

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção

Marcos Marcelino Mazzucco

**UM SISTEMA DIFUSO PARA O CONTROLE DE
TEMPERATURA DE UNIDADES DE PROCESSAMENTO
EM BATELADA**

Tese de Doutorado

Florianópolis

2003

Marcos Marcelino Mazzucco

**UM SISTEMA DIFUSO PARA O CONTROLE DE
TEMPERATURA DE UNIDADES DE PROCESSAMENTO EM
BATELADA**

Tese apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para a obtenção
do título de **Doutor em Engenharia de Produção**

Orientador: Prof. Ariovaldo Bolzan, Dr.

Florianópolis
2003

Marcos Marcelino Mazzucco

**UM SISTEMA DIFUSO PARA O CONTROLE DE TEMPERATURA
DE UNIDADES DE PROCESSAMENTO EM BATELADA**

Esta tese foi julgada e aprovada como requisito parcial para a obtenção do
título de

Doutor em Engenharia de Produção no
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 8 de dezembro de 2003.

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr. Eng.

Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Ariovaldo Bolzan, Dr. Sc.

Orientador

Prof. Carlos Alberto Claumann, Dr. Sc.

Prof. Fernando Gauthier, Dr. Eng.

Prof. Claudia Sayer, Dr. Sc.

Prof. Ricardo Antonio Francisco
Machado, Dr. Sc.

Prof. Oscar Ciro Lopez, Dr. Eng.

À minha esposa Marina Pettesen Mazzucco

À minha filha Isabela Pettesen Mazzucco

A meus pais Tito Mazzucco e

Vivaldina Graciosa Sandrini Mazzucco

Agradecimentos

À Universidade Federal de Santa Catarina,
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro;
Ao Laboratório de Controle de Processos, LCP, do
Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (UFSC),
pelo suporte tecnológico e oportunidade;
*Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção
pelo aprendizado e oportunidade.*

Aos Professores Ariovaldo Bolzan e Ricardo Antonio Francisco Machado.

Aos companheiros do LCP, pelas contribuições e amizade.

À família Mazzucco pelo incentivo.

RESUMO

MAZZUCCO, Marcos Marcelino, **Um sistema difuso para o controle de temperatura em unidades de processamento em batelada**. 2003. 241f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)- Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

Sistemas de controle difuso representam uma metodologia formal para a estruturação de estratégias de controle a partir de conhecimento heurístico. Da mesma forma que apresentam-se como de compreensão mais fácil, em relação aos métodos lineares de controle, exigem do engenheiro/operador de uma planta industrial conhecimentos de conjuntos difusos, pouco disseminados, limitando a aplicação em ampla escala. Este trabalho visa fornecer os conceitos matemáticos de conjuntos difusos de forma ampla e clara, bem como propor uma estratégia de controle de temperatura para unidades de processamento em batelada. Explicitam-se também métodos de ajuste para a definição de uma técnica viável para aplicação final. As técnicas de ajuste foram aplicadas em um sistema em batelada típico, um tanque de mistura, considerando processos com e sem reação química. Como reação química foi utilizada a reação de polimerização do Estireno em suspensão. O alvo do controlador foi definido como a temperatura do sistema, a partir da manipulação das correntes quente e fria alimentadas à camisa do tanque de mistura. Dois controladores difusos foram implementados, um para cada corrente, a partir das medidas do desvio da temperatura do valor desejado e da variação da temperatura ao longo do tempo. Para a experimentação foi desenvolvido um sistema de controle completo, envolvendo desde a especificação do *hardware* até o *software* de controle. Os resultados indicam

que a forma mais simples de implementar um sistema de controle difuso para reatores tipo batelada envolve o acoplamento entre as informações que produzem as ações de controle para aquecimento e resfriamento. O acoplamento foi definido com base no conhecimento heurístico sobre processos desta natureza. Para permitir um ajuste rápido foi implementado um algoritmo para manipulação, em grupo, dos parâmetros dos conjuntos difusos, com bons resultados. Análises sobre a influência de diversos parâmetros de ajuste foram realizadas com aplicações experimentais.

Palavras-chave: Controle automático de processos, Controle difuso, Processos em Batelada, Polimerização em suspensão, Poliestireno expandido, Programação orientada a objetos.

ABSTRACT

MAZZUCCO, Marcos Marcelino, **Um sistema difuso para o controle de temperatura em unidades de processamento em batelada**. 2003. 241f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)- Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

Fuzzy control systems represent a formal methodology for the arrangement of control strategies from heuristic knowledge. In the same way that they are presented as of more easy understanding, in relation to the linear methods of control, they demand of the engineer/operator of an industrial plant, knowledge of fuzzy sets, little spread, limiting the application in ample scale. This work aims at to supply the mathematical concepts of fuzzy sets of ample and clear form, as well as considering a strategy of temperature control of batch processing units. Here is presented, also, methods of adjustment for the definition of one viable technique for final application. The adjustment techniques had been applied in a typical batch system, a tank of mixture, considering processes with and without chemical reaction. As chemical reaction the polymerization of the Styrene in suspension was used. The target of the controller was defined as the temperature of the system, from the manipulation of fed hot stream and cold stream to the jacket of the tank. Two fuzzy controllers had been implemented, one for each stream, from the measures of the deviation of the temperature of the desired value and the variation of the temperature along the time. For the experimentation, a complete control system was developed, involving since the specification of the hardware until the control software. The results indicate that the simplest form to implement a fuzzy control system for batch reactors involves the coupling between the

information that produce the actions of control for heating stream and cooling stream. The coupling was defined on the basis of the heuristic knowledge on processes of this type. To allow a fast adjustment, an algorithm for manipulation, in-group, of the parameters of the fuzzy sets was implemented with good results. Analyses on the influence of diverse parameters of adjustment had been carried out with experimental applications.

Keywords: Automatic processes control, Fuzzy control, Batch Processes, Polymerization in suspension, Expandable Polystyrene, Object Oriented Programming.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas.....	17
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	19
1 Introdução.....	21
2 Objetivos.....	24
2.1 Objetivo Geral	24
2.2 Objetivos Específicos	24
3 Revisão de Controladores Baseados em Sistemas Inteligentes e Determinísticos.	25
4 Projeto de um Controlador Difuso	39
4.1 Controle difuso de temperatura para sistemas de processamento em batelada	50
4.1.1 Ajuste dos conjuntos difusos	54
4.1.1.1 Fator de Escala	58
4.1.1.2 Parâmetros de Deslocamento	63
4.1.1.3 Sobreposição dos conjuntos	64
4.1.1.4 Razão de distribuição	64
4.1.1.5 Entrada Difusa	67
4.1.1.6 Grau de ativação mínimo das regras	67
4.1.1.7 Base de regras difusas	68
5 Unidades Experimentais	72
5.1 Sistema de processamento em batelada	75
6 Resultados e Discussões	83
6.1 Determinação dos fatores de escala.....	84
6.2 Ajuste dos parâmetros de deslocamento.	86
6.3 Ajuste de controladores difusos através da razão de distribuição	107
6.4 Alteração da base de regras.....	116
6.5 Entrada difusa	130
6.6 Grau de sobreposição	133

6.7 Ensaio com reação química.....	140
6.8 Síntese dos resultados	146
7 Conclusões e Sugestões.....	148
7.1 Conclusões.....	148
7.2 Sugestões	149
Referências Bibliográficas	151
Apêndice A – Teoria dos Conjuntos difusos	164
Apêndice B- Especificações do Equipamentos.....	205
Apêndice C- A polimerização do Estireno em Suspensão	212
Apêndice D- O Software.....	219

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Um processo simples com um	39
Figura 2- Dois domínios difusos $y(t)$ e $U(t)$	40
Figura 3 - Um processo simples com um controlador	42
Figura 4- Termos lingüísticos para E , ΔY e ΔU	43
Figura 5 – Quatro eventos (entre nove) possíveis para um controlador	44
Figura 6 - Um controlador baseado em medidas do Erro e.....	49
Figura 7 - Manipulação <i>Split-range</i>	50
Figura 8 - 11 termos lingüísticos igualmente espaçados para E , ΔY e ΔU	52
Figura 9 –Temperatura x tempo ($\Delta U=100\%$)	56
Figura 10 –Abertura das válvulas de aquecimento e resfriamento.....	56
Figura 11 – Variação de Temperatura durante aquecimento e resfriamento....	57
Figura 12 – 11 termos lingüísticos para E (fator de escala 100)	59
Figura 13 – Aumento do fator de escala (125) para E	60
Figura 14 – Redução do fator de escala (50) para E	60
Figura 15 – 11 termos lingüísticos para ΔU com fator de escala 100.....	61
Figura 16 – Aumento do fator de escala (100) para ΔU	62
Figura 17 - Alterações nos parâmetros de deslocamento (λ_E , $\lambda_{\Delta Y}$).	64
Figura 18 – Razão de distribuição 0,5	66
Figura 19 - Razão de distribuição 1,5.....	66
Figura 20 – Entradas difusas triangular e unitária	67
Figura 21 - Um sistema de primeira ordem.	73
Figura 22 - Um sistema de segunda ordem.....	74
Figura 23 - Um sistema com dinâmica variante.....	75
Figura 24 – Unidade para polimerização	77
Figura 25 – Detalhes do tanque de mistura.....	78
Figura 26 – Unidade para polimerização alterada	79
Figura 27 – Sistema não-linear: Temperatura x Tempo.....	80

