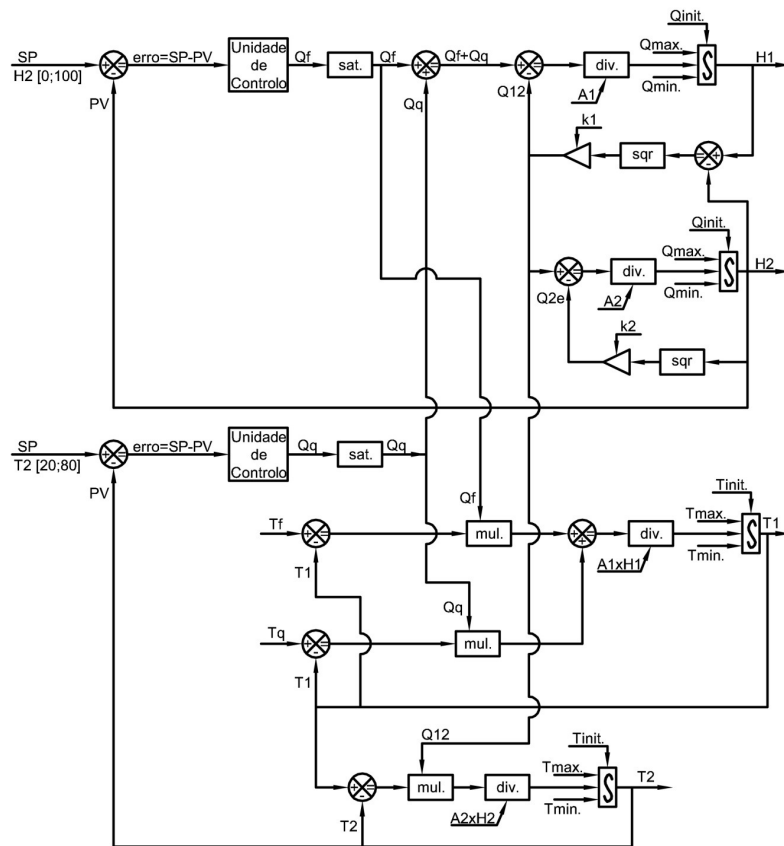


Figura 4.4– Diagrama do processo simulado no LabView

## Capítulo 5

### Controlo do Processo de Mistura Usando Controladores PID

#### 5.1 - Introdução

Este capítulo é dedicado ao controlo automático do processo de mistura descrito no capítulo anterior, utilizando controladores clássicos do tipo PID. Sendo as variáveis de processo a controlar o nível e a temperatura no tanque 2, teremos duas malhas fechadas de controlo, sendo o nível controlado através da VCAF, e a temperatura através da VCAQ (ver Figura 4.3).

Desta forma, será descrita a metodologia adotada para efetuar o ajuste dos parâmetros dos controladores utilizados. Assim serão determinados o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo, para cada controlador de cada uma das malhas de controlo, respetivamente do nível e da temperatura, através do 1º Método de Ziegler-Nichols em conformidade com a descrição teórica apresentada no Capítulo 3 [30][33].

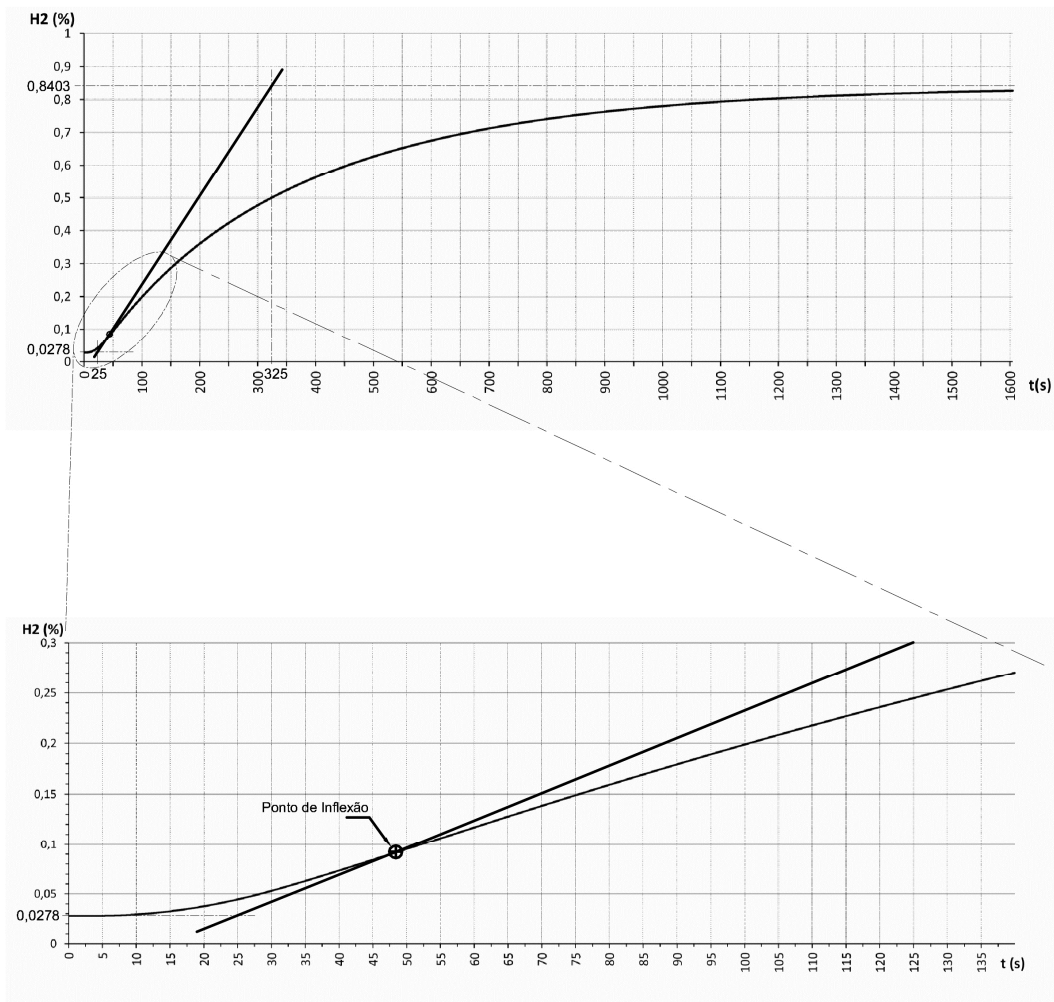
Visando avaliar o desempenho da metodologia de controlo adotada e gerar comportamentos de referência para que se possa avaliar o desempenho de controladores linguísticos Fuzzy em alternativa aos controladores clássicos do tipo PID utilizados no trabalho apresentado neste Capítulo, foram realizados diversos ensaios, em que os resultados mais relevantes serão apresentados nos subcapítulos seguintes, sendo também efetuada uma avaliação do desempenho dos controladores utilizados.

#### 5.2 - Ajuste dos Parâmetros dos Controladores

Para determinar os parâmetros  $k_c; T_i; T_d$ , dos controladores PID utilizados respetivamente nas malhas de controlo do nível e temperatura do tanque 2, recorreu-se a 1º Método de Ziegler-Nichols (ver Figura 3.4).

Como já descrito no Capítulo 3, para calcular os valores dos parâmetros do controlador PID é necessário determinar os valores  $L$  e  $T$ , e no que respeita à malha de controlo do nível, para esse efeito realizou-se o seguinte ensaio: com as duas válvulas a debitarem 5% do caudal máximo no instante inicial, isto é, um caudal inicial total de  $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ , fez-se variar o caudal da água fria de 5% para 50%, a que corresponde um incremento de  $250 \text{ cm}^3/\text{s}$ , isto é, um caudal final de  $275 \text{ cm}^3/\text{s}$ , em conformidade com os pressuposto de aplicação do 1º Método de Ziegler-Nichols anteriormente descritos.

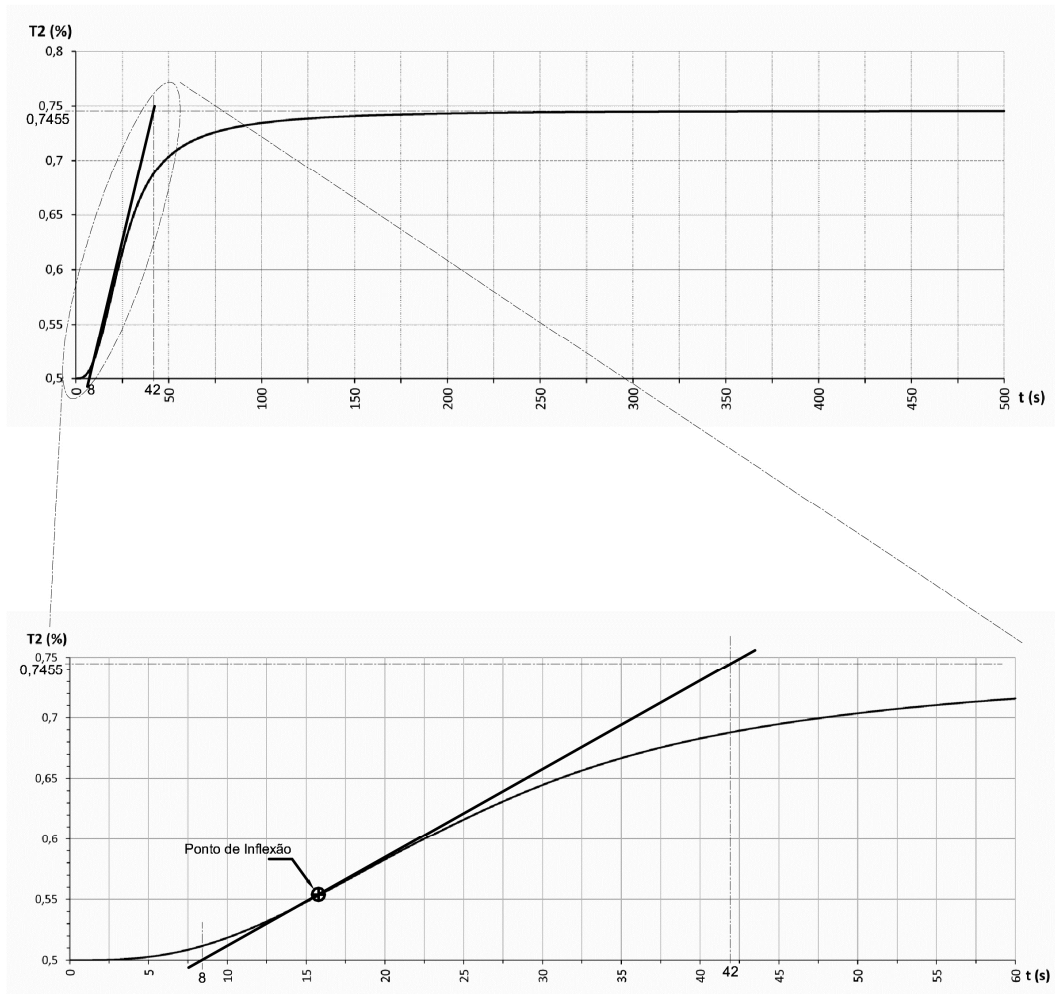
Por outras palavras, ao fazer-se variar o caudal de água fria fez-se variar o nível do tanque 2. A resposta obtida encontra-se representada na Figura 5.1.



**Figura 5.1**– Resposta do nível do tanque 2,  $H_2$ , para uma variação em degrau do caudal de água fria

A partir do gráfico com a resposta do processo, representado na Figura 5.1, obtiveram-se os valores  $L$  e  $T$  ( $L = 25$  e  $T = 300$ ). Com as fórmulas (3.3), (3.4) e (3.5) calcularam-se os parâmetros do controlador PID utilizado na malha de controlo do nível no tanque 2, obtendo-se os seguintes resultados  $k_c = 14,4$ ;  $T_i = 50 \text{ s}$ ;  $T_d = 12,5 \text{ s}$ .

Da mesma forma que se calcularam os parâmetros para o controlador PID utilizado na malha de controlo do nível no tanque 2, serão calculados os parâmetros para o controlador utilizado na malha de controlo da temperatura no tanque 2: com as duas válvulas a debitarem um caudal de 5% do caudal máximo, a que corresponde uma temperatura do fluido de 50°C, fez-se variar o caudal de AQ, de 5% para 50%, do que resultou a resposta representada na Figura 5.3. Isto é, ao fazer-se variar o caudal de água quente fez-se variar a temperatura do tanque 2. Na Figura 5.2 está representado o resultado obtido para a variação da temperatura no tanque 2.



**Figura 5.2**– Resposta da temperatura no tanque 2, T2, para uma variação em degrau do caudal de água quente

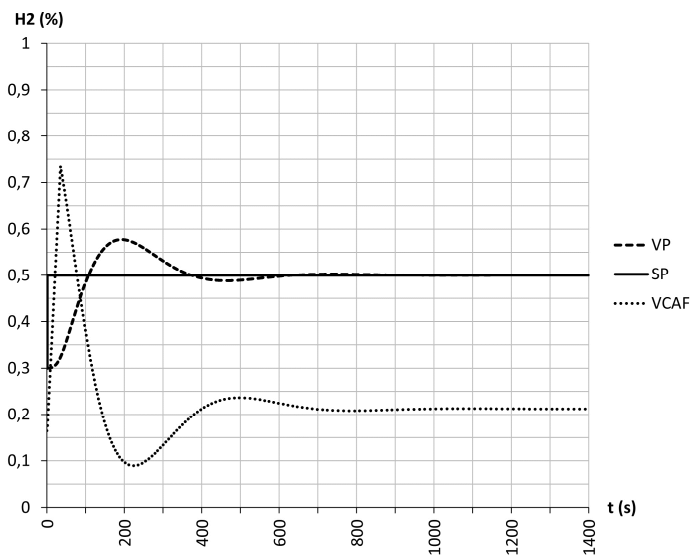
A partir do gráfico representado na Figura 5.2, obtiveram-se os correspondentes valores  $L$  e  $T$  ( $L = 8$  e  $T = 34$ ). Com as fórmulas (3.3), (3.4) e (3.5) calcularam-se os correspondentes parâmetros do controlador PID utilizado na malha de controlo da temperatura no tanque 2, obtendo-se os seguintes resultados  $k_c = 3,7$ ;  $T_i = 20\text{ s}$ ;  $T_d = 5\text{ s}$ .

Devido ao acoplamento de efeitos verificou-se que com os parâmetros obtidos para os controladores PID, através do método acima mencionado, quando ocorriam perturbações nas malhas de controlo, frequentemente a resposta dos controladores conduzia a uma situação de instabilidade. Visando

reparar o problema anterior e partindo dos valores obtidos, através do método de Ziegler-Nichols atrás descrito, foi efetuado um ajuste fino por tentativa-erro, desses parâmetros até os controladores exibirem um desempenho aceitável. Assim os parâmetros a que se chegou foram, para o controlador da malha de controlo do nível,  $k_c = 14,4$ ;  $T_i = 150\text{ s}$ ;  $T_d = 12,5\text{ s}$ , e para o controlador da malha de controlo da temperatura,  $k_c = 3,7$ ;  $T_i = 100\text{ s}$ ;  $T_d = 5\text{ s}$ .

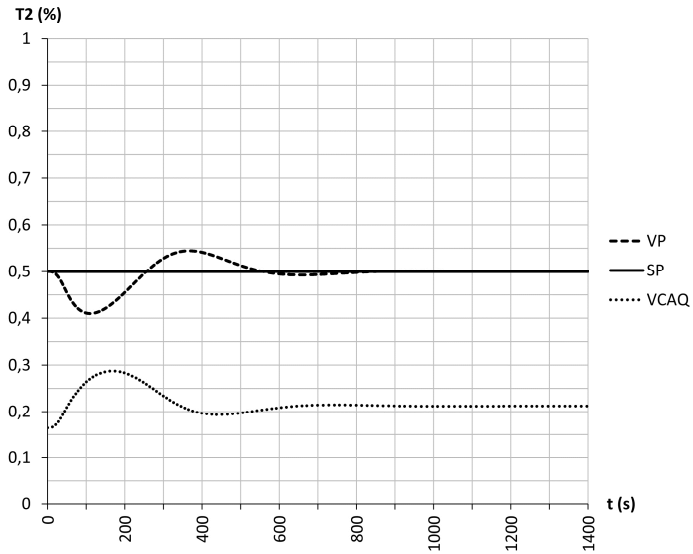
### 5.3 - Desempenho dos Controladores

Para testar o desempenho dos controladores começou-se por provocar alteração no valor de referência da variável controlada nível do tanque 2. Desta forma, foi provocada uma variação de 30 para 50cm no valor de referência do nível, tendo-se obtido os resultados apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4.



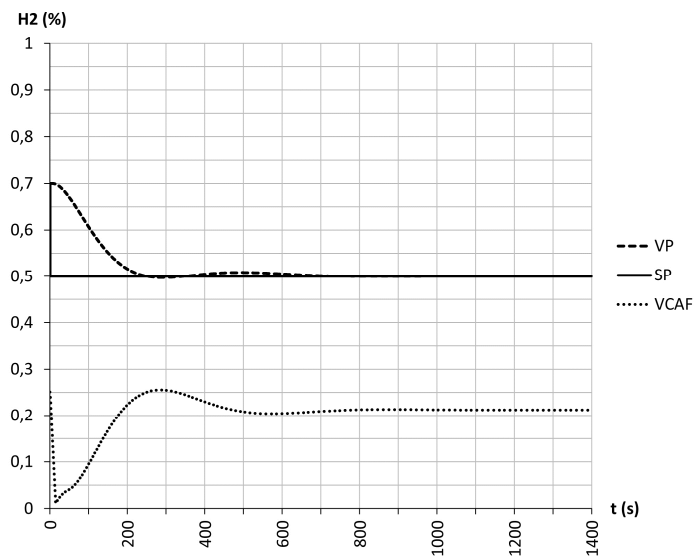
**Figura 5.3**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (PID)

De salientar uma sobrelevação significativa na resposta do controlador inserido na malha de controlo de nível (ver Figura 5.3) e um nítido acoplamento de efeitos entre malhas de controlo (ver Figura 5.4). Ou seja, o controlador utilizado na malha de controlo do nível, para ajustar o nível H2 provoca uma grande variação da temperatura T2.