Figura 28 – Sistema não-linear: Válvula de Aquecimento x Tempo	81
Figura 29 – Sistema não-linear: Válvula de Resfriamento x Tempo.....	81
Figura 30 – Conjuntos difusos para universo de discurso E	85
Figura 31 – Conjuntos difusos para universo de discurso ΔY	85
Figura 32 – Conjuntos difusos para universo de discurso ΔU	86
Figura 33 – Temperatura: experimento 1.	88
Figura 34 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 1.	88
Figura 35 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 1.	89
Figura 36 – Temperatura: experimento 2.	90
Figura 37 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 2.	90
Figura 38 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 2.	91
Figura 39 – Temperatura: experimento 3.	92
Figura 40 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 3	92
Figura 41 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 3.	93
Figura 42 – Temperatura: experimento 4.	94
Figura 43 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 4.	95
Figura 44 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 4.	95
Figura 45 – Temperatura: experimento 5.	96
Figura 46 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 5.	96
Figura 47 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 5.	97
Figura 48 – Temperatura: experimento 6.	98
Figura 49 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 6.	98
Figura 50 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 6.	99
Figura 51 – Temperatura: experimento 7.	100
Figura 52 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 7.	100
Figura 53 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 7.	101
Figura 54 – Temperatura: experimento 8.	102
Figura 55 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 8.	102
Figura 56 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 8.	103
Figura 57 – Temperatura: experimento 9.	104
Figura 58 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 9.	104
Figura 59 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 9.	105

Figura 60 – Temperatura: experimento 10.	106
Figura 61 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 10.	106
Figura 62 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 10.	107
Figura 63 – Conjuntos difusos para $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2$	108
Figura 64 – Temperatura: experimento 11.	109
Figura 65 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 11.	109
Figura 66 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 11.	110
Figura 67 – Conjuntos difusos para $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=3$	110
Figura 68 – Temperatura: experimento 12.	111
Figura 69 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 12.	112
Figura 70 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 12.	112
Figura 71 – Temperatura: experimento 13.	113
Figura 72 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 13.	113
Figura 73 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 13.	114
Figura 74 – Temperatura: experimento 14.	115
Figura 75 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 14.	115
Figura 76 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 14.	116
Figura 77 – Temperatura: experimento 15.	117
Figura 78 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 15.	118
Figura 79 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 15.	118
Figura 80 – Temperatura: experimento 16.	119
Figura 81 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 16.	120
Figura 82 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 16.	120
Figura 83 – Temperatura: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$	121
Figura 84 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$	122
Figura 85 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$	122
Figura 86 – Temperatura: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$	123
Figura 87 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$	123

Figura 88 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$.	124
Figura 89 – Temperatura: experimento 18.	125
Figura 90 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 18.	125
Figura 91 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 18.	126
Figura 92 – Temperatura: experimento 19.	127
Figura 93 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 19.	127
Figura 94 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 19.	128
Figura 95 – Temperatura: experimento 20.	129
Figura 96 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 20.	129
Figura 97 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 20.	130
Figura 98 – Entrada difusa triangular $0,8\pm 0,5$ para ΔY .	131
Figura 99 – Temperatura: experimento 21.	131
Figura 100 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 21.	132
Figura 101 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 21.	132
Figura 102 – Conjunto difuso E: redução do grau de sobreposição.	134
Figura 103 – Conjunto difuso ΔY : redução do grau de sobreposição.	134
Figura 104 – Conjunto difuso ΔU : redução do grau de sobreposição.	135
Figura 105 – Temperatura: experimento 22.	135
Figura 106 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 22.	136
Figura 107 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 22.	136
Figura 108 – Conjunto difuso E: aumento do grau de sobreposição.	137
Figura 109 – Conjunto difuso ΔY : redução do grau de sobreposição.	138
Figura 110 – Conjunto difuso ΔU : aumento do grau de sobreposição.	138
Figura 111 – Temperatura: experimento 23.	139
Figura 112 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 23.	139
Figura 113 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 23.	140
Figura 114 – Temperatura: experimento 24.	141
Figura 115 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 24.	142
Figura 116 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 24.	142
Figura 117 – Temperatura: experimento 25.	143
Figura 118 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 25.	143

Figura 119 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 25.	144
Figura 120 – Temperatura: experimento 26.	145
Figura 121 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 26.	145
Figura 122 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 26.	146
Figura 123 - Função característica para um conjunto clássico	165
Figura 124 - Funções características para um conjunto difuso.	166
Figura 125 - Representação contínua de um conjunto difuso.	167
Figura 126 - Representação discreta de um conjunto difuso	168
Figura 127 - Um <i>cut</i> - α para um conjunto A no universo X	169
Figura 128 - Altura de um conjunto A normal e de um conjunto B subnormal.	170
Figura 129 - Núcleo do conjunto difuso A no universo X	171
Figura 130 - Suporte de um conjunto difuso A no universo X	171
Figura 131 - Um conjunto difuso convexo A e um não-convexo B	172
Figura 132 – Demonstração das requisições para caracterização de uma <i>T-norma</i>	175
Figura 133 - Representação gráfica de uma relação difusa.	181
Figura 134 - Representação gráfica da projeção de uma relação difusa R sobre X e Y	184
Figura 135 - Representação gráfica da extensão cilíndrica de $\mathbf{B} \in \mathbf{Y}$ sobre $\mathbf{X} \times \mathbf{Y}$	190
Figura 136 - Representação gráfica da extensão cilíndrica de $\mathbf{A} \in \mathbf{X}$ sobre $\mathbf{X} \times \mathbf{Y}$	190
Figura 137 - Adição de dois números difusos.	194
Figura 138 - Representação de um conjunto triangular.	195
Figura 139 - Adições sobre conjuntos discretos com diferentes intervalos de discretização. “5-1”: equação (89); “5-2”: equação (90);	196
Figura 140 - Uma regra simples.	197
Figura 141 - Uma possível regra para um sistema de ventilação.	198
Figura 142 - Um número difuso Y	202
Figura 143 - Três formas de converter um número real x_1 em um número difuso \mathbf{x}_1	202

Figura 144 - Um conjunto difuso discreto	203
Figura 145 - Redução do grau de discretização da figura 144.....	204
Figura 146 – Protótipo do sistema de monitoramento e controle- 4^{Ctrl}	220
Figura 147 - Hierarquia de classes para os gerenciadores do sistema de controle.....	222
Figura 148 - Hierarquia de classes para os módulos do sistema de controle.	222
Figura 149 - Os gerenciadores em 4^{Ctrl}	223
Figura 150 - Tríade Entradas/Parâmetros/Saídas.	224
Figura 151- Um processo SISO (<i>Single Input Single Output</i>).	226
Figura 152 - Representação de um processo SISO para 4^{Ctrl}	226
Figura 153 - Tríades para os módulos da figura 152.	226
Figura 154 - Estrutura de dados totalmente centralizada.....	229
Figura 155 - Estrutura de dados centralizada por funcionalidade.	229
Figura 156 - Estrutura de dados centralizada no <i>hardware</i>	230
Figura 157 - Estrutura de dados centralizada no controle.....	230
Figura 158 - Estrutura de dados totalmente distribuída.	231
Figura 159 – Servidores de dados e módulos adicionais.....	232
Figura 160 - Interfaces gráficas para aquisição de dados : Clientes e <i>Driver</i> .	233
Figura 161 - Sistemas simulado (a) e reais (b, c e d).	234
Figura 162 – Conjunto de instruções para as malhas de controle de nível	236
Figura 163 - Conjunto de instruções para o reator de polimerização (Parte 1/4).	237
Figura 164 - O sistema de controle da unidade de polimerização.....	241

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras para o exemplo das figuras 1 e 2	40
Tabela 2 - Forma compacta da tabela 1	41
Tabela 3 - Interpretação de nove conceitos lingüísticos.	43
Tabela 4 - Vinte e Sete regras para um controlador com três universos de discurso, contendo três subconjuntos cada um.	45
Tabela 5 – Nove regras válidas para um controlador com três universos de discurso, contendo três subconjuntos cada um.	45
Tabela 6 – Interpretação das regras válidas para um controlador simples.	46
Tabela 7 - Interpretação de quinze conceitos lingüísticos.....	47
Tabela 8 – Vinte e Cinco eventos possíveis para um controlador com três universos de discurso, contendo cinco subconjuntos cada um.....	47
Tabela 9 - Cento e Vinte e Cinco regras para um controlador com três universos de discurso, contendo cinco subconjuntos cada um.....	48
Tabela 10 – Vinte e Cinco regras válidas para um controlador com três universos de discurso, contendo cinco subconjuntos cada um.....	49
Tabela 11 - Regras para o controlador da corrente de resfriamento.....	51
Tabela 12 - Regras envolvendo 11 termos lingüísticos para o.....	53
Tabela 13 - Regras envolvendo 11 termos lingüísticos para o.....	53
Tabela 14 - Regras envolvendo 11 termos lingüísticos para o.....	69
Tabela 15 - Regras modificadas envolvendo 11 termos lingüísticos para o	71
Tabela 16 - Parâmetros adotados no experimento 1.	87
Tabela 17 - Operações de União, Interseção e Complemento para dois conjuntos clássicos, A e B	173
Tabela 18 - Representação tabular para uma relação difusa.....	181

Tabela 19 - Representação tabular da projeção de uma relação ternária sobre um conjunto bidimensional.....	186
Tabela 20 - Representação tabular para a extensão cilíndrica de $\mathbf{B} \in \mathbf{X}$ sobre $\mathbf{X} \times \mathbf{Y}$	189
Tabela 21 - Representação tabular para a extensão cilíndrica de $\mathbf{A} \in \mathbf{X}$ sobre $\mathbf{X} \times \mathbf{Y}$	189
Tabela 22 - Conectivas mais utilizadas.	199
Tabela 23 - Estrutura de diretórios necessária para os gerenciadores.	225
Tabela 24 - Funções principais da ITD.....	228

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

AD/DA: Conversão Analógico-Digital ou Conversão Digital-Analógico.

CARMA: *Controller Auto-Regressive Moving Average*.

CLP: Controlador Lógico programável.

COG: *Center of Gravity*.

DAC: *Data Acquisition Card*.

ITD: Interface para troca de dados.

PID: Controlador Proporcional Integral Derivativo.

SP: *Set point*.

SISO: *Single Input Single Output*.

TCP/IP: *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*.

VAC: Tensão em corrente alternada.

VDC: Tensão em corrente contínua.

Símbolos

A, B, X: conjuntos difusos.

E: Conjunto difuso representando o desvio da saída do sistema em relação a referência.

K_c : Parâmetro de ajuste proporcional de um controlador PID.

T_i : Parâmetro de ajuste integrativo de um controlador PID.

T_D : Parâmetro de ajuste derivativo de um controlador PID.

ΔY : Conjunto difuso representando a variação da saída do sistema ao longo do tempo.

ΔU_1 : Conjunto difuso representando a variação da ação de controle para válvula de aquecimento.

ΔU_2 : Conjunto difuso representando a variação da ação de controle para válvula de resfriamento.

$\mu, \mu(x)$: Grau de pertinência de x no universo X .

ε : Fator de Escala;

σ : Sobreposição dos conjuntos;

δ : Razão de distribuição;

π : Entrada Difusa;

τ : Grau de ativação mínimo das regras;

λ : Parâmetros de deslocamento.

λ_E : Parâmetro de deslocamento da base de regras referente ao Erro.

$\lambda_{\Delta Y}$: Parâmetro de deslocamento da base de regras referente a variação de temperatura.

1 INTRODUÇÃO

A busca de sistemas para automatização e controle de tarefas é progressiva e abrange todos os segmentos da vida moderna, de tarefas domésticas à grandes produções industriais. Registros históricos indicam que os egípcios criaram o primeiro sistema de controle, um regulador de nível para um relógio d'água. Distante deste episódio e com o advento da revolução industrial, o desafio de automatizar têm se tornado uma necessidade. Hoje, certamente, a demanda de muitos produtos não seria atendida se processos manuais fossem utilizados. Mesmo que uma grande quantidade de pessoas pudesse produzir o mesmo volume de bens que um processo automático, a qualidade e as características dos produtos obtidos não seriam mantidas durante o tempo. Assim, o objetivo de automatizar um processo é aumentar sua capacidade ou eficiência ou diminuir sua periculosidade.

As indústrias farmacêutica, de alimentos e química, entre outras, utilizam sistemas descontínuos em seus processos com os objetivos de promover mistura e condições de operação adequadas e conduzir reações químicas em situações ótimas. Neste trabalho será adotada água como meio de mistura, representante de sistemas sem reação química e a reação de polimerização do Estireno em suspensão como representante de sistemas reativos. A escolha desta reação é devida à necessidade de manter um perfil de temperatura durante o processo para a produção do material desejado. É uma variável difícil de ser controlada pois a reação possui um caráter exotérmico, podendo sofrer disparo, causando danos ao reator ou complicações no beneficiamento.

A automatização de processos que operam em regime de batelada é, em essência, comum a sistemas de mistura simples (sem reação química) e a reatores químicos descontínuos. Esta classe de sistemas é representada por um tanque agitado e encamisado onde, principalmente, pressão e temperatura são monitoradas e/ou controladas. O aquecimento/resfriamento do meio pode ser realizado pela injeção da mistura de correntes quente e fria na camisa do tanque de mistura. A corrente quente é obtida através de trocadores de calor, com vapor d'água como fonte de energia. A automatização de processos desta natureza envolve,

basicamente, bombas, agitadores, válvulas e sensores para medida de nível, vazão, temperatura e pressão. Com isso, é possível: sequenciar as operações de agitação, alimentação de materiais e alimentação de aditivos, iniciar o processo, controlar a temperatura no sistema, encerrar o processo, adicionar aditivos para o produto final, tratar o produto e descarregar o tanque. É possível utilizar controladores industriais como PID (Proporcional, Integral e Derivativo), Fuzzy (Difuso), adaptativos, preditivos e CLPs (controladores lógico programáveis) para manter o processo nas condições desejadas e seqüenciar as tarefas requeridas. Outra alternativa é realizar todas as tarefas através de computadores, ou ainda uma abordagem mista com controladores industriais e computadores. Quando são utilizados computadores é requerido, também, um *software* para realizar as tarefas de controle e sequenciamento de operações.

O controle da temperatura foi estabelecido com base em conhecimentos adquiridos da operação de equipamentos e formalizado através da teoria dos conjuntos difusos e da lógica difusa. O controlador de temperatura foi projetado para atuar sobre as válvulas que regulam as correntes quente e fria de forma a reduzir o consumo de energia. Diversas formas de ajuste foram propostas e analisadas.

Foram realizadas experimentações em um protótipo de um sistema de mistura com complexidade idêntica a um processo industrial (mesmos equipamentos e limitações). Trata-se de um caso pouco apresentado na literatura de sistemas difusos, e demanda conhecimentos de processos químicos, *software* e teoria de conjuntos difusos, além da disponibilidade de aparatos experimentais. De forma semelhante, na literatura de controle de processos, são abordados com maior freqüência sistemas contínuos em detrimento aos processos em batelada.

Para aplicar as propostas foi implementado um *software* para o controle e monitoramento do processo, em batelada, de polimerização do Estireno em suspensão.

Este trabalho está organizado em sete capítulos onde são desenvolvidos os seguintes conteúdos:

- No capítulo 2 são apresentados os objetivos que conduziram à execução deste;

- No Capítulo 3, uma revisão bibliográfica sobre sistemas de controle aplicados é apresentada;
- No capítulo 4, as etapas do projeto do controlador e os mecanismos de ajuste são desenvolvidos;
- No capítulo 5 as unidades experimentais utilizadas são descritas;
- No capítulo 6, os resultados, devidamente comentados, são expostos;
- No capítulo 7 as conclusões e sugestões para trabalhos futuros encerram este trabalho;
- Adicionalmente os apêndices A a D agrupam informações relevantes para a compreensão dos conceitos tratados, bem como para o entendimento do problema abordado.

No próximo capítulo são apresentados os objetivos que motivaram este trabalho e cujos desdobramentos conduziram aos resultados que serão mostrados posteriormente.

2 OBJETIVOS

Este capítulo apresenta os objetivos geral e específicos que serão explorados no contexto deste trabalho.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um sistema difuso para o controle da temperatura de sistemas de mistura em batelada, bem como analisar formas de ajuste lineares e não-lineares para o controlador, contribuindo para a compreensão do comportamento deste sobre sistemas desta natureza.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo consideram as necessidades de:

- Fundamentar de forma clara a teoria de conjuntos difusos que cerca a implementação do controlador aplicado ;
- Implementar um sistema de controle difuso para o controle de temperatura de unidades de mistura em batelada típicas;
- Implementar e analisar mecanismos de ajuste para o sistema de controle difuso sobre uma unidade de processamento em batelada;
- Executar ensaios sobre sistemas de mistura com e sem reação química em condições práticas (casos realistas);
- Desenvolver um *software* capaz de realizar a tarefa de controle de um processo de mistura descontínuo a partir de um *hardware* especificado.