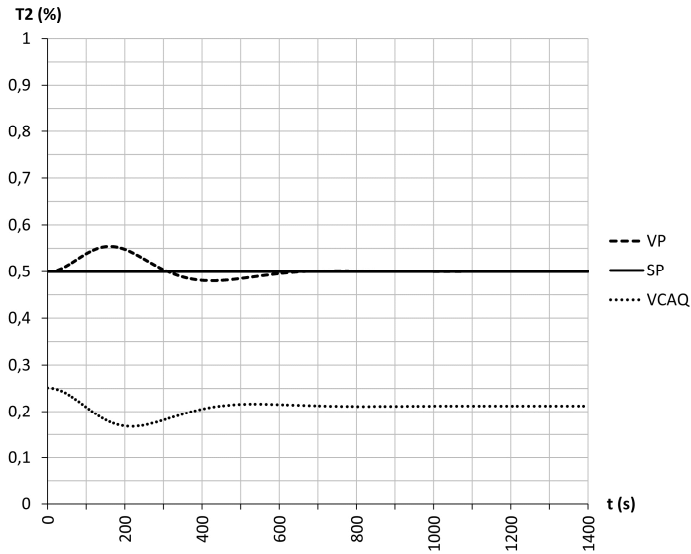


**Figura 5.4**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (PID)

Nos ensaios realizados observou-se que o desempenho dos controladores não é semelhante quando a variação do valor desejado para a variável controlada é para valores superiores ou inferiores. Desta forma, provocando-se uma alteração no valor desejado do nível de 70 para 50cm, obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6.



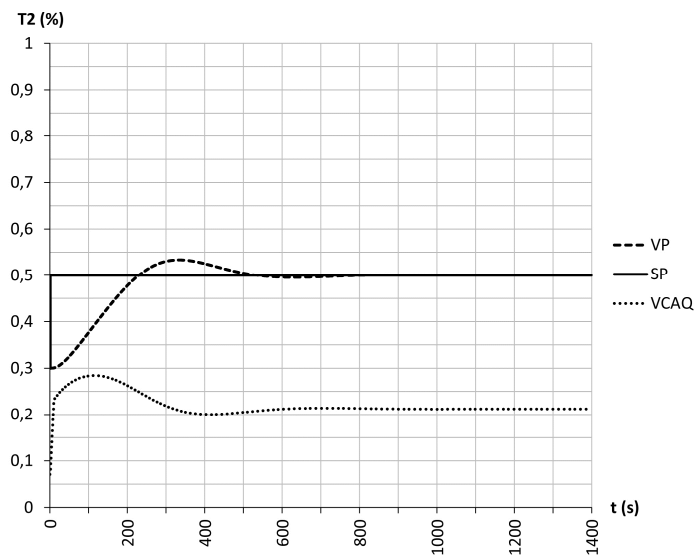
**Figura 5.5**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (PID)



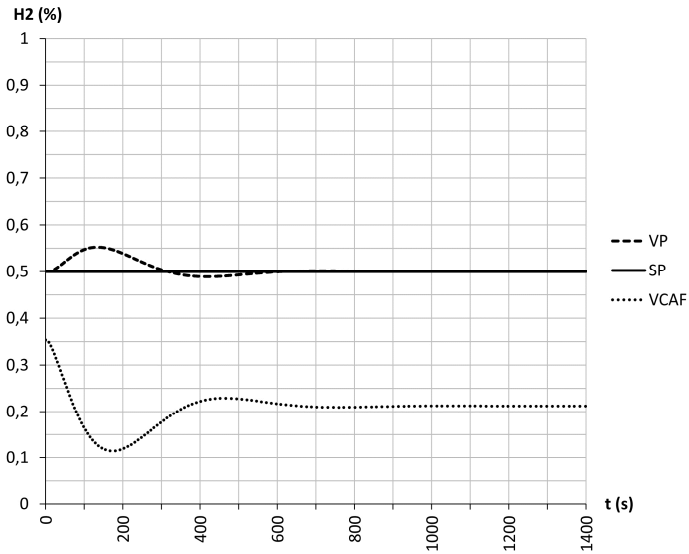
**Figura 5.6**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (PID)

Verifica-se que a sobrelevação da resposta é praticamente inexistente (ver Figura 5.5), todavia, acoplamento de efeitos entre malhas de controlo mantém-se (ver Figura 5.6).

De forma semelhante, testou-se agora o desempenho do controlador inserido na malha de controlo da temperatura no tanque 2, provocando variações do valor desejado da correspondente variável controlada. Começou-se por provocar uma variação no valor do valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 30 para 50°C, tendo-se obtido os resultados apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8.

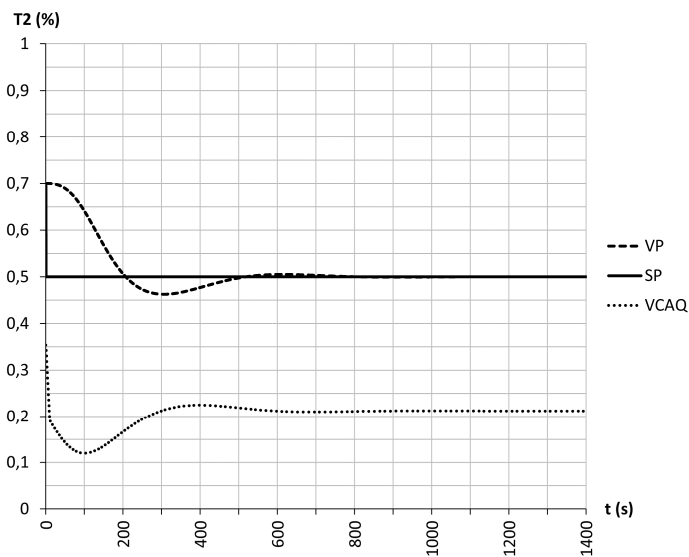


**Figura 5.7**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (PID)



**Figura 5.8**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (PID)

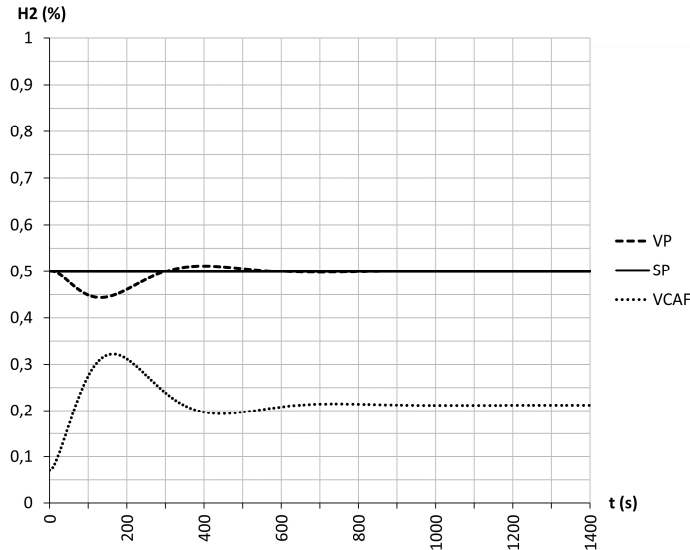
De salientar uma significativa sobrelevação da resposta do controlador (ver Figura 5.7), continuando a verificar-se a existência de acoplamento de efeitos entre malhas de controle (ver Figura 5.8), ou seja, o controlador para conseguir ajustar a temperatura T2 provoca uma grande variação do nível H2.



**Figura 5.9**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (PID)

Da mesma forma que no caso do controlador do nível foram efetuados ensaios provocando variações nos valores desejados para a variável controlada para valores superiores e inferiores, uma vez

que a resposta não era exatamente igual, para o controlador inserido na malha de controlo da temperatura foi também realizado um ensaio em que se provocou uma variação no valor da desejado para a temperatura de 70 para 50°C, estando os resultados obtidos representados nas Figuras 5.9 e 5.10.



**Figura 5.10**– Resposta da malha de controlo de nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (PID)

Continua a verificar-se alguma sobrelevação na resposta do controlador (ver Figura 5.9), mantendo-se a existência de acoplamento de efeitos entre malhas de controlo (ver Figura 5.10).

## 5.4 - Conclusões

Neste capítulo foram utilizados controladores PID para gerar sinais de controlo de referência a serem comparados com os sinais de controlo gerados pelos controladores linguísticos Fuzzy que serão apresentados no próximo capítulo.

Para ajustar os parâmetros dos controladores foi utilizado o 1º método de Ziegler Nichols. Todavia, devido ao acoplamento de efeitos entre as malhas de controlo foi necessário efetuar alguns ajustes aos valores obtidos para os parâmetros dos controladores, seguindo uma metodologia de tentativa-erro, visando assegurar a estabilidade das malhas de controlo quando são efetuadas alterações ao valor desejado das variáveis controladas.

Como era expectável, os resultados obtidos permitem observar uma forte interação entre malhas de controlo, devido ao acoplamento de efeitos que tem vindo a ser mencionado, permitindo concluir que o desempenho dos controladores PID não é adequado sempre que este tipo de fenómeno se verifique e seja desejável a sua minimização no comportamento das malhas de controlo.

Perspetiva-se que os efeitos deste fenómeno sejam minimizados ou mesmo eliminados utilizando controladores linguísticos Fuzzy, o que será objeto de análise no próximo capítulo.

## Capítulo 6

### Controlo do Processo de Mistura Usando Controladores Fuzzy

#### 6.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentadas duas metodologias para conceção de controladores linguísticos Fuzzy, nomeadamente no que se refere ao método adotado para gerar as regras heurísticas que constituem a base de conhecimento do controlador e traduzem a estratégia de controlo a implementar. A arquitetura de controlo será a mesma que foi utilizada no capítulo anterior, embora neste capítulo os controladores clássicos do tipo PID sejam substituídos por controladores em que a estratégia de controlo é implementada por recurso a regras heurísticas concebidas com base na utilização de lógica Fuzzy, em conformidade com o diagrama de blocos apresentado na Figura 3.5.

Para os controladores desenvolvidos e apresentados neste capítulo será efetuado o ajuste dos correspondentes parâmetros que irão caracterizar o seu funcionamento e correspondente desempenho, sendo perceptível que relativamente a um controlador clássico do tipo PID o ajuste dos parâmetros de um controlador linguístico Fuzzy é mais complicado, nomeadamente devido ao facto de existir um maior número de graus de liberdade e não existirem metodologias sistemáticas de ajuda à realização desta tarefa.

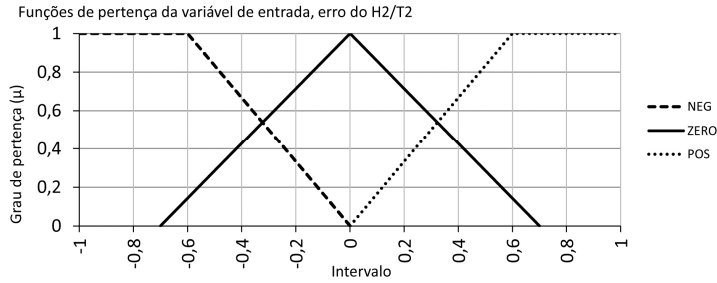
Visando avaliar o desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy que são apresentados neste capítulo será ainda efetuada uma comparação das respetivas respostas, com a resposta dos controladores PID cujos resultados foram apresentados no capítulo anterior. Como já anteriormente mencionado, será expectável que se obtenha um melhor desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy, nomeadamente no que se refere à minimização ou mesmo eliminação do acoplamento de efeitos entre malhas de controlo.

## 6.2 - Conhecimento Usado para Gerar Regras Heurísticas

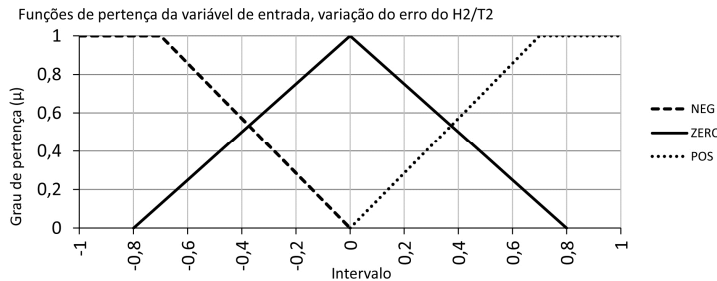
Um dos aspetos fundamentais na conceção de controladores linguísticos Fuzzy consiste na metodologia a adotar para gerar as regras heurísticas que irão traduzir a estratégia de controlo e constituir a base de conhecimento do controlador. Neste subcapítulo é desenvolvido e apresentado um controlador em que a estratégia seguida para gerar as regras heurísticas tem por base aquilo que na literatura se designa por conhecimento de especialistas, que neste caso concreto consiste no conhecimento existente relativamente ao funcionamento de um controlador clássico com ação de controlo proporcional e derivativa. Nesta conformidade, embora este controlador seja implementado numa arquitetura em malha fechada em substituição dos controladores clássicos do tipo PID, passará a ter duas entradas, ou seja, o *erro* e a *variação do erro*, que constituirão as variáveis Fuzzy cujo comportamento se irá pretender caracterizar, dando origem ao aparecimento de duas condições no antecedente das regras heurísticas que serão ligadas pela conectiva “e”. A saída do controlador constituirá o consequente das regras heurísticas, sendo o sinal de controlo a enviar ao órgão final da cadeia de controlo.

Seguindo a metodologia empírica anteriormente mencionada para a conceção/projeto de controladores linguísticos Fuzzy começou-se por utilizar três conjuntos Fuzzy para caracterizar cada uma das variáveis Fuzzy acima referidas e utilizadas no antecedente das regras heurística, conforme representado nas Figuras 6.1 e 6.2, e cinco conjuntos Fuzzy para caracterizar o comportamento da variável Fuzzy associada ao consequente das regras heurísticas, conforme representado na Figura 6.3. A existência de três conjuntos Fuzzy para caracterizar o comportamento das variáveis linguísticas Fuzzy utilizadas no antecedente das regras heurísticas dará origem a uma base de conhecimento constituída por nove regras. Por outro lado, as funções de pertença associadas a cada um dos conjuntos Fuzzy acima mencionados foram ajustadas através do método tentativa-erro até alcançar o desempenho desejado para os controladores. De salientar que nos ensaios cujos resultados serão apresentados a seguir foi utilizado exatamente o mesmo controlador na malha de controlo do nível no tanque 2 e na malha de controlo da temperatura no tanque 2.

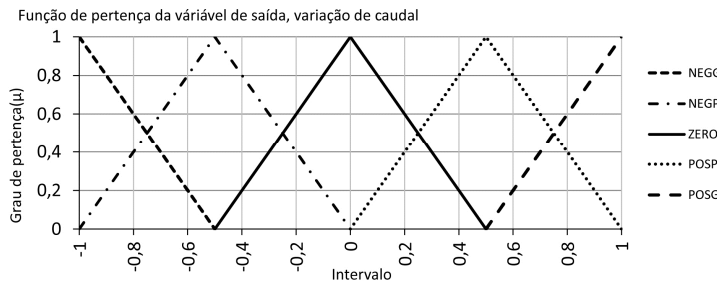
Por outro lado, a nomenclatura utilizada para designar os conjuntos Fuzzy representados nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, bem como, na Tabela 6.1, foi a seguinte: NEG – negativo; ZERO – zero; POS – positivo; NEGG – negativo grande; NEGP – negativo pequeno; POSP – positivo pequeno; POSG – positivo grande.



**Figura 6.1**– Conjuntos Fuzzy e respectivas funções de pertinência para caracterização do *erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 9 regras



**Figura 6.2**– Conjuntos Fuzzy e respectivas funções de pertinência para caracterização da *variação do erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 9 regras



**Figura 6.3**– Funções de pertinência da variação do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 9 regras

Nesta conformidade, na Tabela 6.1 são apresentadas as 9 regras heurísticas geradas com base no conhecimento de especialistas relativamente ao funcionamento de um controlador clássico com ações de controlo proporcional e derivativa, as quais definem a estratégia de controlo do controlador aqui projetado. Para que o leitor entenda a estratégia seguida para traduzir o conhecimento de especialista no funcionamento de um controlador clássico com ações de controlo proporcional e derivativa em regras heurísticas, são apresentados a seguir dois exemplos, considerando a malha de controlo de nível no tanque 2, em tudo semelhante ao que se passa com a malha de controlo de temperatura no tanque 2:

- Se o *erro* é negativo, ou seja, se o valor desejado da variável controlada (nível no tanque 2) é inferior ao seu valor real, e a *variação do erro* é positiva, ou seja, o valor real da variável controlada (nível no tanque 2) está com tendência para se aproximar do seu valor desejado, para que o controlador reaja com alguma antecipação relativamente ao comportamento da variável controlada, o caudal de água fria deverá manter-se constante;

- Se o *erro* é positivo, ou seja, se o valor desejado da variável controlada (nível no tanque 2) é superior ao seu valor real, e se a *variação do erro* é positiva, ou seja, o valor real da variável controlada (nível no tanque 2) está com tendência para se afastar do seu valor desejado tornando o valor do *erro* mais positivo, então o caudal de água deverá aumentar significativamente para inverter a tendência do valor do nível no tanque 2.

**Tabela 6.1** — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 9 regras

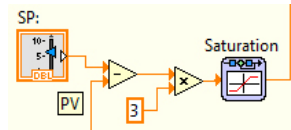
E/VE	NEG	ZERO	POS
NEG	NEGG	NEGP	ZERO
ZERO	NEGP	ZERO	POSP
POS	ZERO	POSP	POSG

De referir que na Tabela 6.1 as letras *E* e *VE* significam respetivamente as variáveis linguísticas Fuzzy *erro* e *variação do erro*.

Por outro lado, observando as Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 é possível concluir que a definição dos conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertença, construídas para caracterizar o comportamento das variáveis linguísticas Fuzzy envolvidas na conceção da estratégia de controlo do controlador, foi efetuada num universo normalizado correspondente ao intervalo entre -1 e +1. De realçar que esta abordagem simplifica a conceção do controlador, nomeadamente permitindo a utilização da mesma base de conhecimento para controlar diferentes variáveis físicas de processo incluindo variáveis com diferente significado físico. Todavia, tendo sido assumido que as variáveis de entrada dos controladores implementados assumem valores no universo normalizado acima mencionado, para cada controlador será necessário normalizar os valores assumidos por essas variáveis, ou seja, será necessário normalizar os valores assumidos pelas variáveis linguísticas Fuzzy *erro* e *variação do erro*, para cada uma das malhas de controlo consideradas. Em conformidade com o diagrama de blocos apresentado na Figura 3.5, a tarefa de normalização dos valores assumidos pelas variáveis de entrada do controlador é assegurada pelo bloco designado por “Pré-processamento”.