3 REVISÃO DE CONTROLADORES BASEADOS EM SISTEMAS INTELIGENTES E DETERMINÍSTICOS.

Este capítulo apresenta um levantamento bibliográfico com aplicações diversas, principalmente de sistemas inteligentes, para o controle de processos. Observa-se que os processos em batelada são pouco abordados justificando a essência desta proposta.

Mazzucco *et al.* (1997, 1998) aplicaram uma rede neuronal *feedforward* para formar esquemas de controle preditivo. O controlador consiste em um GPC (*generalized predictive control*) onde o modelo é descrito pela rede neuronal. Sistemas não-lineares com e sem tempo morto foram utilizados na validação do controlador. Horizontes de controle e predição mínimos foram adotados devido à limitação da rede neuronal. Bons resultados foram obtidos apesar desta limitação.

Machado e Bolzan (1998) apresentaram um controlador (STC- *Self Tunning Controller*) adaptado às características de um controlador PID. O objetivo era incorporar o conhecimento para o ajuste do último sobre o primeiro. Aplicaram o controlador à um reator do tipo batelada operando uma reação de polimerização do Estireno em suspensão, com bons resultados.

Mazzucco *et al.* (1998b) utilizaram algoritmos genéticos para ajustar um controlador PID, a partir da identificação, também através de algoritmos genéticos, do sistema. A metodologia limita-se a aproximações de sistemas à modelos de primeira ordem com tempo morto. Um algoritmo genético com codificação binária e um controlador PID digital na forma da velocidade foram utilizados.

Mazzucco *et al.* (2000) ajustaram um controlador difuso, baseado nos mecanismos de Mamdani, com algoritmos genéticos, comparando com um controlador PID ajustado pela mesma metodologia. As comparações foram

realizadas para um sistema de primeira ordem, para o qual os dois controladores deveriam apresentar o mesmo desempenho se as melhores soluções fossem obtidas durante a fase de ajuste. Devido à incorporação de um elemento não linear, o controlador difuso apresentou um desempenho levemente superior ao PID nas ações de controle.

Sebzalli *et al.* (2000) abordam idéias sobre o uso da experiência prática para formação de modelos. Assim a experiência e habilidade dos operadores torna-se parte integrante, juntamente com dados dos processos, do modelo da planta industrial. Suas discussões utilizaram uma unidade de FCC (*Fluidized Catalitic Cracking*).

Sarma e Rengaswamy (2000) desenvolveram um sistema de controle MIMO (*Multi-Input-Multi-Output*) para uma unidade de craqueamento catalítico fluidizado. O sistema de controle baseado em lógica difusa, FLC (*Fuzzy Logic Controller*), com ganho programado (GS- *Gain Schedule*) foi modificado para entradas e saídas desacopladas (SLD- *Static Linear Decoupler*), formando um controlador GS-FLS/SLD. A partir de algumas perturbações, foram definidos os ganhos para uma série de estados estacionários que, através do desacoplador, permitiram a adaptação do controlador. Os resultados foram bons, mostrando que a combinação de metodologias bem estabelecidas (como ganho programado) e sistemas inteligentes com lógica difusa são robustos e flexíveis possuindo desempenho adequado para sistemas complexos.

Um sistema difuso configurado na forma de uma rede *feedforward* foi utilizado por Belarbi, Bettou e Mezaache (2000) para estudos de modelagem e controle de uma unidade de digestão de celulose. Apenas os pesos da parte conseqüente das regras foram ajustados. No algoritmo de ajuste foi utilizada uma versão modificada do tradicional *backpropagation*, denominado *fuzzy backpropagation*. Através deste algoritmo a rede é treinada para aprender regras para a estimação de Kappa, que representa a medida do conteúdo de lignina, a partir de medidas de temperatura e

concentração de base no digestor. As *T-norma* e *S-norma* utilizadas foram o produto algébrico e a soma algébrica, respectivamente. A conversão Domínio-Real-Domínio-Difuso (*fuzzyfication*) foi realizada por um conjunto difuso unitário (*singleton*). Na transformação Domínio-Difuso-Domínio-Real (*defuzzyfication*) foi utilizado o método do Centro de Gravidade (COG).

Caputo e Pelagagge (2000) aplicaram um sistema difuso para adaptar o ganho de um sistema de circulação de ar para a recuperação de calor. Apesar das regras utilizadas, apresentarem apenas uma premissa, a aplicação é interessante e possui muitos resultados práticos.

Groumos e Stylios (2000) comentam uma ferramenta para modelagem denominada FCM (Fuzzy Cognitive Maps) a qual é, basicamente, uma associação da lógica difusa e grafos. Excelentes perspectivas são apontadas para a técnica, porém não são apresentadas aplicações.

Neuroth, MacConnell, Stronach e Vamplew (2000) aplicaram um controlador de Mamdani e uma rede neuronal para uma estação de bombeamento de gás. O Controlador difuso foi aplicado sobre o sistema já existente para tratar situações extremas, onde o sistema existente era deficiente. A rede neuronal foi utilizada para corrigir a equação de Darcy na previsão da perda de carga no sistema. Os resultados apresentados mostram uma melhora significativa do desempenho da estação de bombeamento.

Wong, Shah, Bourke e Fisher (2000) aplicaram os controladores SLPFC (*Self-Learning Predictive Fuzzy Controller*) e FRLRPC (*Fuzzy Relational Long-Range Predictive Controller*) no controle de nível de um par de tanques interativos, formando um sistema de segunda ordem. O controlador SLPFC apresentou melhor desempenho, porém o controlador FRLRPC mostrou-se mais robusto e com um algoritmo de identificação do processo mais eficiente.

Bastian (2000) introduziu a identificação difusa de sistemas usando programação genética para configurar o modelo difuso. Os poucos exemplos apresentados no trabalho concordaram bem com os dados utilizados no ajuste. Regras do tipo de Mamdani com duas premissas e uma conclusão foram utilizadas, porém os termos lingüísticos (qualificadores) que formam a conclusão foram representados por conjuntos unitários (*singletons*).

Tang, Da e Wang (2000) apresentaram um sistema difuso adaptativo para o controle de sistemas variantes no tempo. Aplicaram o sistema difuso para caracterizar a produção agrícola, a partir de fatores ambientais, em uma região da China.

Edgar e Postlethwaite (2000) identificaram um sistema de neutralização ácido-base com um modelo difuso e desenvolveram um método para a inversão do modelo, produzindo um controlador difuso com modelo interno. O controlador foi testado em um sistema simulado, com resultados encorajadores, porém os autores afirmam que os resultados são preliminares e que testes mais extensos devem, ser realizados.

Karagöz, Hapoğlu e Alpbaz (2000) aplicaram um controlador de variância mínima (GMV) baseado em um modelo do tipo CARMA (Controller Auto-Regressive Moving Average), para o controle da polimerização em suspensão do Estireno em um reator laboratorial. Os resultados, para um perfil de temperatura predeterminado foram comparados com dados teóricos com boa concordância.

Galluzzo *et al.* (2001) aplicaram um sistema de controle a nível supervisorio para um processo com lodo ativado. Dois níveis de controle foram projetados formando um controlador denominado ARGMC (*Adaptive Robust Generic Model Control*). O controlador foi testado em experimentos reais e simulados. Para os

experimentos simulados foi utilizado um modelo contendo 82 equações diferenciais, desenvolvido por Stenstrom (1976) e Ducato & Galluzzo (1995). Bons resultados foram obtidos para o controlador e o modelo. A *T-norma* "Mínimo" e a *S-norma* "Máximo" foram utilizadas para as operações de interseção e união no controlador. A transformação Domínio-Real-Domínio-Difuso foi realizada por um conjunto difuso unitário. Na transformação Domínio-Difuso-Domínio-Real foi utilizado o método do Centro de Gravidade (COG).

Finol, Guo e Jing (2001) estudaram os parâmetros para determinar reservatórios de petróleo, utilizando um modelo difuso construído a partir de regras de Takagi–Sugeno–Kang (TSK). O ajuste dos parâmetros das conseqüentes das regras foi realizado através do método dos mínimos quadrados. O modelo difuso apresentou um desempenho superior ao clássico (linear).

O algoritmo dos Mínimos Quadrados Ortogonal com restrições foi aplicado por Mastorocostas, Theocharis e Petridis (2001) para geração de modelos difusos baseados em regras de Takagi-Sugeno-Kang associando *clusters* e regras. Uma boa abordagem matemática foi realizada e os algoritmos foram apresentados.