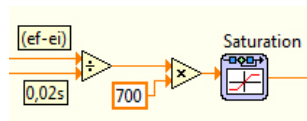
A normalização dos valores assumidos pelas variáveis de entrada do controlador, mencionada no parágrafo anterior, será realizada através da multiplicação dos respetivos valores por uma constante cujo valor será necessário determinar. A abordagem mais lógica seria determinar o valor máximo das variáveis de entrada do controlador em função dos valores assumidos pela variável controlada e dividir todos os valores dessas variáveis pelo correspondente valor máximo. Todavia, verificou-se que para pequenas variações do valor desejado da variável controlada os valores assumidos nomeadamente pela variável *erro* eram manifestamente inferiores ao valor máximo atrás mencionado, de tal forma que a sua utilização como parâmetro de normalização implicava que após fuzzificação da mencionada variável a sua caracterização fosse preferencialmente efetuada pelo conjunto Fuzzy ZERO, implicando um disparo preferencial das regras heurísticas que lhe estão associadas. Esta situação conduzia frequentemente à instabilidade das malhas de controlo. Para ultrapassar esta situação indesejável, que originava um mau desempenho dos controladores, as constantes de normalização foram determinadas seguindo a metodologia

de tentativa-erro, visando que os valores normalizados das variáveis de entrada dos controladores varressem todo o universo considerado, suavizando a resposta do controlador. Naturalmente que foi necessário encontrar uma situação de compromisso entre caracterizar preferencialmente com um único conjunto Fuzzy o comportamento das variáveis de entrada do controlador para pequenas variações do valor desejado e provocar que os valores limites do universo fossem assumidos durante demasiado tempo pelas variáveis de entrada quando eram solicitadas variações maiores ao valor desejado da variável controlada. De realçar ainda, que a existência de acoplamento de efeitos entre malhas de controlo trouxe dificuldades acrescidas à tarefa de encontrar os parâmetros de normalização que proporcionassem o desempenho desejado para os controladores, nomeadamente no que se refere à variável *variação do erro*. Por outro lado, será de referir que a alteração de valores nas variáveis de entrada dos controladores é escrutinada a cada instante de amostragem e processada pelo controlador de acordo com a estratégia de controlo implementada. Nesta conformidade, para a contante de normalização da variável linguística Fuzzy *erro*, respetivamente para as malhas de controlo de nível e temperatura no tanque 2 foram respetivamente determinados os valores 3 e 2, conforme representado na Figuras 6.4 correspondente à malha de controlo de nível, extraída da plataforma computacional LabView. Na implementação do bloco “Pré-processamento” é ainda utilizado um bloco de saturação para manter o valor da respetiva variável linguística Fuzzy dentro do intervalo  $[-1, +1]$ .



**Figura 6.4**– Bloco de pré-processamento para a variável linguística Fuzzy *erro* na malha de controlo de L2

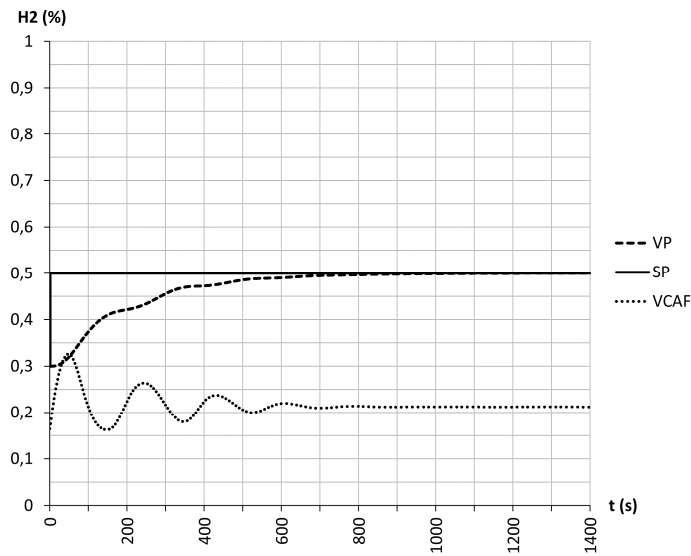
Seguindo a mesma metodologia, para a variável linguística *variação do erro* foram determinados os valores a seguir indicados para as constantes de normalização correspondentes às malhas de controlo do nível e temperatura no tanque 2: respetivamente 700 e 200. A Figura 6.5 ilustra o processo de normalização relativamente à malha de controlo do nível no tanque 2.



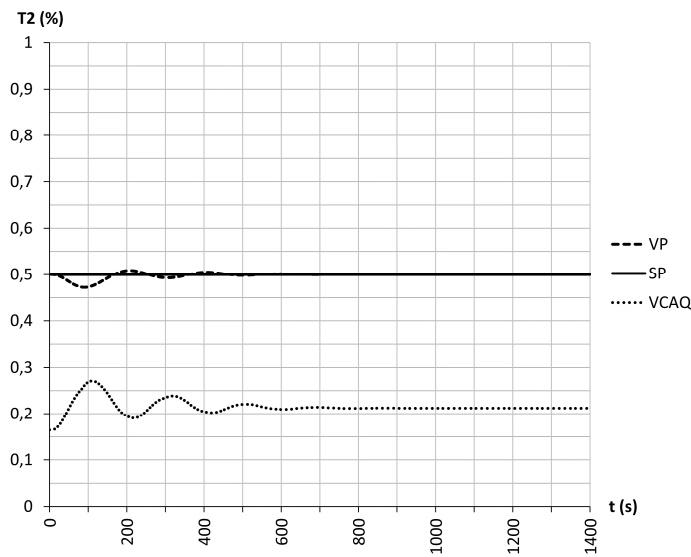
**Figura 6.5**– Bloco de pré-processamento para a variável linguística Fuzzy *variação do erro* na malha de controlo de L2

O controlador linguístico Fuzzy, acima projetado, foi testado considerando as mesmas variações no valor desejado das variáveis controladas que foram utilizadas no capítulo anterior para testar o comportamento dos controladores PID utilizados, visando a criação de situações comparáveis para avaliar o desempenho dos controladores. Desta forma, considerando agora a inserção dos controladores linguísticos Fuzzy nas malhas de controlo, o valor desejado para o nível foi alterado de 30 para 50cm e de

70 para 50cm, estando as respostas das malhas de controlo representadas respetivamente nas Figuras 6.6 e 6.7, e nas Figuras 6.8 e 6.9. Comprando os resultados obtidos com os resultados equivalentes obtidos com a utilização de controladores clássicos do tipo PID, podemos afirmar que o desempenho do controlador linguístico Fuzzy inserido na malha de controlo de nível é superior ao PID, nomeadamente porque apesar do tempo de estabelecimento ser semelhante a sobrelevação da resposta desapareceu, conforme se pode verificar comparando as Figuras 5.6 e 6.6. Por outro lado, o efeito das interações entre malhas de controlo apesar de não ter sido completamente eliminado é significativamente inferior ao verificado com a utilização de controladores PID, o que resulta em menores perturbações no valor da outra variável

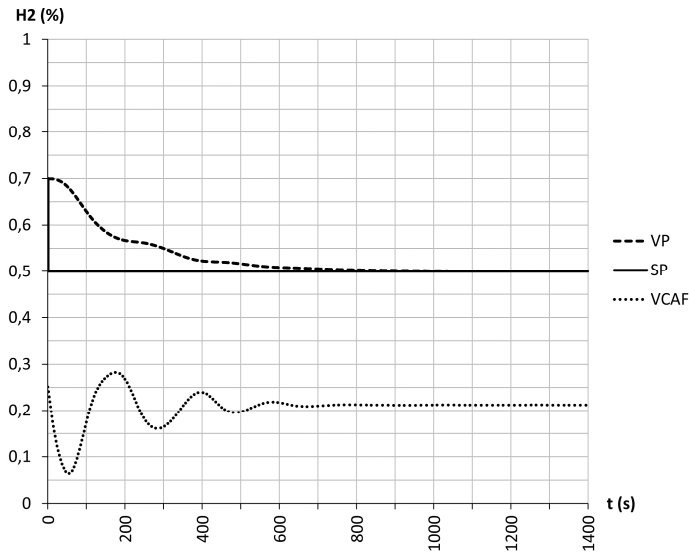


**Figura 6.6**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 9 regras)

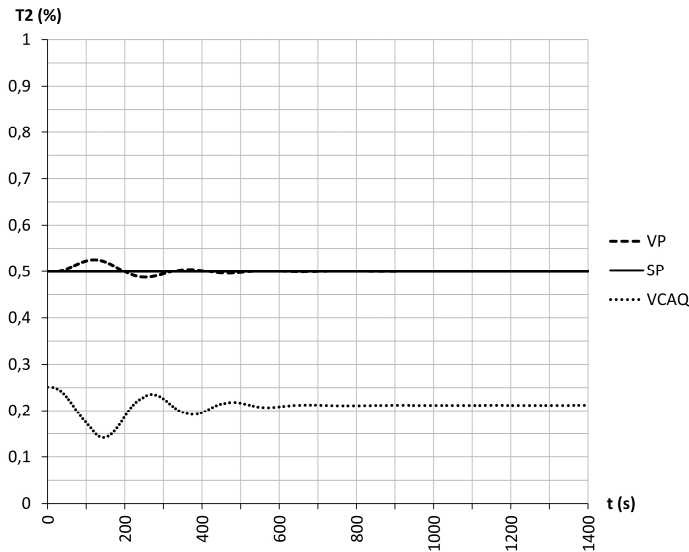


**Figura 6.7**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 9 regras)

controlada, ou seja a temperatura no tanque 2, conforme se pode observar comparando as Figuras 5.7 e 6.7. Relativamente ao segundo ensaio acima mencionado, que corresponde à variação do valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 cm para 50 cm, apesar do tempo de estabelecimento do ensaio equivalente utilizando o controlador PID ser um pouco inferior, na resposta no controlador linguístico Fuzzy a sobrelevação foi completamente eliminada, conforme se pode observar comparando as Figuras 5.8 e 6.8. Relativamente ao acoplamento de efeitos entre malhas de controlo o resultado foi semelhante ao obtido no ensaio anterior, ou seja, o desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy é superior aos PID, como podemos observar comparando as Figuras 5.9 e 6.9.

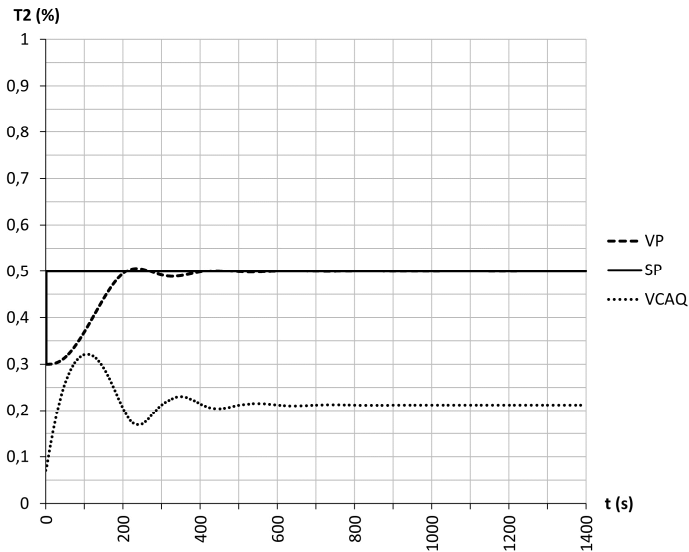


**Figura 6.8**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 9 regras)

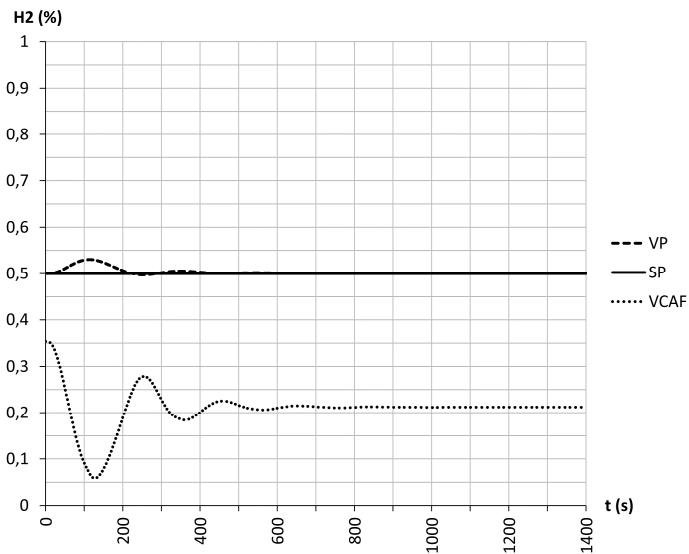


**Figura 6.9**– Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 9 regras)

Para avaliar o desempenho do controlador linguístico Fuzzy inserido na malha de controlo de temperatura no tanque 2, o valor desejado para essa temperatura foi assim alterado de 30 para 50°C e de 70 para 50°C, estando as correspondentes respostas das malhas de controlo representadas respetivamente nas Figuras 6.10 e 6.11, e nas Figuras 6.12 e 6.13.



**Figura 6.10**– Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 9 regras)

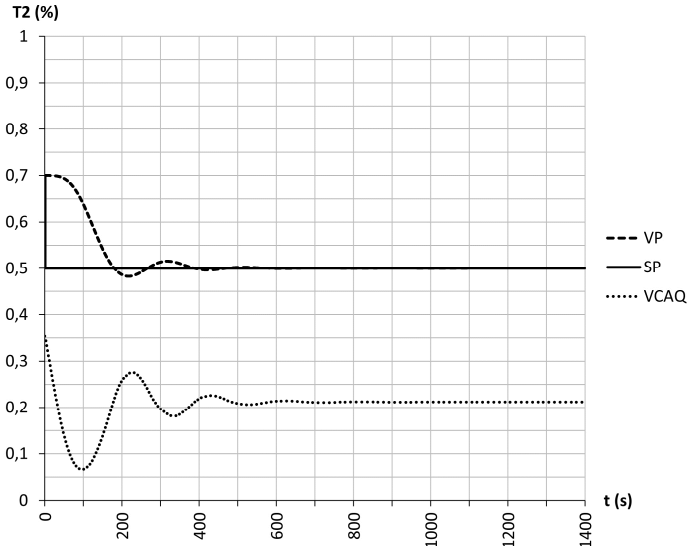


**Figura 6.11**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 9 regras)

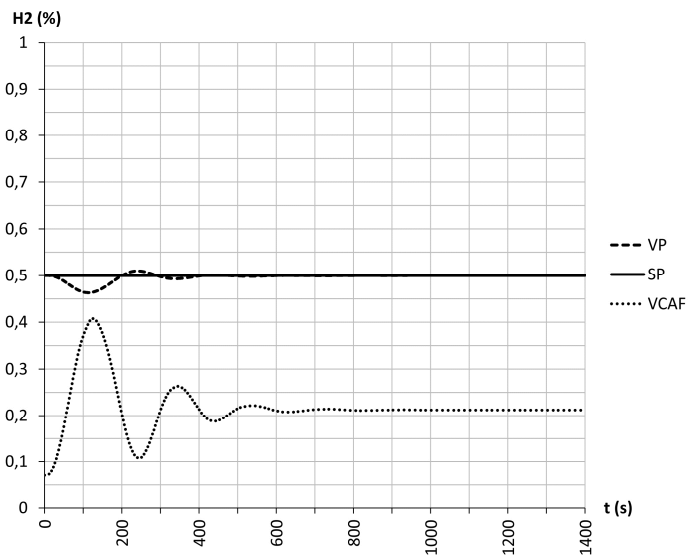
Analisando os resultados destes últimos ensaios em que se alterou o valor desejado da temperatura de 30 para 50°C, podemos concluir o seguinte: a resposta do controlador linguístico Fuzzy quando comparada com o do controlador PID apresenta um menor tempo de estabelecimento e uma

menor sobrelevação; relativamente ao acoplamento de fechos entre malhas de controlo a conclusão é semelhante à dos ensaios anteriores, ou seja, este fenómeno manifesta-se menos quando são utilizados controladores linguísticos Fuzzy, provocando neste caso uma menor perturbação na malha de controlo do nível no tanque 2.

Á semelhança dos ensaios realizados utilizando controladores clássicos do tipo PID, foi também realizado outro ensaio utilizando os controladores linguísticos Fuzzy, em que agora se alterou o valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 70 para 50 °C. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13.



**Figura 6.12**– Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 9 regras)



**Figura 6.13**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 9 regras)

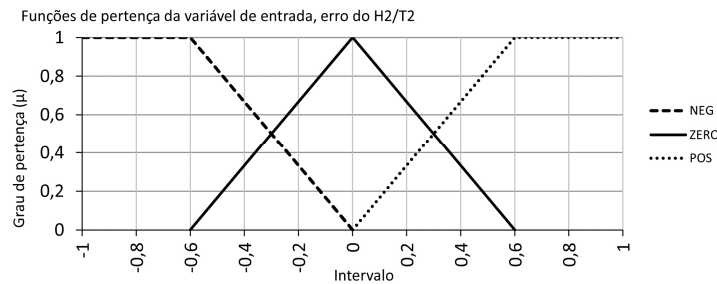
Os resultados obtidos neste ensaio são muito semelhantes aos obtidos no ensaio anterior permitindo retirar exatamente as mesmas conclusões. Para esse efeito podem ser comparadas as Figuras 6.10 e 6.12, bem como, as Figuras 6.11 e 6.13.

De um modo geral, avaliando o desempenho do controlo linguístico Fuzzy, com a estratégia de controlo implementada com base em nove regras heurísticas, relativamente ao controlador clássico PID, conclui-se que se obtiveram melhores resultados no desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy, com a diminuição significativa do acoplamento de efeitos, extinção da sobrelevação e diminuição do tempo de estabelecimento na quase totalidade dos ensaios realizados. Será expectável que utilizando mais regras heurísticas os resultados sejam tendencialmente melhores, no entanto quanto maior for o número de regras heurísticas maiores serão as exigências na capacidade de processamento de informação.

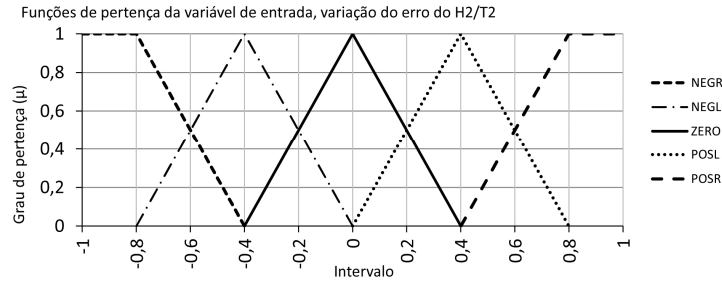
No sentido de avaliar a influência do número de conjuntos Fuzzy no desempenho dos controladores aumentou-se o número de conjunto Fuzzy caracterizadores do comportamento da *variação do erro*, de 3 para 5 conjuntos, tendo sido utilizada a metodologia usada no projeto do controlador anterior para gerar as correspondentes regras heurísticas, ou seja, passamos a ter uma estratégia de controlo implementada com base em 15 regras heurísticas que irão constituir a base de conhecimento do controlador.

A nomenclatura utilizada para designar os conjuntos Fuzzy representados nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16, bem como, na Tabela 6.2, foi a seguinte: NEG – negativo; ZERO – zero; POS – positivo; NEGR – negativo rápido; NEGL – negativo lento; POSL – positivo lento; POSR - positivo rápido; NEGG – negativo grande; NEGM – negativo médio; NEGP – negativo pequeno; POSP – positivo pequeno; POSM – positivo médio; POSG – positivo grande.

Variáveis de entrada:

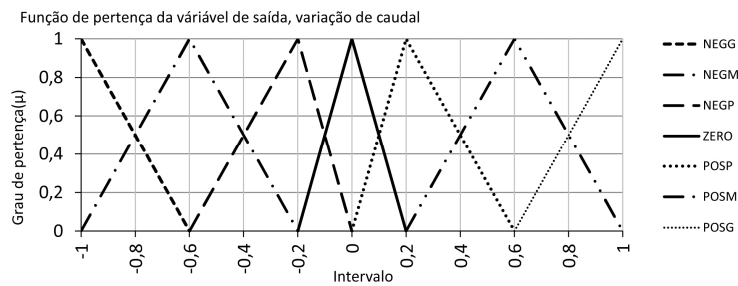


**Figura 6.14**– Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do *erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 15 regras



**Figura 6.15**– Conjuntos Fuzzy e respectivas funções de pertinência para caracterização da *variação do erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 15 regras

Variável de saída:

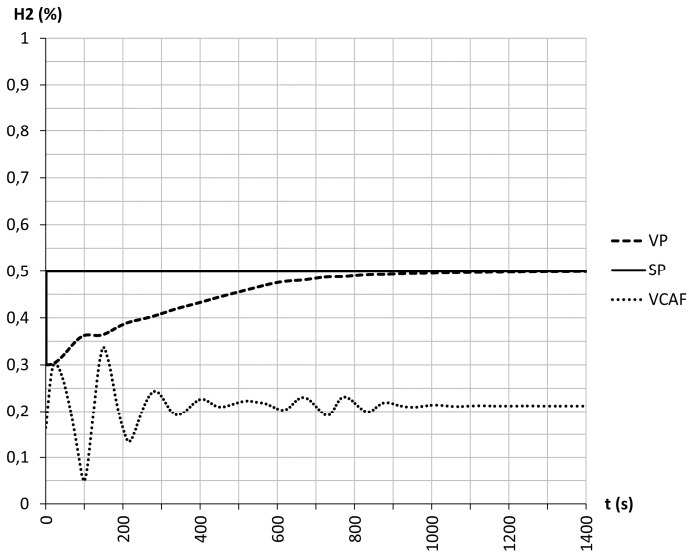


**Figura 6.16**– Conjuntos Fuzzy e respectivas funções de pertinência para caracterização do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 15 regras

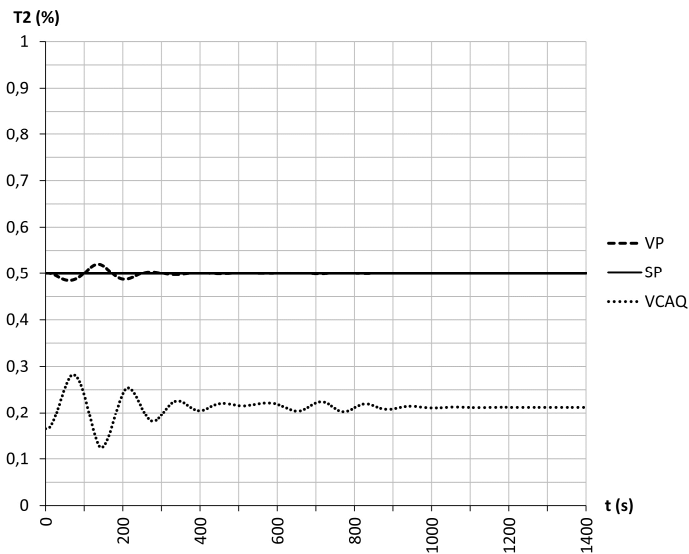
**Tabela 6.2** — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 15 regras

E/VE	NEGR	NEGL	ZERO	POSL	POSR
NEG	NEGG	NEGM	NEGM	NEGP	ZERO
ZERO	NEGM	NEGP	ZERO	POSP	POSM
POS	ZERO	POSP	POSM	POSM	POSG

Com este segundo controlador linguístico Fuzzy projetado e visando avaliar o seu desempenho comparativamente ao do controlador linguístico Fuzzy anteriormente analisado e comparativamente ao desempenho do controlador PID, realizaram-se ensaios provocando as mesmas variações nos valores desejados das variáveis controladas, por forma a gerar respostas comparáveis. Desta forma, nas Figuras 6.17 e 6.18 apresentam-se as respostas das malhas de controlo, utilizando este último controlador linguístico Fuzzy projetado, para uma variação do valor desejado para o nível do tanque 2 de 30 para 50 cm.



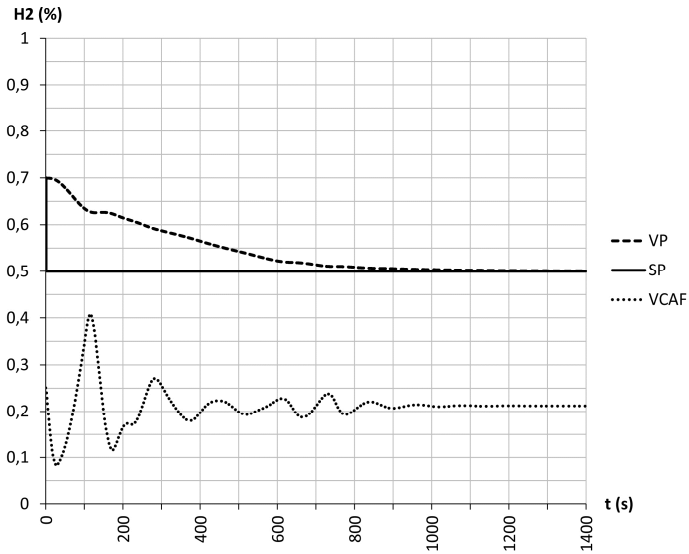
**Figura 6.17**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 15 regras)



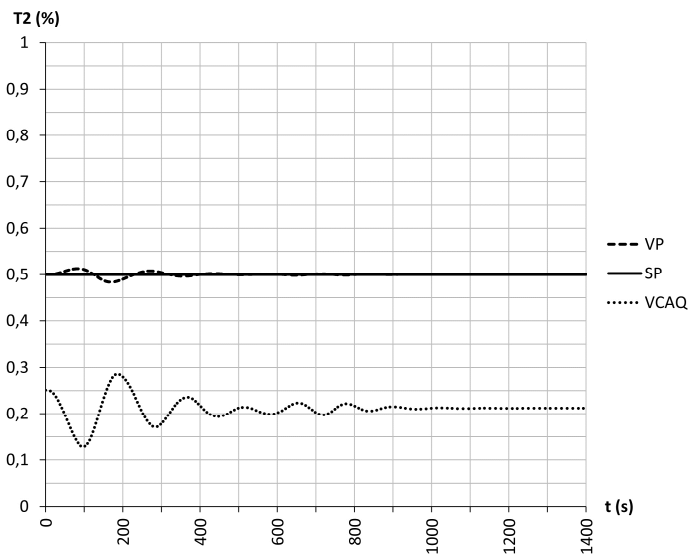
**Figura 6.18**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 15 regras)

Comparando os resultados apresentados na Figura 6.17 com os equivalentes apresentados na Figura 6.6, bem como, os resultados apresentados na Figura 6.18 com os equivalentes apresentados na Figura 6.7, conclui-se que o desempenho dos controladores foi muito semelhante, não havendo diferenças de comportamento dignas de realce.

Os resultados que a seguir se apresentam, nas Figuras 6.19 e 6.20, correspondem ao ensaio em que é provocada uma variação em degrau no valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 para 50 cm.



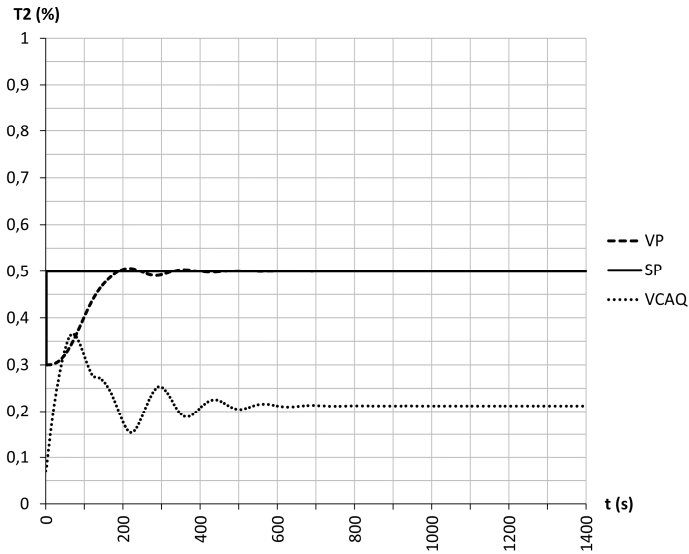
**Figura 6.19**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm



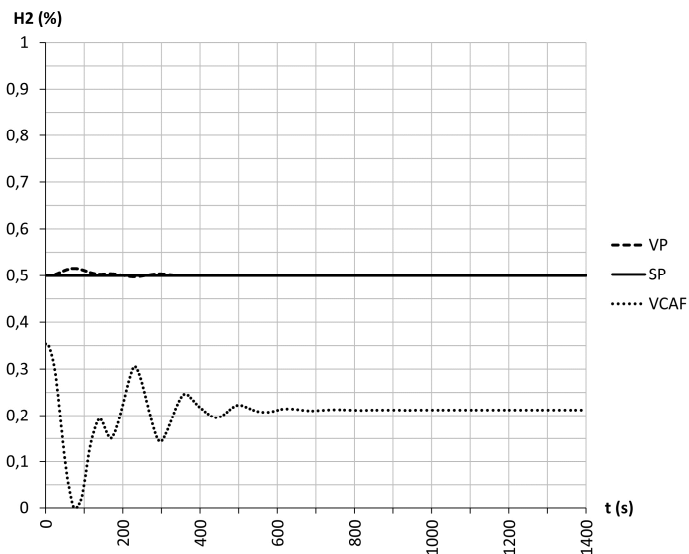
**Figura 6.20**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm

Mais uma vez não foram observadas alterações dignas de realce no desempenho deste controlador relativamente ao desempenho do controlador linguístico Fuzzy com uma estratégia de controlo implementada com apenas 9 regras heurísticas. Para o efeito, podem ser comparados os resultados apresentados na Figura 6.8 com os da Figura 6.19, bem como, os resultados apresentados na Figura 6.9 com os da Figura 6.20.

A seguir, nas Figuras 6.21 e 6.22, são apresentados os resultados correspondentes ao ensaio em que se provoca uma variação no valor desejado da temperatura no tanque 2 de 30 para 50 °C.



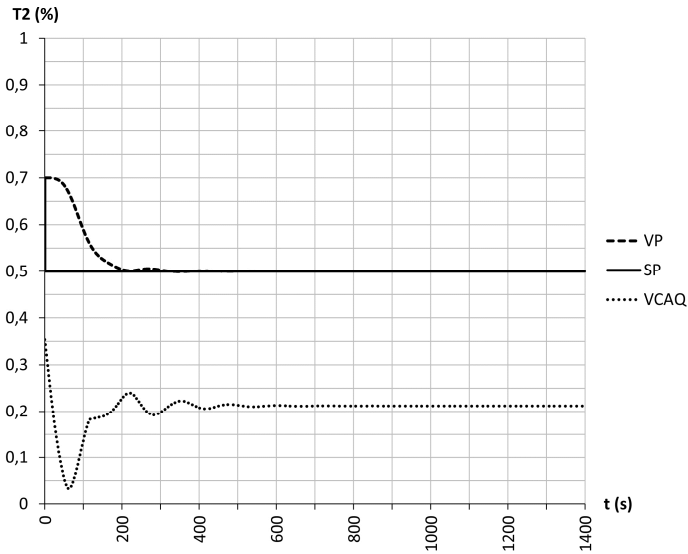
**Figura 6.21**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 15 regras)



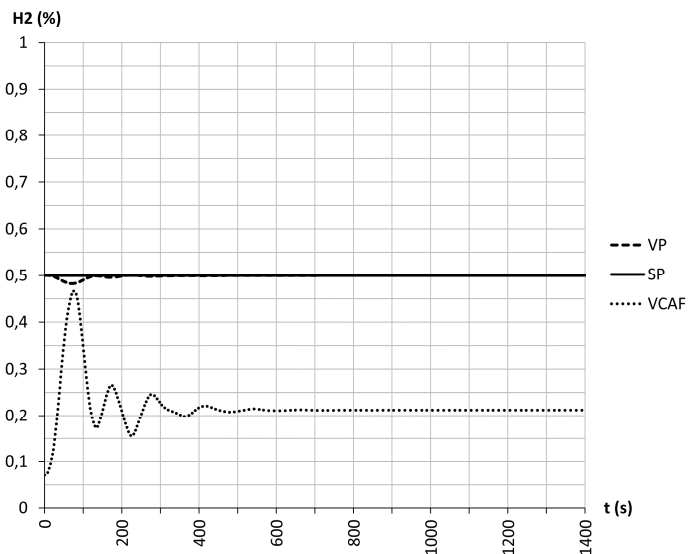
**Figura 6.22**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 15 regras)

Comparando os resultados deste último ensaio com os correspondentes obtidos utilizando o controlador linguístico Fuzzy com a estratégia de controle implementada com base em 9 regras heurísticas, a única diferença assinalável corresponde a uma ligeira diminuição no efeito da interação entre malhas de controle. Esta conclusão pode ser obtida comparando as Figuras 6.10 e 6.21, bem com, as Figuras 6.11 e 6.22.

Nas Figuras 6.23 e 6.24 são apresentadas as respostas dos controladores linguísticos Fuzzy em análise, a uma variação em degrau do valor de desejado para a temperatura no tanque 2 de 70 para 50 °C.



**Figura 6.23**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 15 regras)



**Figura 6.24**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 15 regras)

Os resultados correspondentes a este último ensaio revelam um melhor desempenho deste controlador relativamente ao controlador linguístico Fuzzy com a estratégia de controlo implementada com base em 9 regras heurísticas, sendo de assinalar a completa eliminação da sobrelevação e uma notável diminuição dos efeitos resultantes da interação entre malhas de controlo. Estas conclusões podem ser retiradas comparando as Figuras 6.12 e 6.23, bem como, as Figuras 6.13 e 6.24.

É possível concluir que o incremento no número de conjuntos Fuzzy utilizados para caracterizar o comportamento da variável de entrada do controlador linguístico Fuzzy, *variação do erro*, implicou um aumento da complexidade da base de conhecimento construída para implementar a estratégia de controlo,

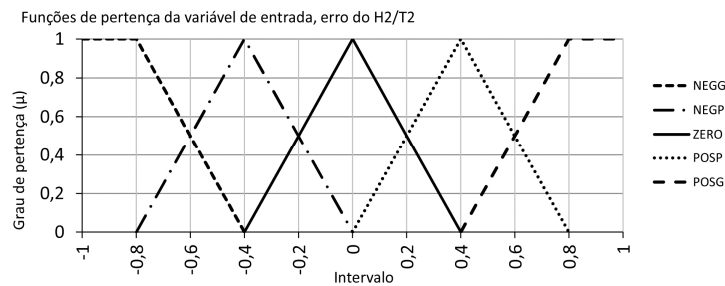
sem que isso se tenha traduzido em ganhos significativos no desempenho do controlador quando comparado com o desempenho do controlador com uma estratégia de controle implementada com base em 9 regras heurísticas.

Seguindo a metodologia de tentativa-erro foram ainda realizados um conjunto de ajustes nos parâmetros que influenciam o desempenho do controlador com o objetivo de minimizar o tempo de estabelecimento, nomeadamente no que se refere à resposta do controlador inserido na malha de controle de nível. Todavia, de todos os ensaios realizados não foi possível obter melhores resultados dos que acima apresentados. Das várias tentativas realizadas inclui-se alteração das funções de pertinência caracterizadoras dos conjuntos Fuzzy utilizados, e alteração dos parâmetros de normalização utilizados no bloco de Pré-processamento, não tendo sido possível alcançar o objetivo desejado.

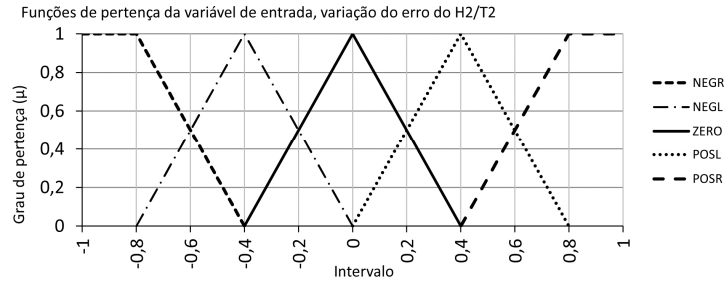
Visando ainda continuar a avaliar a influência do número de conjuntos Fuzzy usados na caracterização das variáveis de entrada no controlador, no desempenho do controlador, foi ainda projetado um terceiro controlador mantendo todas as premissas subjacentes ao projeto do controlador anterior, com exceção do número de conjunto Fuzzy utilizados para caracterizar o comportamento do *erro*, sendo agora utilizados cinco conjuntos Fuzzy para esse efeito. Seguindo a metodologia adotada no projeto dos controladores anteriores para gerar as regras heurística que permitem implementar a estratégia de controle, teremos agora uma base de conhecimento constituída por 25 regras heurísticas.