Kojima, Kubota e Hashimoto (2001) propuseram um sistema difuso para detecção de defeitos em tubos de geração de vapor em usinas termonucleares. Programação genética foi utilizada para extrair e selecionar as características relevantes para o sistema difuso. O sistema foi eficiente na detecção da posição e tamanho do defeito.

Özan, Özen, Erdoğan, Hapoğlu e Alpbaz (2001) aplicaram um controlador não linear para um reator do tipo batelada para a polimerização do Estireno em suspensão. O objetivo do controlador foi direcionado a manter a temperatura do sistema na trajetória ótima. Um modelo NARMAX (*Nonlinear Auto Regressive Moving Average eXogenous*) foi utilizado para a identificação do sistema. Experimentos simulados e laboratoriais foram realizados com bons resultados,

porém não foram efetuadas perturbações suficientes para caracterizar o controlador. Os parâmetros do modelo NARMAX ($y(t)=c_0y(t-2)+c_1y(t-1)+c_2u(t-1)^3$) foram estimados através do método de Levenberg Marquardt.

Lian e Huang (2001), desenvolveram um sistema difuso para sistemas MIMO com base em uma estratégia de desacoplamento difusa, enfatizando que a maioria das aplicações se restringe a sistemas do tipo SISO. A composição "Max-Min" foi utilizada e o método do centro de área foi adotado para a conversão Domínio-difuso-Domínio-real. Através de simulação foi demonstrada a superioridade do desacoplador difuso desenvolvido.

Mascioli (2001) formou um modelo baseado em conhecimento do processo para representar uma fração da distribuição do tamanho de partícula após a reação para produção do poliestireno expansível (EPS). Como variáveis independentes do modelo foram utilizadas as quantidades de agente de suspensão, surfactante e frequência de agitação (estabelecidas para o produto desejado). Os resultados concordaram com dados experimentais apresentados, onde se enfatiza a dificuldade da obtenção de dados de confiança pelo elevado tempo de reação (14h) e daí a importância de um modelo, mesmo que aproximado, para caracterizar a distribuição final de tamanho das partículas.

Guerra e Vermeiren (2001), realizaram análise de estabilidade para uma família de leis de controle baseada nos modelos de Takagi-Sugeno. Contribuições desta natureza estabelecem controladores difusos com base em teorias clássicas de controle fortalecendo e qualificando as aplicações finais.

Sousa Jr e Almeida (2001) estruturaram um modelo difuso para permitir a determinação do conjunto de regras para a seleção automática do ponto de partida para alimentação de sacarose invertida em um processo de fermentação em batelada. Na mesma linha de trabalho Kishimoto, Beluso, Omasa, Katakura, Fukuda,

e Suga (2002), propuseram um sistema de controle para a taxa de alimentação de glicose para produção de etanol.

Kukolj, Kuzmanovic e Levi (2001), projetaram um controlador difuso baseado em um PID pela conversão de E e ΔE , no plano de fase, em coordenadas polares. O Módulo e a fase obtidos configuraram as entradas do controlador difuso. Resultados simulados pouco superiores ao controlador PID convencional e ao controlador difuso de Mamdani foram obtidos.

Cao, Rees e Feng (2001), demonstraram matematicamente que controladores difusos são controladores universais, e portanto, capazes de estabilizar um sistema não-linear complexo. É apresentada, também a metodologia para caracterização de um controlador de Mamdani como universal.

Lu, Cheh e Ying (2001) analisaram uma estratégia preditiva difusa para um sistema simulado não-linear com tempo morto. O artigo indica resultados melhores que o GPC e PID, porém não apresenta gráficos comparativos.

Jurado e Saenz (2002), aplicaram uma estratégia neuro-difusa para um sistema de geração de energia elétrica utilizando duas fontes de energia Eólica/Diesel e gás de madeira com o objetivo de reduzir o custo com combustível. O acoplamento entre os sistemas de geração é realizado através de uma rede neuronal difusa. Foram efetuadas comparações entre controladores PID, difuso padrão e rede neuronal difusa com resultados levemente superiores para a última.

Chen, Yu e Chung (2002), realizaram a simulação de um pêndulo invertido e um sistema de equilíbrio de uma esfera em um plano inclinado móvel com controle difuso simplificado através de FSMD (*fuzzy sliding mode control*) modificado.

Aplicações interessantes em processos químicos são apresentadas por Carvalho e Durão (2002) e Polit, Estaben. e Labat (2002). Carvalho e Durão (2002), aplicaram um controlador de Mamdani para as três variáveis principais de uma coluna de flotação: fluxo de ar, fluxo de água, altura da zona de coleta. Polit, Estaben e Labat (2002), apresentam um modelo difuso para digestão anaeróbia. A partir do balanço de massa e utilizando dados da literatura, os fluxos gasosos foram calculados. A taxa de crescimento de biomassa foi multiplicada por um coeficiente difuso dependente da temperatura e pH. O modelo foi testado com dados experimentais e comparado com um modelo fenomenológico desenvolvido por Bernard *et al.* (2001).

Feng, Cao e Rees (2002), aplicaram controle difuso na simulação no ajuste de posição de um pêndulo. Poucos resultados são apresentados considerando um sistema simulado bem desenvolvido.

Liu, Pei e Guam (2002), aplicaram a atualização *on-line* de um modelo difuso através do método dos mínimos quadrados recursivo ponderado para um sistema caótico com erro máximo de $\pm 2\%$. O resultado foi comparado com três modelos conhecidos com resultados superiores, tanto no grupo de dados de ajuste como no de teste.

Zhao, Tian, Tadé e Li (2002), desenvolveram uma estratégia denominada EPFP (*Extended Pattern-based Fuzzy Predictive*) para compensação de tempo morto. A estratégia permite um balanceamento entre estabilidade e robustez. Testes simulados apresentaram bons resultados.

Cho, Park e Park (2002), aplicaram um estimador de parâmetros para um modelo de Takagi-Sugeno. Testes com uma simulação de um pêndulo invertido foram efetuados. Adicionalmente, o trabalho apresenta uma fundamentação matemática muito boa.

Patel (2002), realizou uma excelente análise sobre comportamento de controladores difusos tipo PD. Diferentes formas de inferência foram testadas. A influência do ponto de cruzamento (grau máximo de interseção) é analisada apontando para alteração no tempo de elevação e *off-set*. O trabalho apresenta uma abordagem clara e objetiva.

Rajapakse, Furuta e Kondo (2002), aplicaram aprendizado genético para ajuste, em tempo real, de um controlador difuso simples. Testes foram realizados através da simulação de um CSTR com uma reação endotérmica de primeira ordem. Uma rede neuronal com neurônios lineares e pesos não lineares foi utilizada para modelar o sistema. Trata-se de uma aplicação interessante com bons resultados, porém limitados.

Mrad e Deeb (2002), enfatizam a aplicação de controle difuso em casos onde o modelo não está disponível ou é incerto e apresentam uma proposta de mecanismo adaptativo.

Horiuchi (2002), apresenta uma revisão das aplicações de controle difuso em processos biológicos com bom levantamento bibliográfico e sistemas desenvolvidos por empresas.

Babuska, Oosterhoff, Oudshoorn e Bruijn (2002) aplicaram um controlador PI, com auto ajuste difuso, para o controle de pH em reatores com 2-15L de capacidade.

Chang e Chang (2003), desenvolveram uma estratégia para diagnóstico de falhas, baseada em lógica difusa, para sistemas em geral ou malhas de controle. Os padrões de propagação de falhas em uma malha *feedback* foram estudados e

representados na forma de regras do tipo Se-Então. Testes em um sistema de controle de nível foram realizados com resultados preliminares encorajadores.

Lin (2003), propôs um esquema de aprendizado por reforço e aplicou a teoria de estabilidade de Lyapunov para análise de robustez de um controlador difuso aplicado ao braço de um robô (simulado).

Fernández e Gutiérrez (2003), introduziram uma abordagem para configuração de sistemas de Takagi-Sugeno de ordem zero em intervalos com suavização/filtro de saída de dados utilizando splines.

Angelov (2003), desenvolveu um algoritmo para otimização evolucionária utilizando uma codificação com cromossomos reduzidos, permitindo a manipulação de um maior número de termos lingüísticos e variáveis difusas. Um modelo mais transparente que redes neuronais, polinômios, etc. pode ser obtido. O algoritmo evolucionário para identificação do modelo é apresentado e os resultados simulados de uma serpentina de resfriamento apresentaram boa concordância.

Hanai, Ohki, Honda e Kobayashi (2003), especificaram uma rede neuronal difusa para determinar as condições iniciais de produção do polibutadieno para obtenção de determinadas propriedades físico-químicas e estimar índice de polidispersividade, conversão e proporção do isômero *cis* do polímero. Algoritmos Genéticos foram utilizados para o ajuste da rede e obtido erro de 3,9%. Dados de 15 experimentos laboratoriais, utilizando o catalisador de Kaminsky, foram utilizados para treinar a rede neuronal difusa. A capacidade de aproximação da rede foi muito boa.