A nomenclatura utilizada para designar os conjuntos Fuzzy representados nas Figuras 6.25, 6.26 e 6.27, bem como, na Tabela 6.3, foi a seguinte: NEG – negativo; ZERO – zero; POS – positivo; NEGR – negativo rápido; NEGL – negativo lento; POSL – positivo lento; POSR - positivo rápido; NEGG – negativo grande; NEGM – negativo médio; NEGP – negativo pequeno; POSP – positivo pequeno; POSM – positivo médio; POSG – positivo grande.

Variáveis de entrada:

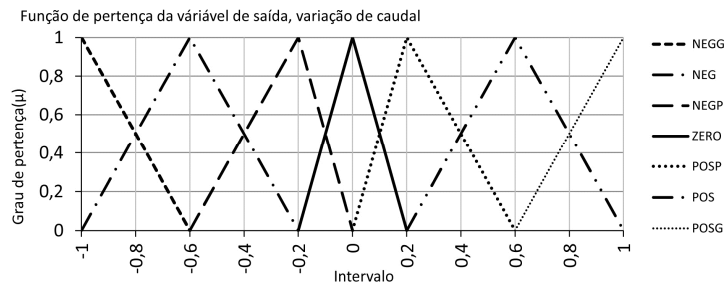


**Figura 6.25**– Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caraterização do *erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 25 regras



**Figura 6.26**– Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização da *variação do erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, para as 25 regras

Variável de saída:



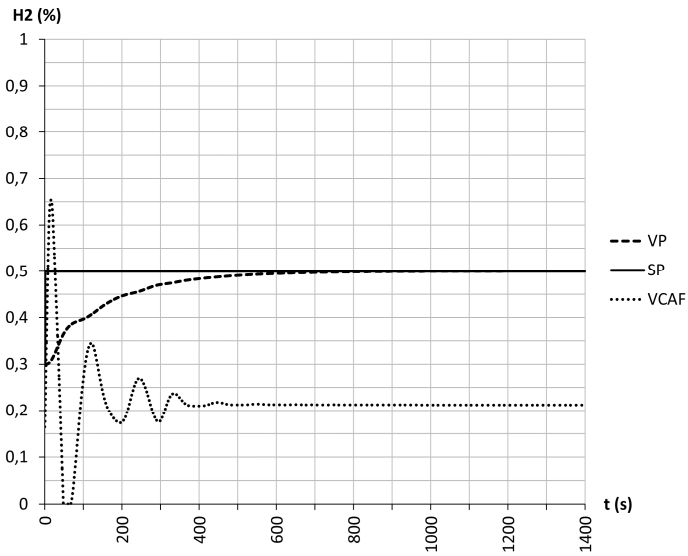
**Figura 6.27**– Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 25 regras

**Tabela 6.3** — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 25 regras

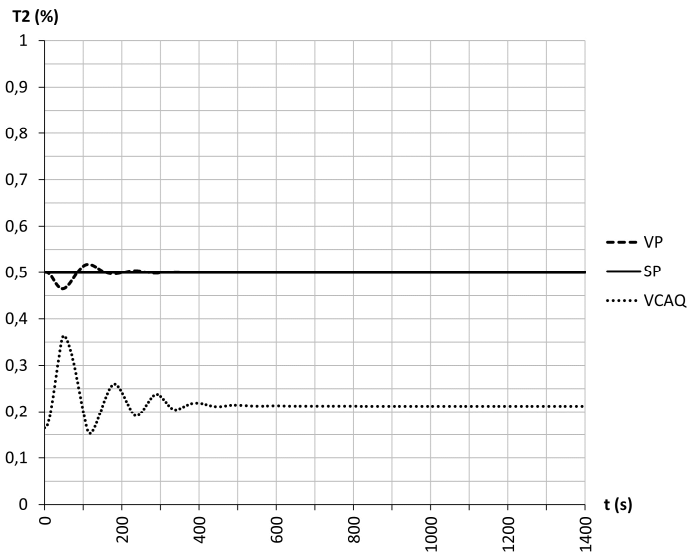
E/VE	NEGR	NEGL	ZERO	POSL	POSR
NEGG	NEGG	NEGM	NEGM	NEGP	ZERO
NEGP	NEGM	NEGM	NEGP	ZERO	POSP
ZERO	NEGM	NEGP	ZERO	POSP	POSM
POSP	NEGP	ZERO	POSP	POSM	POSM
POSG	ZERO	POSP	POSM	POSM	POSG

Visando avaliar o desempenho deste último controlador projetado foram realizados um conjunto de testes semelhantes aos anteriormente descritos, visando obter resultados comparáveis com os já apresentados. Assim, nas Figuras 6.28 e 6.29 são apresentadas as respostas das malhas de controlo correspondentes a uma variação no valor desejado do nível no tanque 2 de 30 para 50 cm.

Avaliando o ensaio correspondente à alteração do valor desejado para o nível no tanque 2 de 30 para 50cm, utilizando o controlador linguístico Fuzzy com a estratégia de controlo implementada com base em 25 regras heurísticas, em comparação com os resultados obtidos utilizando o controlador linguístico projetado com uma estratégia de controlo implementada com base em 9 regras heurísticas, é de salientar uma ligeira diminuição do tempo de estabelecimento e de uma resposta mais suave, no entanto, verifica-se uma grande variação na abertura e fecho da válvula de regulação (ver Figuras 6.6 e 6.28). Ao contrário dos ensaios que se seguem este foi aquele em que se obtiveram piores resultados no



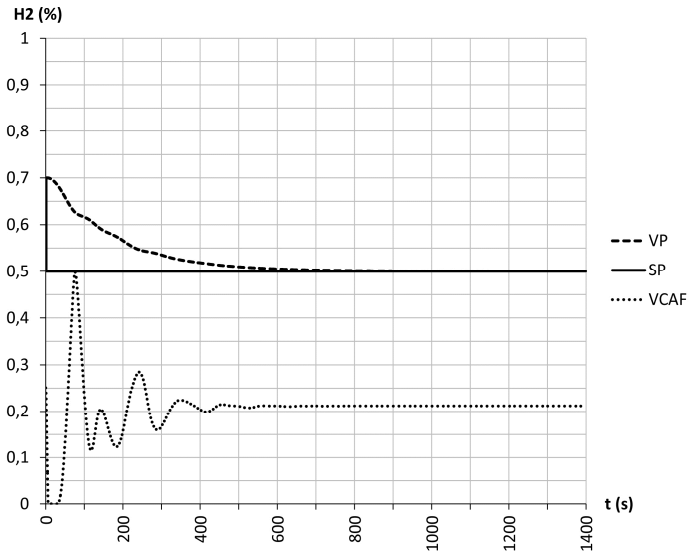
**Figura 6.28**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 25 regras)



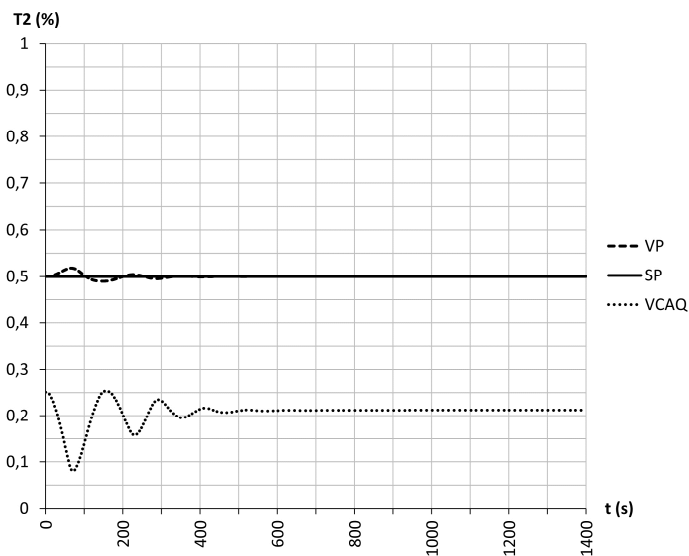
**Figura 6.29**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 25 regras)

acoplamento de efeitos entre malhas de controle, embora com a mesma magnitude do controlador implementado com base em 9 regras heurísticas (ver Figuras 6.7 e 6.29).

Nas Figuras 6.30 e 6.31 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 25 regras heurísticas acima apresentadas, para uma variação em degrau no valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 para 50 cm.



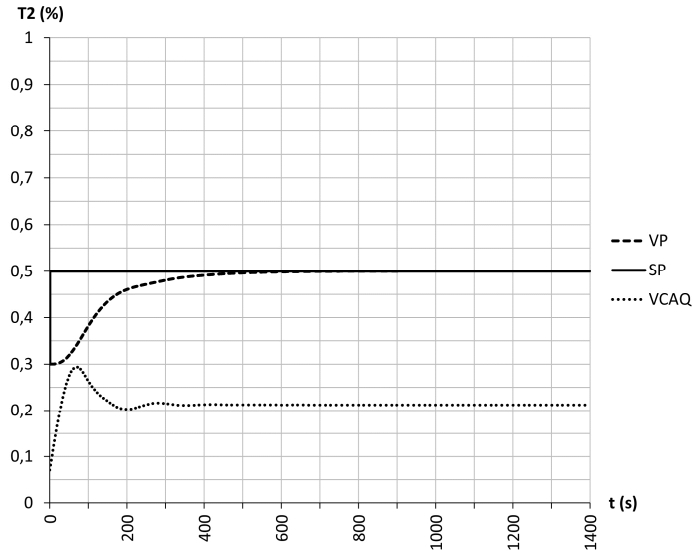
**Figura 6.30**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 25 regras)



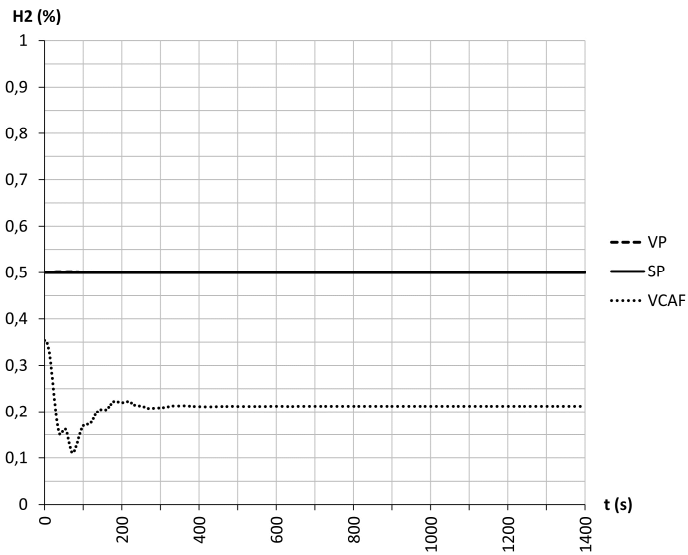
**Figura 6.31**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 25 regras)

Avaliando o ensaio correspondente à alteração do valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 para 50cm, utilizando o controlador linguístico Fuzzy com a estratégia de controle implementada com base em 25 regras heurísticas, em comparação com os resultados obtidos utilizando o controlador linguístico projetado com uma estratégia de controle implementada com base em 9 regras heurísticas, é de salientar uma diminuição do tempo de estabelecimento e uma forma mais suave da resposta (ver Figuras 6.8 e 6.30). Agora, ao contrário do ensaio anterior, obteve-se uma ligeira diminuição do acoplamento de efeitos entre malhas de controle (ver Figuras 6.9 e 6.31).

Nas Figuras 6.32 e 6.33 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 25 regras heurísticas acima apresentadas, para uma variação em degrau no valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 30 para 50 °C.



**Figura 6.32**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 25 regras)

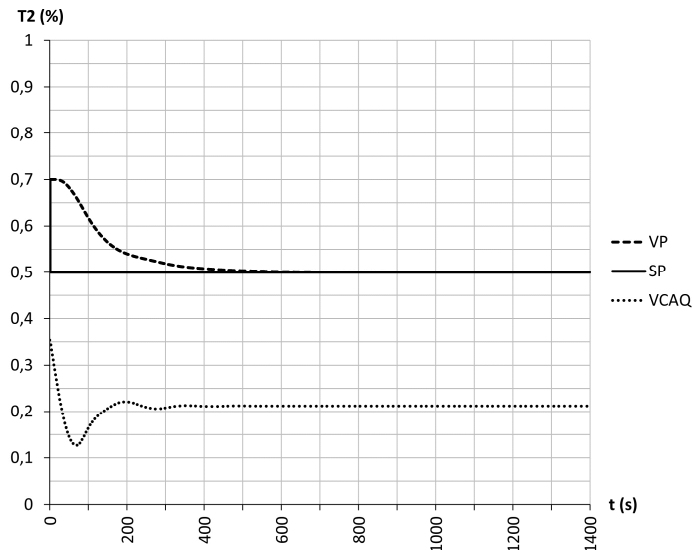


**Figura 6.33**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 25 regras)

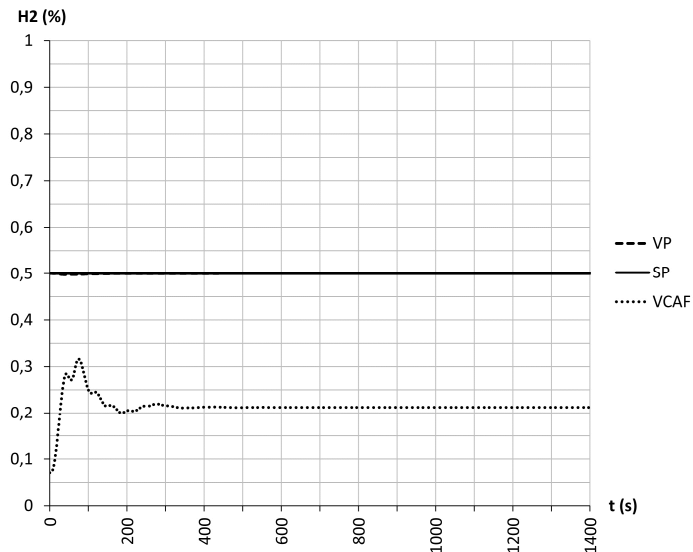
Avaliando o ensaio correspondente à alteração do valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 para 50cm, utilizando o controlador linguístico Fuzzy com a estratégia de controlo implementada com base em 25 regras heurísticas, em comparação com os resultados obtidos utilizando o controlador linguístico projetado com uma estratégia de controlo implementada com base em 9 regras heurísticas, é

de salientar a completa eliminação da sobrelevação e de uma resposta bastante suave (ver Figuras 6.10 e 6.32). Realça-se ainda que neste ensaio o acoplamento de efeitos entre malhas de controlo foi completamente eliminado (ver Figuras 6.11 e 6.33).

Nas Figuras 6.34 e 6.35 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 25 regras heurísticas acima apresentadas, para uma variação em degrau no valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 70 para 50 °C.



**Figura 6.34**– Resposta da malha de controlo da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 25 regras)



**Figura 6.35**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 25 regras)

Analisando os resultados deste último ensaio não se verificam alterações significativas ao desempenho dos controladores relativamente ao ensaio anterior, sendo de registar um desempenho melhorado relativamente ao controlador implementado com base em 9 regras heurísticas. Para este efeito compare-se os resultados apresentados nas Figuras 6.12 e 6.34, bem como, nas Figuras 6.13 e 6.35.

Com o controlador linguístico Fuzzy cuja estratégia de controlo foi implementada com base em 25 regras heurísticas observou-se que foram obtidas melhorias significativas no seu desempenho, comparativamente com o desempenho obtido para os controladores linguísticos Fuzzy cuja estratégia de controlo foi implementada respetivamente com 9 e 15 regras heurísticas. As respostas dos controladores linguísticos Fuzzy implementados com 25 regras heurísticas caracterizam-se por menores tempos de estabelecimento, uma forma mais suave das respostas, eliminação da sobrelevação nas respostas e uma diminuição dos efeitos intrínsecos à interação entre malhas de controlo. Esta solução embora mais “pesada” relativamente ao processamento, por comparação às soluções anteriores, até poderia ser uma opção viável para resolver o problema em apreço. No entanto, como poderemos ver no seguinte capítulo com apenas mais duas regras é possível obter resultados bastante melhores.

### **6.3 - Relações Causais das Variáveis de Processo para Gerar Regras Heurísticas**

Com base nas técnicas de modelação qualitativa inspiradas em metodologias que procuram o estabelecimento de relações causais entre as variáveis do processo ou sistema a modelar, tem sido desenvolvidos controladores linguísticos em que às variáveis envolvidas são atribuídos valores qualitativos [75]. O autor mencionado, desenvolveu um controlador do tipo referido, que serviu de base ao trabalho descrito neste subcapítulo, mas em que o comportamento das variáveis envolvidas nas regras heurísticas era caracterizado através de valores qualitativos, passou a ser caracterizado através de conjuntos Fuzzy.

Desta forma, ao contrário do que aconteceu no subcapítulo anterior, as regras heurísticas que irão implementar a estratégia de controlo do controlador linguístico Fuzzy a projetar, dependem do processo ou equipamento a controlar. Considerando o processo de mistura anteriormente descrito e que tem servido de caso de estudo para testar os diferentes tipos de controladores que tem vindo a ser inseridos nas malhas de controlo, as relações causais que permitem inferir as regras heurísticas que vão implementar a estratégia de controlo do controlador linguístico são do tipo dos exemplos apresentados a seguir: o nível e a temperatura do tanque 1 afeta diretamente a evolução do nível e temperatura do tanque 2; e o nível e temperatura do tanque 1 é diretamente afetado pelos caudais de água fria e quente. Estas relações causais são utilizadas para inferir ações de controlo, traduzidas por um conjunto de regras heurísticas, que como poderemos constatar permitem que os controladores exibam desempenho notável.

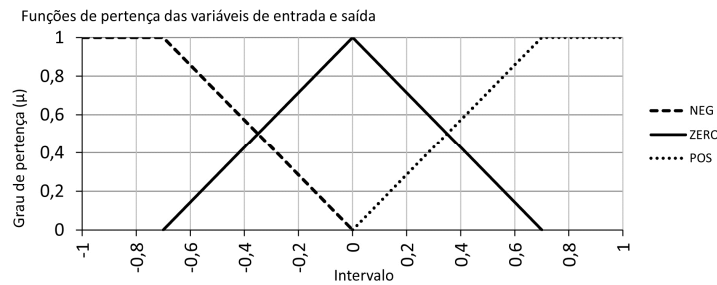
Partindo das condições de um estado de equilíbrio, um aumento do caudal de entrada irá provocar um aumento do nível do tanque 1, da mesma forma uma diminuição do caudal de entrada irá provocar uma diminuição do nível do tanque 1. Um aumento do caudal de entrada de água quente ou um decréscimo do caudal de entrada de água fria irá provocar um aumento de temperatura da água no tanque

1, e um decréscimo do caudal de água quente ou um aumento do caudal de água fria irá provocar uma diminuição da temperatura no tanque 1. Um aumento do nível ou da temperatura da água no tanque 1 irá provocar um aumento do nível e temperatura no tanque 2, e uma diminuição do nível ou temperatura da água no tanque 1 irá provocar uma diminuição do nível e temperatura no tanque 2. Estas relações causais dão origem a uma estratégia de controlo para os controladores linguísticos Fuzzy expressa por 27 regras heurísticas, a seguir descritas.

No Subcapítulo 6.2 as variáveis de entrada do controlador linguístico Fuzzy foram o *erro* e a *variação do erro*, do nível e temperatura do tanque 2, no entanto, neste subcapítulo será considerada mais uma variável de entrada que é a *variação do nível e da temperatura* do tanque 1, pelo que utilizando 3 conjuntos Fuzzy para caracterizar os comportamentos de cada variável de entrada vamos obter 27 regras heurísticas. De salientar, que foram adotados os mesmos conjuntos Fuzzy com as mesmas funções de pertinência para caracterizar todas as variáveis de entrada, bem como as duas variáveis de saída, uma por cada malha de controlo.

A nomenclatura utilizada para designar os conjuntos Fuzzy e as variáveis representadas na Figura 6.36, bem como, na Tabela 6.4, foi a seguinte: NEG – negativo; ZERO – zero; POS – positivo; E2 – erro no tanque 2; VE2 – variação do erro no tanque 2; V1 – variação no tanque 1

Variáveis de entrada/saída:



**Figura 6.36**– Conjuntos Fuzzy e respetivas funções de pertinência para caracterização do *erro*, da *variação do erro* do nível ou da temperatura do tanque 2, da *variação* do nível ou temperatura do tanque 1, do caudal da válvula de AF ou da válvula de AQ, para as 27 regras

**Tabela 6.4** — Regras heurísticas para uma base de conhecimento com 27 regras

		VE2		
		NEG	ZERO	POS
E2=NEG	V1	NEG	POS	ZERO
	ZERO	ZERO	NEG	ZERO
	POS	NEG	NEG	NEG

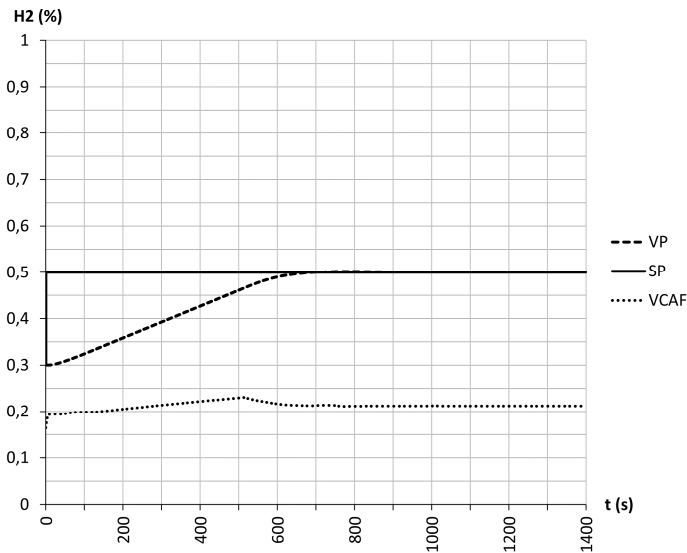
  

		VE2		
		NEG	ZERO	POS
E2=ZERO	V1	NEG	POS	POS
	ZERO	POS	ZERO	NEG
	POS	ZERO	NEG	NEG

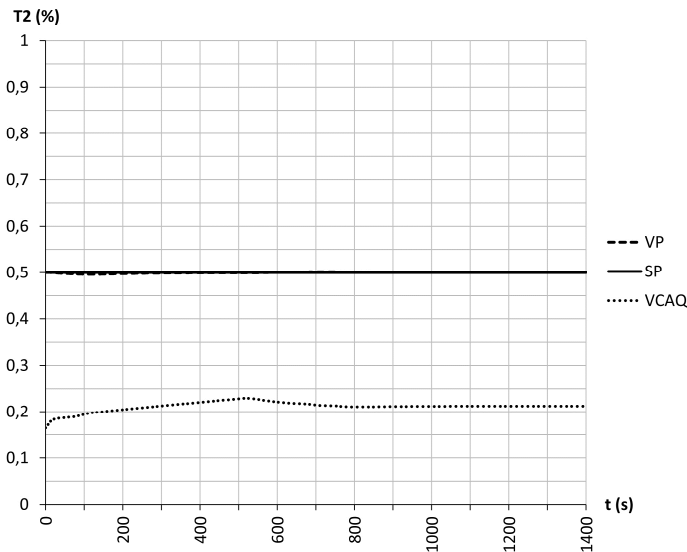
  

		VE2		
		NEG	ZERO	POS
E2=POS	V1	NEG	POS	POS
	ZERO	POS	POS	ZERO
	POS	ZERO	ZERO	NEG

Visando avaliar o desempenho do controlador linguístico Fuzzy acima projetado, o controlador foi inserido nas malhas de controle do processo de mistura e foram realizados um conjunto de ensaios com características idênticas aos realizados com os outros controladores apresentados anteriormente, com o objetivo de obter respostas comparáveis. Assim, nas Figuras 6.37 e 6.38 são apresentadas as respostas das malhas de controle correspondentes a uma variação no valor desejado do nível no tanque 2 de 30 para 50 cm.



**Figura 6.37**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras)



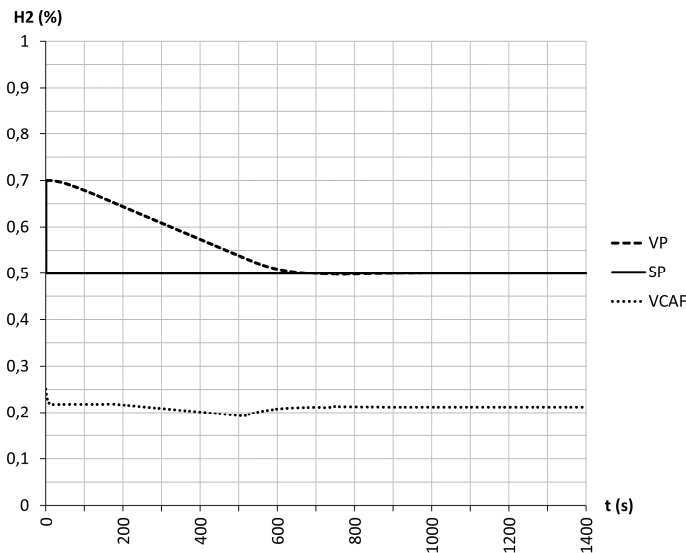
**Figura 6.38**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras)

Avaliando os resultados do ensaio dos controladores em apreço quando é provocada uma variação no valor desejado do nível no tanque 2 de 30 para 50cm, será de realçar a qualidade acrescida do desempenho do controlador relativamente a todos os outros até estudados, que se consubstancia numa evolução suave da sua resposta e sem sobrelevação da mesma, semelhante à resposta do controlador Fuzzy implementado com 25 regras heurísticas, mas ainda com a vantagem da movimentação da válvula de controlo ser bastante mais suave prevenindo a eventual possibilidade de saturação, com todas as vantagens que daí advém em termos de desgaste dos seus componentes quando considerada uma aplicação real (ver Figuras 6.28 e 6.37). O acoplamento de efeitos entre malhas de controlo foi eliminado por completo para este ensaio (ver Figuras 6.29 e 6.38).

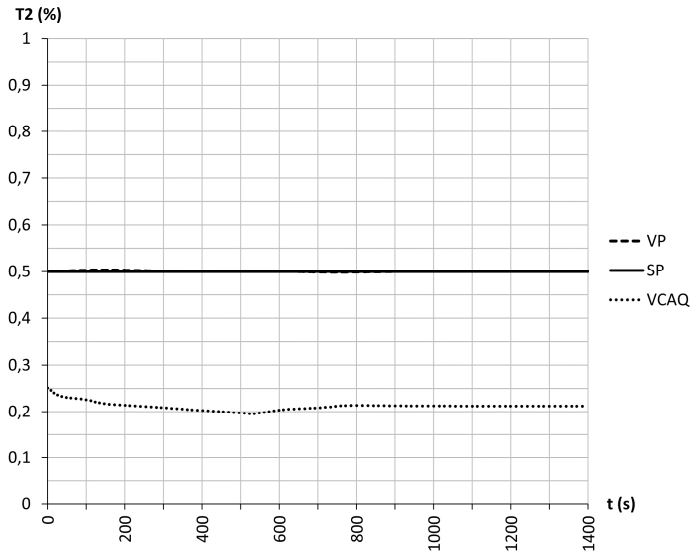
Nas Figuras 6.39 e 6.40 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 27 regras heurísticas acima apresentadas, para uma variação em degrau no valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 para 50 cm.

Os resultados deste ensaio traduzem um desempenho dos controladores em apreço muito semelhante ao desempenho alcançado no ensaio anterior, com todas as vantagens mencionadas quando analisado o seu desempenho relativamente aos controladores linguísticos implementados através de uma estratégia de controlo materializada por 25 regras heurísticas. Estas conclusões podem ser retiradas comparando as Figuras 6.30 e 6.39, bem com, comparando as Figuras 6.31 e 6.40.

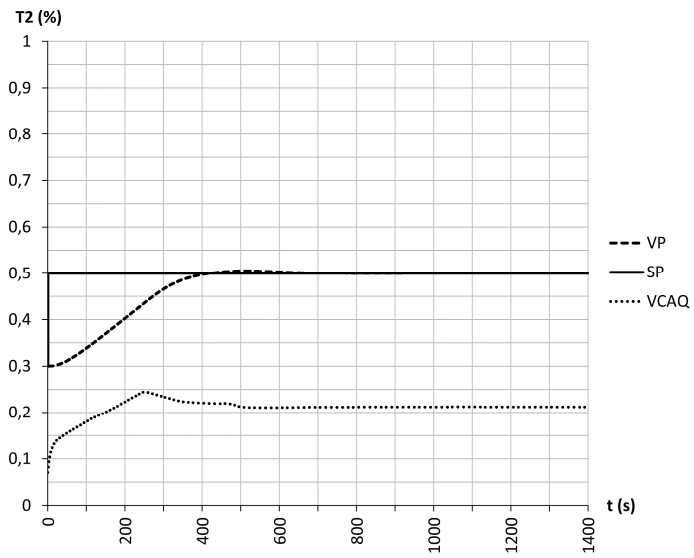
Nas Figuras 6.41 e 6.42 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 27 regras heurísticas acima apresentadas, para uma variação em degrau no valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 30 para 50 °C.



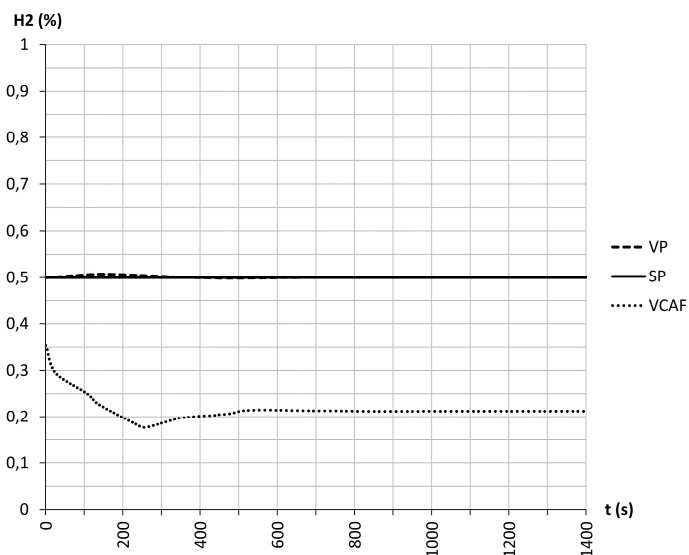
**Figura 6.39**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 27 regras)



**Figura 6.40**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50cm (Fuzzy – 27 regras)

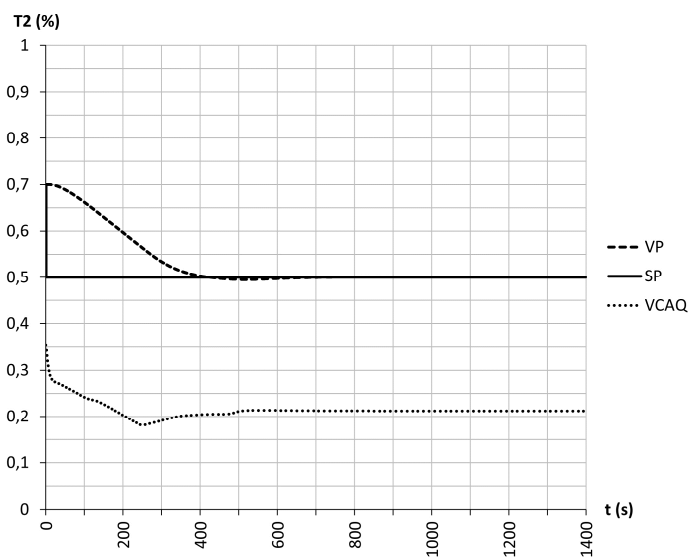


**Figura 6.41**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 27 regras)

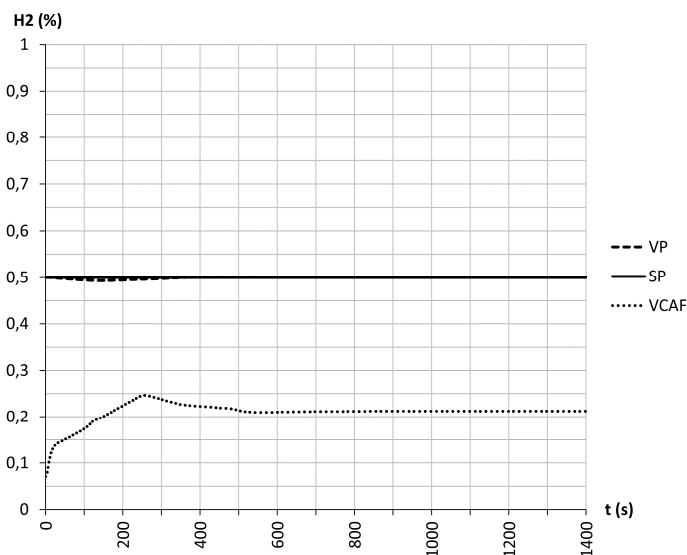


**Figura 6.42**– Resposta da malha de controle nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50°C (Fuzzy – 27 regras)

As conclusões a retirar dos resultados obtidos com este ensaio relativamente ao desempenho dos controladores implementados com base em 27 regras heurísticas são semelhantes às obtidas com os dois ensaios anteriores, sendo de realçar que se continua a verificar um movimento extremamente suave das válvulas de regulação reduzindo probabilidade de saturação e os custos de manutenção que lhe estão associados em aplicações reais (comparar Figuras 6.32 e 6.41, bem como, as Figuras 6.33 e 6.42).



**Figura 6.43**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 27 regras)



**Figura 6.44**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50°C (Fuzzy – 27 regras)

Nas Figuras 6.43 e 6.44 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 27 regras heurísticas acima apresentadas, para uma variação em degrau no valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 70 para 50 °C.

Continua a constatar-se que o desempenho deste controlador, constituído por 27 regras heurísticas geradas a partir de relações causais entre variáveis do processo, é substancialmente melhor que o de todos os outros controladores anteriormente projetados e testados, com as vantagens que já foram enunciadas (comparar as Figuras 6.34 e 6.43, assim com, as Figuras 6.35 e 6.44). De salientar também que este controlador possui um número de graus de liberdade significativamente inferior a todos os outros controladores linguísticos Fuzzy projetados no âmbito dos trabalhos realizados conducentes à escrita desta dissertação, e como tal a tarefa de ajuste dos parâmetros do controlador até ser alcançado o desempenho desejado é substancialmente facilitada.

De acordo com o raciocínio que tem vindo a ser desenvolvido, a válvula de água fria é utilizada para controlar o nível e a válvula de água quente é utilizada para controlar a temperatura. O caudal de água fria ou o caudal de água quente podem afetar o nível e a temperatura, existindo claramente uma interação entre as duas malhas de controlo. Para que se consiga eliminar por completo o acoplamento de efeitos serão estabelecidas duas relações entre os caudais.

Assim, depois da ação de controlo de uma malha tenha sido inferida, a partir das anteriores regras, as estratégias de controlo deverão ser alteradas por forma a completamente eliminar o acoplamento de efeitos. Para se conseguir isto duas situações deverão ser consideradas:

**1ª Hipótese:** Altera-se o valor desejado da temperatura no tanque 2. No entanto, para manter o nível a VCAF altera o caudal para que o caudal total seja constante, ou seja, se VCAQ abre então VCAF fecha a mesma quantidade de caudal. Analiticamente este raciocínio será traduzido pela seguinte equação:

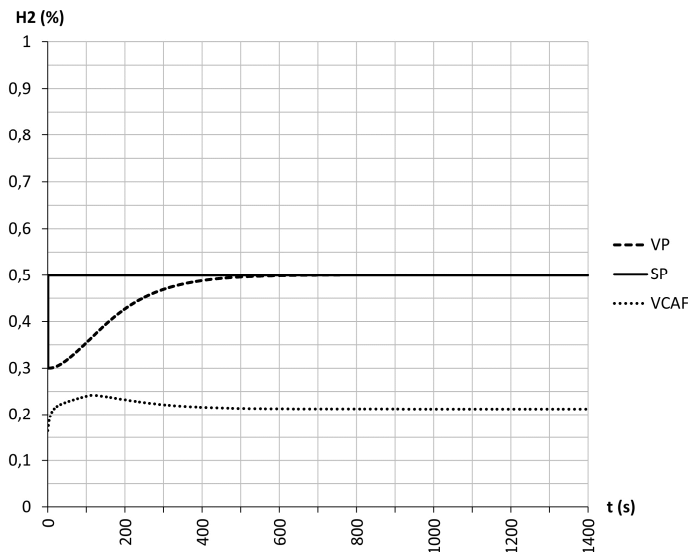
$$\Delta Q_F + \Delta Q_Q = 0 \Leftrightarrow \Delta Q_F = -\Delta Q_Q \quad (6.1)$$

**2ª Hipótese:** Altera-se o valor desejado do nível no tanque 2. No entanto, para manter a temperatura a VCAQ altera o caudal para que a energia total seja constante, ou seja, se VCAF abre então VCAQ abre, para manter a mesma quantidade de energia. Analiticamente este raciocínio será traduzido pela seguinte equação:

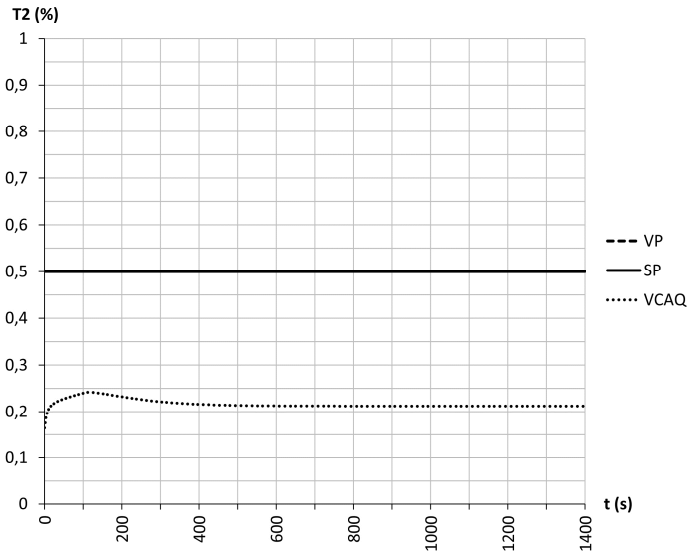
$$\Delta Q_F C(T_F - T_2)\rho + \Delta Q_Q C(T_Q - T_2)\rho = 0 \Leftrightarrow \Delta Q_Q = \frac{(T_2 - T_F)\Delta Q_F}{T_Q - T_2} \quad (6.2)$$

Transformando o conhecimento intrínseco às equações (6.1) e (6.2) em regras heurísticas a adicionar às 27 regras heurísticas anteriormente apresentadas, a base de conhecimento do controlador ficará enriquecida sendo expetável um desempenho melhorado do mesmo. Este tipo de abordagem é conhecida por “*data-driven inference*” [76].