Van Lith, Betlem e Roffel (2003), aplicaram um modelo híbrido fenomenológico/difuso para uma coluna de destilação em batelada com bons resultados, apesar de reduzido número de experimentos.

Bouchon-Meunier, Mesiar, Marsala, e Rifqi (2003), estudaram o raciocínio dedutivo obtido através da regra composicional de inferência. Wang, Wang, e Wang (2003), também apresentaram uma contribuição teórica para lógica difusa introduzindo um novo tipo de predicado difuso.

Lee e Shin (2003) desenvolveram dois algoritmos baseados em: mínimos quadrados e híbrido mínimos quadrados/algoritmos genéticos, para aprendizado autônomo e construção de redes com funções de base difusa a partir de dados para treinamento. Estudos comparativos com algoritmos como mínimos quadrados ortogonal, backpropagation e algoritmos genéticos tradicional foram realizados mostrando melhoras nos erros de treinamento e teste.

Karr (2003), descreve uma arquitetura combinando redes neuronais, algoritmos genéticos e lógica difusa para formar um sistema de controle inteligente para manipular sistemas complexos genéricos com dinâmica lenta.

Altinten, Erdoğan, Karagöz, Hapoğlu e Alpbaz (2003), enfatizam a escassez de trabalhos práticos envolvendo processos químicos. Aplicam um sistema difuso, com otimização genética, para a reação de polimerização de Estireno em um reator de 1,1L com aquecimento elétrico. Foi obtido um bom rastreamento do perfil de temperatura (95-120° C) e ações de controle exageradas.

Vieira, Embiruçu, Sayer, Pinto e Lima (2003) apresentam exemplos de como modelos de processos podem ser inseridos em controladores, cujas variáveis controladas não podem ser medidas ou são medidas com pouca frequência.

Akkizidis, Roberts, Ridao e Batlle (2003), desenvolveram um sistema de controle difuso (PD) para um robô subaquático com 6 graus de liberdade, para comando da profundidade (plano zy) e posição (plano xy). Usaram o método de

Taguchi para reduzir o número de experimentos no ajuste do sistema. A aplicação prática constitui-se uma colaboração importante.

Spiegel, Turner e McCormick (2003), estudaram o aumento de eficiência de motores e variadores, dos pontos de vista de torque e velocidade a fim de otimizar o consumo de energia. Testes com um motor (10hp) onde um algoritmo difuso realiza a otimização do torque e velocidade a partir de funções de pertinência obtidas com algoritmos genéticos, foram realizados. Foi obtido um aumento de eficiência de 12%.

Silva e Biscaia Jr (2003), propuseram a aplicação de Algoritmos Genéticos com modificações na estratégia de ranqueamento, operadores difusos e adição de um filtro de Pareto para otimização da reação de polimerização, via radicais livres de Estireno. Trata-se de uma otimização multi-objetivo para maximizar a taxa de conversão de monômero e minimizar a quantidade final de iniciador. Várias combinações de operadores foram testadas. A partir de simulação foi definida uma condição de operação com excelente ganho de conversão (~20%).

Dubois, Prade e Sessa (2003), apresentaram uma revisão de trabalhos típicos de sistemas difusos dividida em: Livros, Artigos, Aplicações em matemática pura e aplicada, Metodologias e Engenharia.

Shieh (2002), utilizou algoritmos genéticos para determinar os conseqüentes das regras de um controlador difuso sem o conhecimento de especialista. O controlador difuso foi aplicado sobre um sistema simulado com tempo morto variável com poucos resultados.

Doyle, Lii, Harrison e Crowley (2003), estabeleceram uma estratégia de controle para distribuição do tamanho de partículas no processo, semi-batelada, de polimerização de Estireno em suspensão. Foram determinadas as trajetórias de

alimentação de surfactante e iniciador utilizando programação quadrática e mínimos quadrados parcial. Ensaios simulados apresentaram bons resultados.

Venkat, Vijaysai, e Gudi (2003), propuseram a identificação e controle de um processo contínuo de fermentação através de modelos lineares parciais para determinadas regiões, com transição difusa entre os modelos. É apresentado um desenvolvimento matemático muito bom e resultados muito bons.

Gottschalk, Nagy e Farkas (2003), aplicaram um esquema envolvendo GA e controle difuso com os objetivos de reduzir os custos de ventilação e manter a umidade em uma câmara de conservação de batatas. Vários experimentos foram realizados com resultados bem comentados.

Hsu, Chen e Tong (2003), estudaram a redução do número de regras aplicando um mecanismo de aprendizado baseado em SLMD (*sliding-mode*), Mecanismos de adaptação, identificação (*TSK fuzzy system*) e integração foram sugeridos. Dois testes simulados foram adotados com bons resultados, porém é indicada a necessidade de ensaios mais realistas.

Marseguerra e Zio (2003), esquematizaram uma abordagem baseada em controle difuso e na teoria de Lyapunov para o controle adaptativo, em um reator nuclear. O trabalho foi bem documentado, com dois estudos de caso simulados. Os resultados apresentaram *overshoot* característico de controladores tipo FKBC-PI.

Lee, Chung e Yu (2003), propuseram o uso de sistemas difusos hierárquicos para reduzir a explosão combinatória resultante do aumento no número de universos de discurso/conjuntos difusos. Consiste da separação de um sistema com mais que duas entradas em subsistemas com, duas entradas. Um algoritmo para estruturação do sistema foi proposto. A estratégia parece interessante apesar dos testes simulados serem limitados (dois testes).

Leski (2003), analisou, através de uma abordagem neuro-difusa, o paradoxo "aproximação de uma rede neuronal e informações vagas em conjuntos difusos". A imprecisão em dados de treinamento para ajuste do paradoxo foi considerada.

Muthusamy, Sung, Vlach e Ishii (2003), apresentaram uma contribuição teórica para o agendamento de tarefas em sistemas com restrições de tempo morto e de precedência. As restrições foram transformadas em quantidades difusas e consideradas no agendamento, formando um mecanismo de encadeamento difuso.

Esta visão breve sobre sistemas de controle mostra uma grande diversidade de metodologias e aplicações, porém poucas aplicações industriais são apontadas.

No próximo capítulo que segue, o projeto do controlador, o detalhamento da fase de ajuste deste, o qual normalmente é omitido, e a formação de bases de regras são apresentados.

4 PROJETO DE UM CONTROLADOR DIFUSO

Os fundamentos matemáticos de sistemas difusos estão descritos no Apêndice A e, portanto, a abordagem que segue é algorítmica e não matemática.

Um controlador difuso pode ser criado pela relação direta entre as variáveis envolvidas no problema, ou em termos do desvio entre a variável e a referência desejada (ou *set point*). Por exemplo: Considerar um controlador para uma saída de um processo, conforme a figura 1, com os conjuntos dados na figura 2.

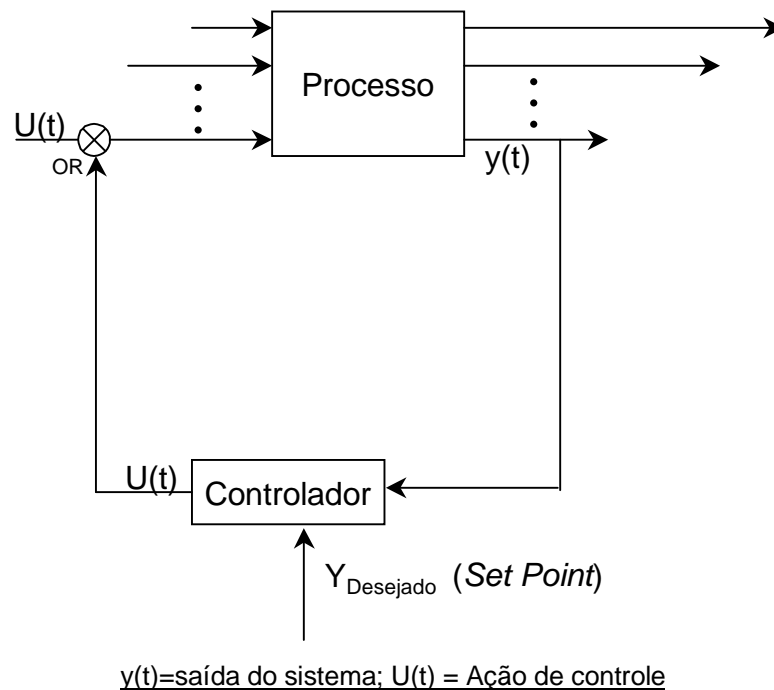
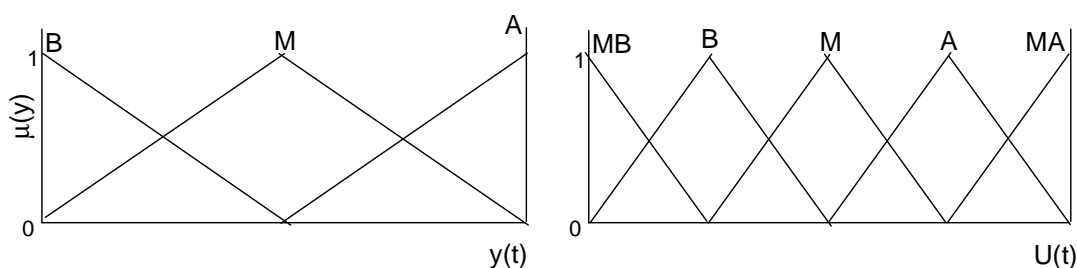


Figura 1 - Um processo simples com um controlador operando diretamente entre y(t) e U(t).