Para avaliar o desempenho do controlador linguístico Fuzzy acima projetado, incluindo as 27 regras heurísticas mais o conhecimento resultante das expressões (6.1) e (6.2), foram realizados um conjunto de ensaios com características idênticas aos realizados com os outros controladores apresentados anteriormente, com o objetivo de obter respostas comparáveis. Assim, nas Figuras 6.45 e 6.46 são apresentadas as respostas das malhas de controlo correspondentes a uma variação no valor desejado do nível no tanque 2 de 30 para 50 cm.



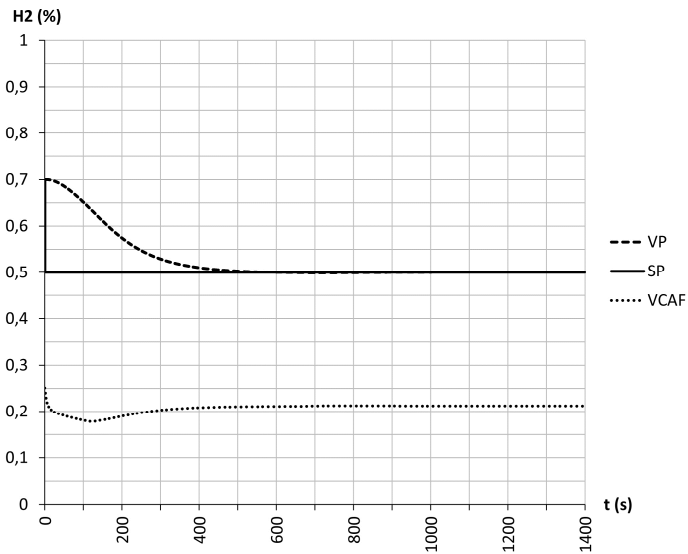
**Figura 6.45**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)



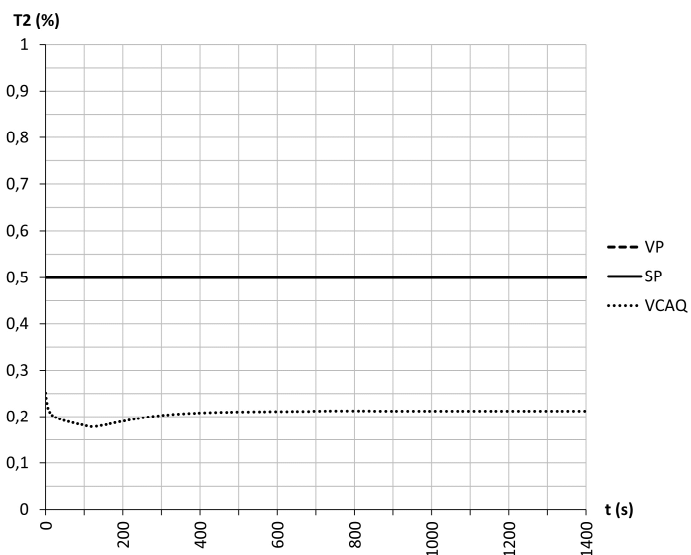
**Figura 6.46**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 30 para 50cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)

Efetivamente, como seria exepetável, este último controlador é o que apresenta um melhor desempenho caracterizada por uma resposta rápida e suave, sem sobrelevação, sem acoplamento de efeitos entre malhas de controlo e com um movimento bastante suave das válvulas de regulação (comparar as Figuras 6.37 e 6.45, bem como, as Figuras 6.38 e 6.46).

Nas Figuras 6.47 e 6.48 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 27 regras heurísticas acima apresentadas mais o conhecimento resultante das equações (6.1) e (6.2), para uma variação em degrau no valor desejado para o nível no tanque 2 de 70 para 50 cm.



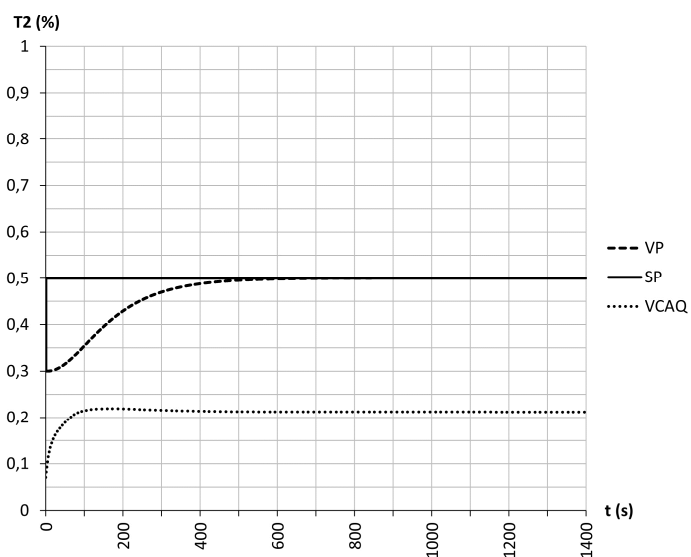
**Figura 6.47**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50 cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)



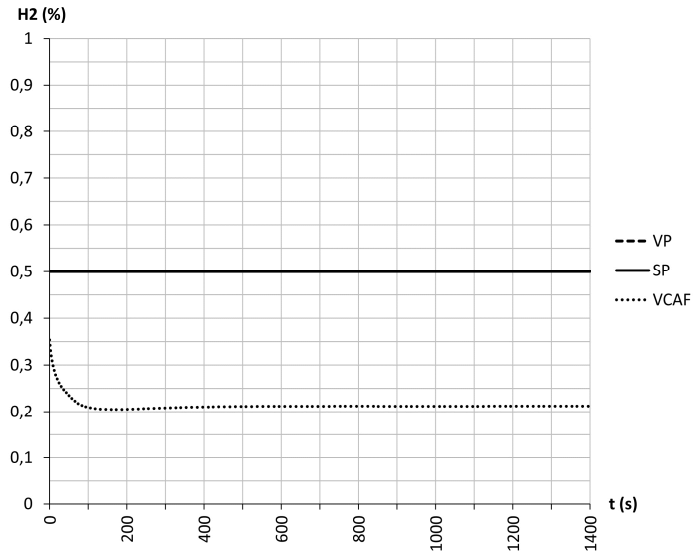
**Figura 6.48**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência do nível de 70 para 50 cm (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)

As conclusões tiradas no ensaio anterior relativamente ao desempenho do controlador continuam válidas neste último ensaio não havendo nada de relevante a acrescentar (comparar Figuras 6.39 e 6.47, bem como, as Figuras 6.40 e 6.48).

Nas Figuras 6.49 e 6.50 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 27 regras heurísticas acima apresentadas mais o conhecimento resultante das equações (6.1) e (6.2), para uma variação em degrau no valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 30 para 50 °C.

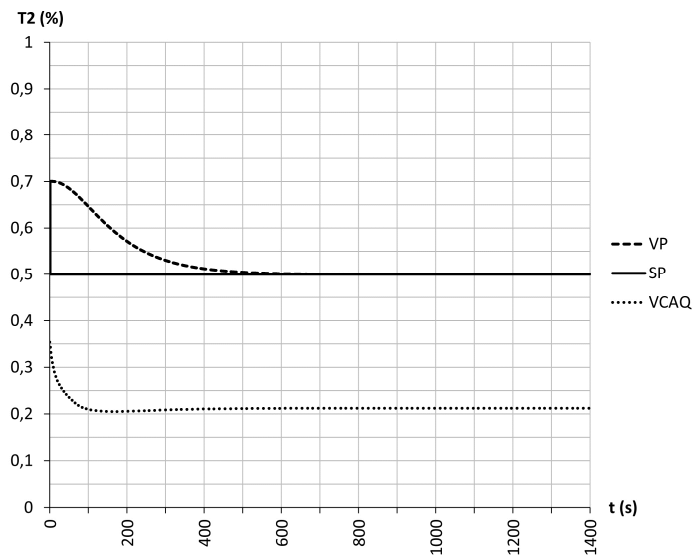


**Figura 6.49**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)

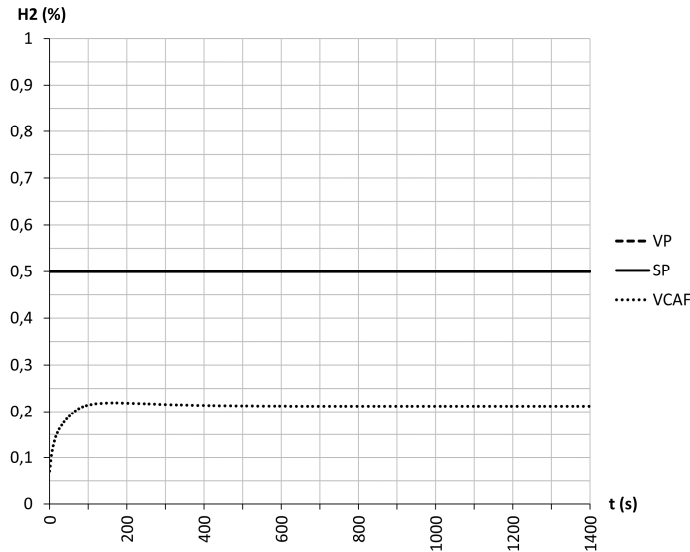


**Figura 6.50**– Resposta da malha de controle do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 30 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)

Nas Figuras 6.51 e 6.52 apresentam-se as respostas dos controladores implementados com base nas 27 regras heurísticas acima apresentadas mais o conhecimento resultante das equações (6.1) e (6.2), para uma variação em degrau no valor desejado para a temperatura no tanque 2 de 70 para 50 °C.



**Figura 6.51**– Resposta da malha de controle da temperatura a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)



**Figura 6.52**– Resposta da malha de controlo do nível a uma variação em degrau no valor de referência da temperatura de 70 para 50 °C (Fuzzy – 27 regras + conhecimento adicional)

Os resultados obtidos com estes dois últimos ensaios, reforçam as conclusões retiradas relativamente ao desempenho deste último controlador linguístico projetado no âmbito dos dois primeiros ensaios realizados, continuando a verificar-se uma resposta rápida e suave, sem sobrelevação, sem acoplamento de efeitos entre malhas de controlo e com um movimento suave das válvulas de regulação, com todas as vantagens que daí advém e já mencionadas. Efetivamente o controlador linguístico Fuzzy com a estratégia de controlo implementada com base nas 27 regras heurísticas apresentadas no início deste Capítulo mais o conhecimento intrínseco às equações (6.1) e (6.2) foi o que revelou o melhor desempenho quer em termos da resposta obtida a variações dos valores desejados para as variáveis controladas, quer em termos de lidar com o acoplamento de efeitos entre malhas de controlo.

## 6.4 - Conclusões

Com os ensaios realizados com o controlador Fuzzy com uma estratégia de controlo implementada através 9 regras heurísticas geradas a partir do conhecimento de especialista relativamente ao funcionamento de um controlador clássico com ações de controlo proporcional e derivativa, por comparação com os mesmos ensaios realizados com o controlador clássico do tipo PID, os resultados foram desde logo bastante animadores. Com a extinção completa ou com valores insignificantes de sobrelevação na resposta, diminuição bastante significativa do acoplamento de efeitos e diminuição do tempo de estabelecimento.

Quanto aos ensaios com o controlador Fuzzy implementado com 15 regras heurísticas não houve melhorias significativas no seu desempenho em comparação com o controlo Fuzzy implementado 9 regras heurísticas, o que permite concluir que o número de conjuntos Fuzzy utilizados para caracterizar o comportamento da *variação do erro* tem reduzida influência no desempenho do controlador.

Ao realizar os ensaios com o controlador Fuzzy implementado com 25 regras heurísticas houve melhorias significativas no seu desempenho quando comparado com o desempenho do controle Fuzzy PD implementado com 9 regras heurísticas. Verificou-se a eliminação completa da sobrelevação da resposta em todas as situações dos ensaios realizados, extinção ou diminuição do acoplamento de efeitos e diminuição do tempo de estabelecimento. É assim possível concluir que o número de conjuntos Fuzzy utilizados para caracterizar o comportamento do *erro* tem uma grande influência no desempenho do controlador.

O controlador Fuzzy implementado com 27 regras heurísticas obtidas a partir das relações causais entre as variáveis de processo conduziu a uma estratégia de controle diferente. Agora em vez de duas variáveis à entrada, *erro* e *variação do erro* das variáveis controladas (nível e temperatura no tanque 2), foram consideradas também a variação do nível/temperatura do tanque 1. Esta abordagem do ponto de vista lógico tem bastante coerência, uma vez que a informação da evolução das variáveis de processo no tanque 1 tem uma influência direta na evolução das variáveis de processo no tanque 2. Assim, com esta informação é uma forma de prever o que vai acontecer no tanque 2 e possibilitar assim as ações de controle mais indicadas. Conseguiu-se assim, uma extinção praticamente absoluta da sobrelevação na resposta do controlador e do acoplamento de efeitos. É importante também referir um outro fator, ao qual, até aqui, não se tinha dado grande relevância, que tem a ver com o fato de se ter obtido um movimento suave de abertura e fecho das válvulas de regulação, que diminui a possibilidade de saturação das válvulas e vem assim também contribuir para a qualidade do desempenho do controlador para uma maior gama de variações dos valores desejados para as variáveis controladas, bem como, tem um impacto significativo nos custos de manutenção das mesmas quando se trata de situações reais.

Com a adição do conhecimento intrínseco às expressões (6.1) e (6.2) às 27 regras heurísticas obtidas a partir das relações causais entre as variáveis de processo obteve-se um desempenho do controlador significativamente melhorado. Apesar desta última abordagem para gerar as regras heurísticas ser dependente do processo, foi a que conduziu a um melhor desempenho do controlador quando comparado com os desempenhos de todos os outros controladores ensaiados.

## Capítulo 7

### Conclusões

O trabalho conducente à escrita desta dissertação visava a conceção/projeto de controladores linguísticos Fuzzy a serem caracterizados por um desempenho melhorado em situações em que as técnicas de controlo clássico não têm exibido um desempenho aceitável. Para esse efeito, foi escolhido um processo como caso de estudo, que apesar de relativamente simples, exibiu acoplamento de efeitos entre malhas de controlo que é uma situação em que as metodologias de controlo clássico têm alguma dificuldade em lidar.

Para efetuar o controlo automático do processo escolhido como caso de estudo foram implementadas duas malhas fechadas de controlo. Inicialmente e com o objetivo de gerar comportamentos de referência para avaliar o desempenho dos controladores linguísticos Fuzzy que viriam a ser projetados, foram utilizados e testados controladores clássicos do tipo PID. Posteriormente foram projetados e testados vários tipos de controladores linguísticos Fuzzy, cujo desempenho foi comparado com o dos controladores clássicos do tipo PID inicialmente utilizados. Para implementar a estratégia de controlo subjacente aos controladores linguísticos Fuzzy projetados no âmbito do trabalho descrito nesta dissertação, foram usadas duas metodologias para gerar as correspondentes regras heurísticas: conhecimento de especialistas; relações causais entre variáveis de processo. A primeira abordagem conduz a uma estratégia de controlo que é independente do processo, enquanto na segunda abordagem a estratégia de controlo implementada é dependente do processo, não permitindo reutilização da base de conhecimento o que poderá ser uma menos valia para esta metodologia. Por último foi ainda projetado um controlador em que a partir de um conjunto de regras heurísticas geradas a partir de relações causais entre variáveis de processo foi adicionado conhecimento de especialistas.

Todos os ensaios realizados com controladores linguísticos Fuzzy revelaram melhor desempenho dos controladores, quando efetuada a comparação como desempenho dos controladores clássicos do tipo PID. A última abordagem mencionada no parágrafo anterior, em que a estratégia de controlo resultou de um conjunto de regras heurísticas geradas a partir de relações causais das variáveis de processo e do conhecimento de especialistas, foi a conduziu a um melhor desempenho do controlador.

Apesar dos excelentes resultados obtidos com os controladores linguísticos Fuzzy projetados e testados, a experiência adquirida com a realização deste trabalho permite enumerar algumas razões que justificam a não utilização de um controlador concebido usando os conceitos da lógica Fuzzy: o controlador PID é bem conhecido, a sua estratégia de controlo está bem definida analiticamente, os seus parâmetros são relativamente fáceis de ajustar havendo metodologias sistemáticas de ajuda a esta tarefa, enquanto para um controlador linguístico Fuzzy é necessário encontrar alguma abordagem para gerar a estratégia de controlo na forma de regras heurísticas, o que nem sempre é fácil, possui um número de graus de liberdade muito superior aos controladores clássicos do tipo PID, o que implica dificuldades acrescidas no ajuste dos parâmetros do controlador, e finalmente à definição dos parâmetros do controlador linguístico Fuzzy está associado um grau de subjetividade elevado. Daqui se pode concluir que se numa determinada situação um controlador clássico do tipo PID revelar um bom desempenho então não se justifica a implementação de um controlador linguístico Fuzzy.