MB= Muito Baixo, B= Baixo, M= Médio, A= Alto, MA= Muito Alto

Figura 2- Dois domínios difusos $y(t)$ e $U(t)$.

Um controlador, a partir das variáveis do processo, poderia ser obtido considerando as regras na tabela 1, ou de forma mais compacta pela tabela 2.

Tabela 1 - Regras para o exemplo das figuras 1 e 2

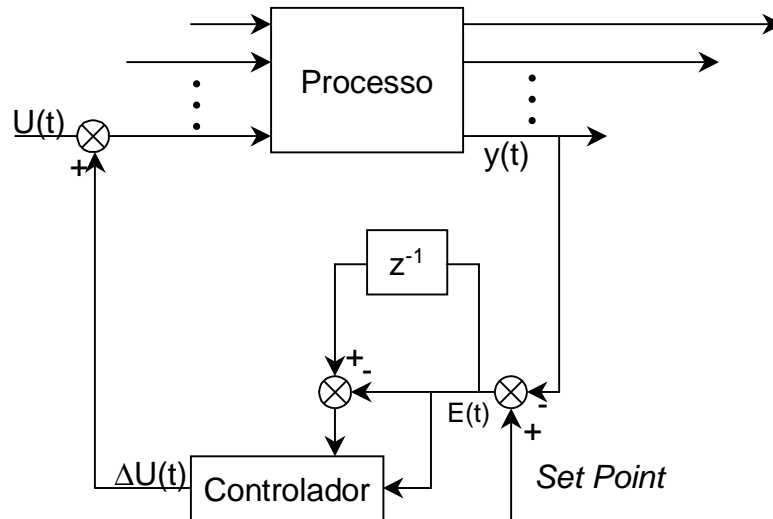
Regra	Descrição
Se $y(t)$ é B E Y_d é B Então $U(t)$ é B	Ação de controle deve ser baixa pois $y(t)$ e Y_d são aproximadamente iguais.
Se $y(t)$ é B E Y_d é M Então $U(t)$ é A	Ação de controle deve ser Alta pois $y(t)$ está próximo (abaixo) de Y_d
Se $y(t)$ é B E Y_d é A Então $U(t)$ é MA	Ação de controle deve ser Muito Alta pois $y(t)$ está muito abaixo de Y_d .
Se $y(t)$ é M E Y_d é B Então $U(t)$ é B	Ação de controle deve ser Baixa pois $y(t)$ está próximo (acima) de Y_d
Se $y(t)$ é M E Y_d é M Então $U(t)$ é M	Ação de controle deve ser Média pois $y(t)$ e Y_d aproximadamente iguais.
Se $y(t)$ é M E Y_d é A Então $U(t)$ é A	Ação de controle deve ser Alta pois $y(t)$ está próximo (abaixo) de Y_d
Se $y(t)$ é A E Y_d é B Então $U(t)$ é MB	Ação de controle deve ser Muito Baixa pois $y(t)$ está muito acima de Y_d .
Se $y(t)$ é A E Y_d é M Então $U(t)$ é B	Ação de controle deve ser Baixa pois $y(t)$ está próximo (acima) de Y_d
Se $y(t)$ é A E Y_d é A Então $U(t)$ é A	Ação de controle deve ser Alta pois $y(t)$ e Y_d aproximadamente iguais.

Tabela 2 - Forma compacta da tabela 1

		$Y_{Desejado}$		
		B	M	A
y(t)	B	B	A	MA
	M	B	M	A
	A	MB	B	A

O desempenho do controlador obtido pelas regras mostradas na tabela 2 depende do ajuste dos conjuntos para evitar o comportamento oscilatório, que ocorre quando o espaço na variável de entrada ($y(t)$) é incompatível com a dinâmica do problema ou não possui termos qualificadores suficientes ou devidamente distribuídos.

Normalmente, a lei de controle é expressa de forma incremental onde, a partir da medida do erro entre a saída do sistema e uma referência, determina-se o incremento na variável manipulada. Assim o esquema da figura 1 pode ser rescrito na forma da figura 3.



$Y(t)$ = Saída do sistema, $U(t)$ = Ação de controle, $E(t)$ = Desvio do *Set Point*.

Figura 3 - Um processo simples com um controlador operando sobre o Erro entre a saída do sistema e uma referência.

Para a figura 3, a variável controlada é o **Erro (E)** entre a saída do sistema e o *set point*, a partir da avaliação da **Varição da saída do sistema (ΔY)** ao longo do tempo. Assim, o controlador determina o incremento (ΔU) na variável manipulada. As definições de **E**, ΔY e ΔU são apresentadas nas equações (1), (2) e (3).

$$\mathbf{E}(t) = Y(t) - Y_{SP} \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{Y}(t) = Y(t) - Y(t-\Delta t); \Delta \mathbf{Y}(t) \approx \Delta \mathbf{E}(t) \text{ se } Y_{SP}(t) \approx Y_{SP}(t-\Delta t) \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{U}(t) = U(t) - U(t-\Delta t) \quad (3)$$

Considerando três termos lingüísticos (**N** = Negativo, **Z** = Aproximadamente zero e **P** = Positivo) para os domínios normalizados **E**, ΔY e ΔU , conforme a figura 4.

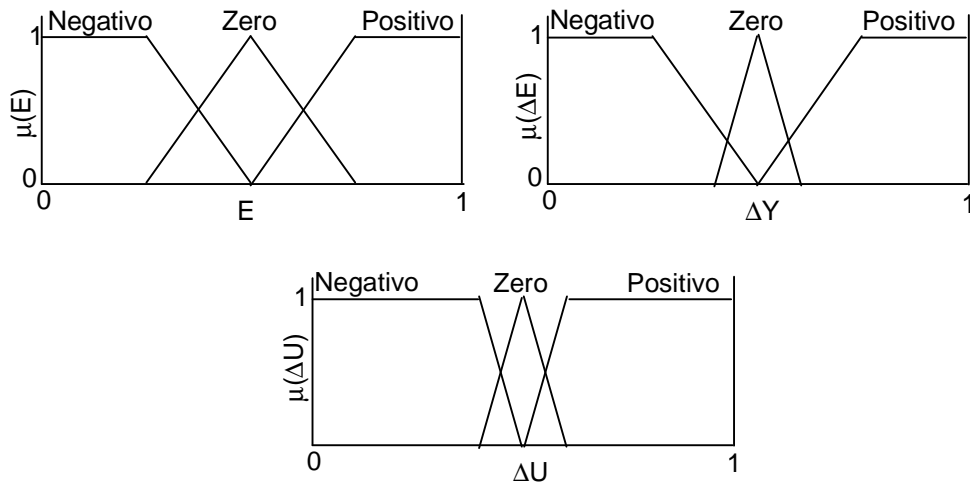


Figura 4- Termos lingüísticos para **E**, **ΔY** e **ΔU**.

Os significados dos termos mostrados na figura 4 estão descritos na tabela 3 e exemplificados na figura 5.

Tabela 3 - Interpretação de nove conceitos lingüísticos.