No entanto o controlo Fuzzy é utilizado em produtos de grande consumo e na indústria com grande sucesso, em situações em as metodologias de controlo clássico não revelam um desempenho adequado, havendo algumas possíveis razões:

- Uma vez que a estratégia de controlo consiste em regras heurísticas do tipo Se-Então, torna-se fácil a um operador fabril a sua leitura e compreensão. As regras poderão ser construídas com um vocabulário utilizado no dia-a-dia, facilitando a incorporação do conhecimento empírico do operador na construção da base de conhecimento, permitindo assim a não especialistas desenvolver soluções de controlo de sistemas:
- Para processos muito complexos, quando não existe um modelo analítico simples e rigoroso;
- Para processos com comportamentos altamente não lineares.

Os estudos realizados indicam uma grande robustez dos controladores linguísticos Fuzzy, apesar da sua velocidade de resposta ser mais baixa devido à necessidade de processamento de mais informação, o regime estacionário é geralmente atingido mais rapidamente. Em geral, o sinal de controlo de um controlador Fuzzy é mais suave do que aquele que é obtido através de um controlador clássico PID.

Esta dissertação permite perceber as diversas vantagens da aplicação de controladores linguísticos Fuzzy, nomeadamente quando existem acoplamento de efeitos entre malhas de controlo:

- Permite diminuir ou mesmo anular o acoplamento de efeitos quando existem várias malhas de controlo com influência na variação das variáveis de processo de outras malhas de controlo;
- Diminuir ou eliminar por completo a sobrelevação da resposta do controlador;
- Diminuir o tempo de estabelecimento da resposta do controlador;
- Origina geralmente um comportamento bastante mais suave das variáveis envolvidas, diminuindo a possibilidade de saturação, das válvulas de regulação neste caso, aumentando assim a qualidade do desempenho do controlador e o diminuindo o desgaste dos dispositivos associados à malha de controlo com impacto direto nos custos de manutenção;
- Permite com relativa facilidade implementar controladores com várias entradas e várias saídas.

Os resultados alcançados com a realização do trabalho conducente à escrita desta dissertação permitem concluir que os controladores linguísticos Fuzzy podem ser uma alternativa para alcançar o sucesso desejado em situações de controlo automático de processos ou equipamentos em que as metodologias clássicas de controlo não revelam um desempenho aceitável.

Como trabalho futuro, fica a possibilidade de implementar e testar os controladores linguísticos Fuzzy concebidos/projetados e testados em ambiente de simulação, utilizando por exemplo um microcontrolador do tipo Arduino, construindo uma arquitetura de controlo real descentralizada.

## Referências Bibliográficas/Bibliografia

- [1] Sousa, B.S. (2008), “Um discurso sobre as ciências”, 5ª Edição, Cortez Editora, ISBN 978-85-249-0952-8
- [2] Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy sets", *Inf and Control*, No. 8, pp. 338-353.
- [3] Mamdani, E.H. & Assilian, S. (1975), "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *Int. Journal Man Machine-Studies*, Vol. 7 (1), pp. 1-13.
- [4] Jantzen, J. (2013), “Foundations of fuzzy control – A practical approach”, 2ª Edição, John Wiley and Sons, Ltd., England, ISBN 978-1-118-50622-6.
- [5] Li, Y., Tong, S., Li, T. & Jing X. (2014), “Adaptive fuzzy control of uncertain stochastic nonlinear systems with unknown dead zone using small-gain approach”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 235, No. 16, pp. 1-24, doi: 10.1016/j.fss.2013.02.002.
- [6] Botía, J.F., Isaza, C., Kempowsky, T., Lann, M.V. & Martín, J.A. (2013) “Automaton based on fuzzy clustering methods for monitoring industrial processes”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.26, No. 4, pp. 1211-1220, doi:10.1016/j.engappai.2012.11.003.
- [7] Djavarehshkian, M.H. & Esmaeili, A. (2013), “Neuro-fuzzy based approach for estimation of Hydrofoil performance”, *Ocean Engineering*, Vol. 59, pp. 1-8, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.015
- [8] Chowdhury, M.A., Hosseinzadeh, N. & Shen, W.X. (2012) “Smoothing wind power fluctuations by fuzzy logic pitch angle controller”, *Renewable Energy*, Vol. 38, pp. 224-233, doi:10.1016/j.renene.2011.07.034
- [9] Kakigano, H., Miura, Y. & Ise, T. (2013), "Distribution Voltage Control for DC Microgrids Using Fuzzy Control and Gain-Scheduling Technique", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 5, pp. 2246-2258, doi: 10.1109/TPEL.2012.2217353.
- [10] Grekousis, G. & Fotis, Y.N. (2012), “A fuzzy index for detecting spatiotemporal outliers”, *Springer US*, Vol. 16, pp.597-619, doi: 10.1007/s10707-011-0145-4.
- [11] Eick, C.F. (2013), “Uncertainty Management for Fuzzy Decision Support Systems”, *Fourth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Report n.UAI-P1988-PG98-108, arXiv:1304.2351
- [12] Vinodh, S. & Balaji, S.R. (2011), “Fuzzy logic based leanness assessment and its decision support system”, *International Journal of Production Research*, 49:13, pp. 4027-4041, doi:10.1080/00207543.2010.492408.
- [13] Al-Kasasbeh, R., Korenevskiy, N., Alshamasin, M., Ionescou, F. & Smith, A. (2013), “Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic

decisionmaking”, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 16:3, 302-313, doi: 10.1080/10255842.2011.618926.

- [14] Arnold, B., Borio, C., Ellis, L. & Moshirian, F. (2012), “Systemic risk, macroprudential policy frameworks, monitoring financial systems and the evolution of capital adequacy”, *Journal of Banking & Finance*, Vol. 36, No. 12, pp. 3125–3132.
- [15] García, P., Torreglosa, J.P., Fernández, L.M. & Jurado, F. (2013), “Optimal energy management system for standalone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic”, *International Journal Of Hydrogen Energy*, Vol 38(33), pp. 14146-14158.
- [16] Prato, T. (2011), “Adaptively Managing Wildlife for Climate Change: A Fuzzy Logic Approach”, *Environmental Management*, Vol. 48, No.1, pp. 142-149.
- [17] Méndez, J.A. & González E.J. (2013), “A control system proposal for engineering education”, *Computers & Education*, Vol.68, pp. 266-274.
- [18] Gharibi, H., Mahvi, A.H., Nabizadeh, R., Arabalibeik, H., Yunesian, M. & Sowlat M.H. (2012) “A novel approach in water quality assessment based on fuzzy logic”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 112, pp. 87-95.
- [19] Nhivekar, G.S., Nirmale, S.S. & Mudholker, R.R. (2011) “Implementation of fuzzy logic control algorithm in embedded microcomputers for dedicated application”, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol.3, No.4, pp. 276-283
- [20] Zadeh, L.A. (1974), “Fuzzy logic and its application to approximate reasoning”. In: *Information Processing 74, Proc. IFIP Congr. 1974 (3)*, pp. 591–594.
- [21] Zadeh, L.A. (1975), "Fuzzy logic and approximate reasoning". *Synthese*, 1975; 30: 407–428.
- [22] Zadeh, L.A. (1975), “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning”, I-III, *Information Sciences* 8 (1975) 199–251, 301–357; 9 (1976) 43–80.
- [23] Zimmermann, H.-J. (1996), “Fuzzy Set Theory: and Its Applications”, 3rd edition, Boston: Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-9624-3.
- [24] Calado, J.M.F. (2008), “Controladores Linguísticos Fuzzy”, *Guia de lição de síntese apresentada às provas de Agregação em Engenharia Eletrotécnica da Universidade da Beira Interior*.
- [25] Mamdani, E.H. (1977), "Application of fuzzy logic to approximate reasoning", *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-26, No. 12, pp. 1182-1191.
- [26] Ligeza, A. (2006), “Logical Foundations for Rule-Based Systems”, *Studies in Computational Intelligence*, Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-29117-6.
- [27] MathWorks, Fuzzy Inference Process. Disponível em <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>. Acesso em junho de 2014.

- [28] Lee, C.C. (1990), “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers — parts I and II”, IEEE Trans. Systems Man and Cybernetics, Vol. 20, pp. 404-435.
- [29] Leekwijck, W.V. & Kerre E.E. (1999), “Defuzzification: criteria and classification”, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 108, pp. 159-178.
- [30] Ogata, K. (2010), “Modern Control Engineering”, 5th edition, Prentice Hall, ISBN:978-0-13-615673-4.
- [31] Nof, S.Y. (2009) “Springer Handbook of Automation”, ISBN: 978-3-540-78830-0.
- [32] Wikipedia “Centrifugal governor”. Disponível em <[http://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal\\_governor](http://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor)>. Acesso em julho de 2014.
- [33] Haugen, F. (2004), “PID Control”, tapir academic press, ISBN: 82-519-1945-2.
- [34] Nour, M.I.H., Ooi, J. & Chan, K.Y. (2007) “Fuzzy Logic Control vs. Conventional PID Control of an Inverted Pendulum Robot”, International Conference on Intelligent and Advanced Systems, pp. 209-214, doi: 10.1109/ICIAS.2007.4658376.
- [35] Lee, C.S. & Gonzalez, R.V. (2008) “Fuzzy logic versus a PID controller for position control of a muscle-like actuated arm”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 1475-1482, doi:10.1007/s12206-008-0424-7.
- [36] Schwartz, D.G., Klir, G.J., Lewis III, H.W. & Ezawa, Y. (1994) “Applications of Fuzzy Sets and Approximate Reasoning”, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, n.4, pp. 482-498.
- [37] Yasunobu, S., Miyamoto, S. & Ihara, H. (1983-85) Três Publicações relativas ao tema: “Automatic Train Operation System”, Disponíveis em <<http://www.ics.esys.tsukuba.ac.jp/yasunobu/papers.htm>>, Acesso a 20 de agosto de 2014.
- [38] Wikipedia “Fuzzy control system”. Disponível em <[http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy\\_control\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system)>, Acesso a 20 de agosto de 2014.
- [39] Rodjito, P. (2006) “Position tracking and motion prediction using Fuzzy Logic”, Colby College, Honors Theses, Student Research.
- [40] Moro, M., Matsuyo, T. & Yamaguchi, S. (1993) “Vacuum cleaner with fuzzy logic”. Disponível em <<http://www.freepatentsonline.com/5251358.html>>, Acesso a 15 setembro de 2014.
- [41] Canon “Camcorder”, focagem automática com controlo Fuzzy. Disponível em <[http://www.canon.com/camera-museum/camera/8mmvc/data/1985-1990/1990\\_h800.html?p=1](http://www.canon.com/camera-museum/camera/8mmvc/data/1985-1990/1990_h800.html?p=1)>, Acesso a 15 setembro de 2014.
- [42] Mitsubishi Electric, Ar Condicionado com lógica Fuzzy. Disponível em <<http://www.mitsubishielectric.in/air-conditioners/non-inverter-r410a.php>>, Acesso a 15 setembro de 2014.

- [43] Suresh, R.M. & Arumugam, S. (2007) "Fuzzy technique based recognition of handwritten characters", *Image and Vision Computing*, Vol. 25, n.2, pp. 230-239, doi: 10.1016/j.imavis.2006.01.029.
- [44] Wang, T., Li, H., & Meng, C. (2013) "Self-Assembling for Swarm Modular Robots Using MIMO Fuzzy Control", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-10.
- [45] Erginer, B. & Altuğ, E. (2012) "Design and implementation of a hybrid fuzzy logic controller for a quadrotor VTOL vehicle", *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 10, n.1, pp.61-70.
- [46] Fernández, J., Cortés, P., Guadix, J. & Muñuzuri J. (2013) "Dynamic Fuzzy Logic Elevator Group Control System for Energy Optimization", *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol.12, n.3, pp.591-617, doi: 10.1142/S0219622013500223.
- [47] Turner, M.W., McCormick, V.E. & Cleland, J.G. (1996) "Efficiency Optimization Control of AC Induction Motors: Initial Laboratory Results", *US Environmental Protection Agency*.
- [48] Hanson, C.E. (2003) "A Fuzzy Technique for Performing Lateral-Axis Formation Flight Navigation Using Wingtip Vortices", *NASA*.
- [49] Tran, C. (2008) "Fuzzy control based on "true and false" philosophy for mechatronics systems", *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Vol.16, pp.11-20.
- [50] Nauck, D., Klawonn, F., & Kruse, R. (1993), "Combining neural networks and fuzzy controllers", *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 695, pp 35-46.
- [51] Herrera, F., Lozano, M. & Verdegay, J.L. (1995), "Tuning fuzzy logic controllers by genetic algorithms", *International Journal of Approximate Reasoning*, Volume 12, pp. 299–315, doi:10.1016/0888-613X(94)00033-Y.
- [52] Ishigami, H., Fukuda, T., Shibata, T., & Arai, F. (1995), "Structure optimization of fuzzy neural network by genetic algorithm", *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 71, Cap.3, Pages 257–264, doi: 10.1016/0165-0114(94)00283-D.
- [53] Nascimento Jr., C.L. & Yoneyama, T. (2000) "Inteligência Artificial em Controlo e Automação", ISBN: 9788521203100.
- [54] "Human Brain Project", Disponível em: <<https://www.humanbrainproject.eu/>>, Acesso em 20 de agosto de 2014.
- [55] Cajal, S.R. Disponível em <[https://en.wikipedia.org/wiki/Santiago\\_Ram%C3%B3n\\_y\\_Cajal](https://en.wikipedia.org/wiki/Santiago_Ram%C3%B3n_y_Cajal)>, Acesso em 20 de agosto de 2014
- [56] Haykin, S. (1998) "Neural Networks: A comprehensive foundation", 2ª Edição, ISBN-13: 978-0132733502.

- [57] “Artificial neuron”. Disponível em <[https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_neuron](https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neuron)>, Acesso em 20 de agosto de 2014.
- [58] Manuel, F., Morgado, R. & Dias, F. (2005) “Técnicas de Controlo não-linear baseadas em Redes Neurais: do algoritmo à implementação”, Universidade de Aveiro, Departamento de Eletrónica e Telecomunicações.
- [59] “Rede neural artificial”. Disponível em <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Rede\\_neural](https://pt.wikipedia.org/wiki/Rede_neural)>, Acesso em 20 de agosto de 2014.
- [60] El-Melegy, M.T. (2013) “Random Sampler M-Estimator Algorithm With Sequential Probability Ratio Test for Robust Function Approximation Via Feed-Forward Neural Networks”, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol.24, n.7, pp. 1074-1085, doi: 10.1109/TNNLS.2013.2251001.
- [61] Nakano, M. & Yasukata F. (2004) “Recognition of Smiling Faces Using Neural Networks and SPCA.”, *International Journal of Computational Intelligence & Applications*, Vol. 4, n. 2, pp.153-163, ISSN: 1469-0268.
- [62] Reyes, J., Morales-Esteban, A. & Martínez-Álvarez, F. (2013) “Neural networks to predict earthquakes in Chile”, *Applied Soft Computing*, Vol. 13, n. 2, pp. 1314-1328, doi: 10.1016/j.asoc.2012.10.014.
- [63] Duer, S., Zajkowski, K., Płocha, I. & Duer, R. (2013) “Training of an artificial neural network in the diagnostic system of a technical object”, *Neural Computing and Applications*, Vol. 22, n. 7-8, pp. 1581-1590, doi: 10.1007/s00521-012-1052-9.
- [64] Memon, A.P., Memon, A.S., Akhund, A.A. & Memon, R.H. (2013) “Multilayer Perceptrons Neural Network Automatic Voltage Regulator With Applicability And Improvement In Power System Transient Stability”, *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics*, Vol. 9, pp.30-38, ISSN: 2320-9569.
- [65] Hunt, K.J., Sbarbaro, D., Żbikowski, R. & Gawthrop, P.J. (1992) “Neural networks for control systems—A survey”, *Automatica*, Vol. 28, n. 6, pp.1083-1112.
- [66] Narendra, K.S. & Parthasarathy, K. (1990) “Identification and control of dynamical systems using neural networks”, *IEEE Transactions*, Vol.1, n. 1, pp. 4-27, doi: 10.1109/72.80202.
- [67] Liu, Y.J., Chen, C.L.P., Wen, G.X., & Tong, S. (2011) "Adaptive Neural Output Feedback Tracking Control for a Class of Uncertain Discrete-Time Nonlinear Systems," *Neural Networks, IEEE Transactions on* , Vol.22, n.7, pp.1162,1167, doi: 10.1109/TNN.2011.2146788.
- [68] Pérez-Cruz, J.H., Chairez, I., Rubio, J.J. & Pacheco, J. (2014) “Identification and control of class of non-linear systems with non-symmetric deadzone using recurrent neural networks”, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 8(3), pp. 183-192, DOI: 10.1049/iet-cta.2013.0248.
- [69] Nguyen, D.H. & Widrow, B. (1990) "Neural networks for self-learning control systems," *Control Systems Magazine, IEEE* , vol.10, n.3, pp.18,23, doi: 10.1109/37.55119.

- [70] Lacerda, E.G.M. & Carvalho, A.C.P.L.F. (1999) “Introdução aos Algoritmos Genéticos”, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, pp. 99-150.
- [71] Lacerda, E.G.M. “Metaheurísticas”. Disponível em  
<<http://www.dca.ufrn.br/~estefane/metaheuristicas/index.html>>, Acesso em 23 de agosto de 2014.
- [72] Wikipédia “Algoritmo Genético”. Disponível em  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_genético](https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_genético)>, Acesso em 23 de agosto de 2014.
- [73] Manual válvulas (2005), “Control Valve Handbook”, 4ª Edição, EMERSON Process Management, FISHER.
- [74] Beverly, R.P. (2013), “Filter Troubleshooting and Design Handbook”, American Water Works Association, ISBN 1583219234, 9781583219232.
- [75] Calado, J.M.F. (1996) “On-line Fault Diagnosis of Industrial Process Based on Artificial Intelligence Techniques”, PhD Thesis, Control Engineering Research Center, City University, London, May.
- [76] Jackson, P. (1986), “Introduction to Expert Systems”, Addison-Wesley.