		E = [Y(t)-Y_{SP}]	ΔY = [Y(t) - Y(t-Δt)]	ΔU = [U(t) - U(t-Δt)]
Termos Lingüísticos	N	$Y_{SP} > Y(t)$	$Y(t) < Y(t-\Delta t)$	$U(t) < U(t-\Delta t)$
	Z	$Y_{SP} \cong Y(t)$	$Y(t) \cong Y(t-\Delta t)$	$U(t) \cong U(t-\Delta t)$
	P	$Y_{SP} < Y(t)$	$Y(t) > Y(t-\Delta t)$	$U(t) > U(t-\Delta t)$

N= Negativo; Z= aproximadamente Zero; P= Positivo

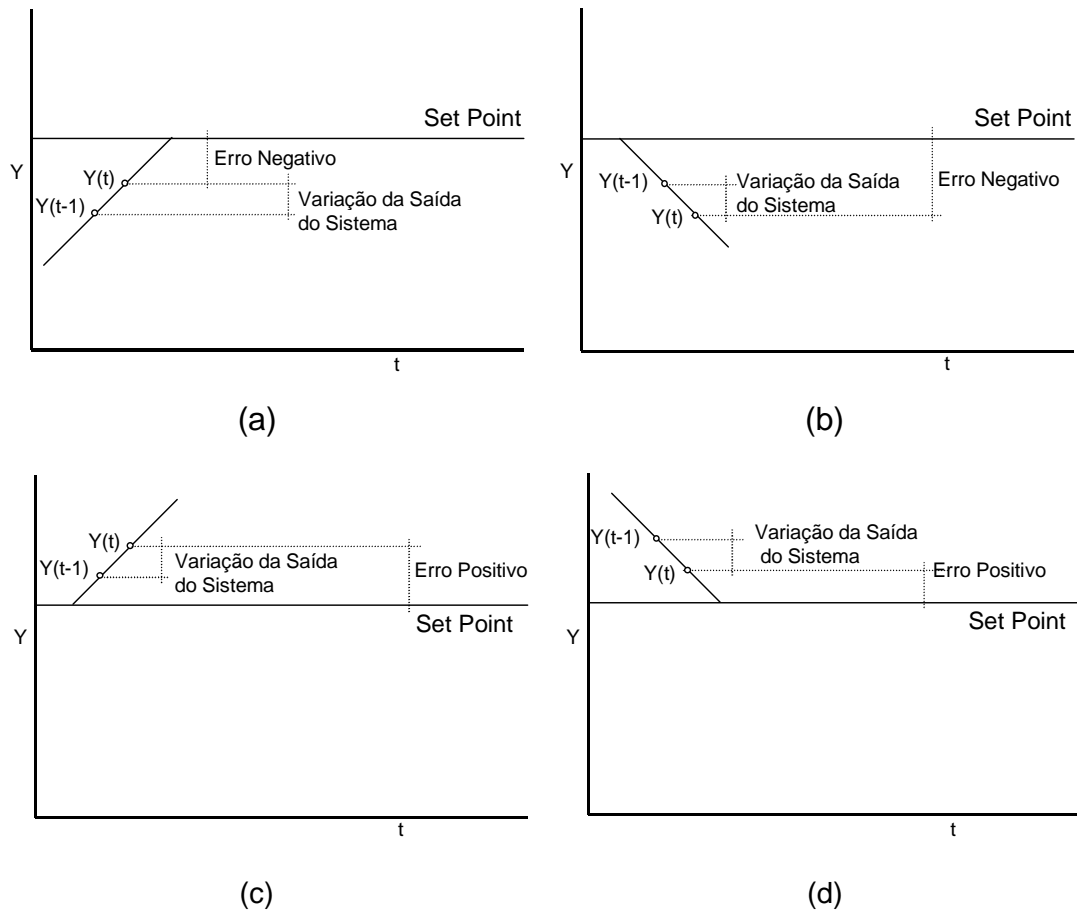


Figura 5 – Quatro eventos (entre nove) possíveis para um controlador com três universos de discurso, contendo três subconjuntos cada um.

A partir de um sistema difuso contendo três domínios (universos de discurso) com três termos cada um é possível obter um grupo de 27 regras ($3 \times 3 \times 3$), tabela 4. Porém entre estas regras, existem regras contraditórias. Por exemplo, entre as regras:

- 1) Se E é N $E \Delta Y$ é N Então ΔU é N
- 2) Se E é N $E \Delta Y$ é N Então ΔU é Z
- 3) Se E é N $E \Delta Y$ é N Então ΔU é P ,

apenas a regra 3 é válida. Assim, entre as 27 regras possíveis, tabela 4, apenas nove são válidas, tabela 5.

Tabela 4 - Vinte e Sete regras para um controlador com três universos de discurso, contendo três subconjuntos cada um.

E	ΔY	ΔU	E	ΔY	ΔU	E	ΔY	ΔU			
N	N	N	Z	N	N	P	N	N			
		Z			Z			Z			
		P			P			P			
	Z	N		Z	Z		N	P	P	Z	N
		Z					Z				Z
		P					P				P
	P	N		P	P		N	P	P	P	N
		Z					Z				Z
		P					P				P

Se E é (N_E, Z_E, P_E) e ΔY é $(N_{\Delta Y}, Z_{\Delta Y}, P_{\Delta Y})$ Então ΔU é $(N_{\Delta U}, Z_{\Delta U}, P_{\Delta U})$

Tabela 5 – Nove regras válidas para um controlador com três universos de discurso, contendo três subconjuntos cada um.

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)		
		N	Z	P
Erro (E)	N	P	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

Variação da Ação de Controle (ΔU)		

A interpretação para as regras apresentadas na tabela 5 está detalhada na tabela 6.

Tabela 6 – Interpretação das regras válidas para um controlador simples.

E	ΔY	Interpretação
N	N	$Y_{SP} > Y(t)$ e $Y(t) < Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema é inferior ao <i>set point</i> e está em declínio. Incrementar ação de controle (variação da ação de controle = Positiva).
Z		$Y(t) \cong Y_{SP}$ e $Y(t) < Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema satisfaz o <i>set point</i> e está em declínio. Incrementar ação de controle (variação da ação de controle = Positiva)
P		$Y_{SP} < Y(t)$ e $Y(t) < Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema é maior que o <i>set point</i> e está em declínio. Aguardar o próximo intervalo de amostragem para decidir a ação de controle (variação da ação de controle = Zero).
N	Z	$Y_{SP} > Y(t)$ e $Y(t) \cong Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema é inferior ao <i>set point</i> e está praticamente constante. Incrementar ação de controle (variação da ação de controle = Positiva).
Z		$Y(t) \cong Y_{SP}$ e $Y(t) \cong Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema satisfaz o <i>set point</i> e está praticamente constante. Aguardar o próximo intervalo de amostragem para decidir a ação de controle (variação da ação de controle = Zero).
P		$Y_{SP} < Y(t)$ e $Y(t) \cong Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema é maior que o <i>set point</i> e está praticamente constante. Decrementar ação de controle (variação da ação de controle = Negativa).
N	P	$Y_{SP} > Y(t)$ e $Y(t) > Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema é inferior ao <i>set point</i> e está em ascensão. Aguardar o próximo intervalo de amostragem para decidir a ação de controle (variação da ação de controle = Zero).
Z		$Y(t) \cong Y_{SP}$ e $Y(t) > Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema satisfaz o <i>set point</i> e está em ascensão. Decrementar ação de controle (variação da ação de controle = Negativa).
P		$Y_{SP} < Y(t)$ e $Y(t) > Y(t-\Delta t)$ = Saída do sistema é maior que o <i>set point</i> e está em ascensão. Decrementar ação de controle (variação da ação de controle = Negativa).

Para sistemas difusos, o aumento do número de termos qualificadores em cada universo de discurso possibilita maior flexibilidade, porém dificulta o ajuste manual destes e aumenta, proporcionalmente, o número de regras. Para os domínios **E**, ΔY e ΔU , o significado de cinco possíveis termos: “Muito Negativo” (MN), Negativo (N), “Aproximadamente Zero” (Z), Positivo (P) e “Muito Positivo” (MP) estão descritos nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Interpretação de quinze conceitos lingüísticos.

	$E = [Y_{SP} - Y(t-\Delta t)]$	$\Delta Y = [Y(t) - Y(t-\Delta t)]$	$\Delta U = [U(t) - U(t-\Delta t)]$
MN	$Y_{SP} \gg Y(t-\Delta t)$	$Y(t) \ll Y(t-\Delta t)$	$U(t) \ll U(t-\Delta t)$
N	$Y_{SP} > Y(t-\Delta t)$	$Y(t) < Y(t-\Delta t)$	$U(t) < U(t-\Delta t)$
Z	$Y_{SP} \cong Y(t-\Delta t)$	$Y(t) \cong Y(t-\Delta t)$	$U(t) \cong U(t-\Delta t)$
P	$Y_{SP} < Y(t-\Delta t)$	$Y(t) > Y(t-\Delta t)$	$U(t) > U(t-\Delta t)$
MP	$Y_{SP} \ll Y(t-\Delta t)$	$Y(t) \gg Y(t-\Delta t)$	$U(t) \gg U(t-\Delta t)$

MN= Mais Negativo; N= Negativo; Z= aproximadamente Zero; P= Positivo; MP= Mais Positivo

Para um sistema com três domínios contendo cinco termos cada um, cento e vinte e cinco regras podem ser obtidas (tabela 9) porém apenas 25 regras, tabela 10, são válidas.

Tabela 8 – Vinte e Cinco eventos possíveis para um controlador com três universos de discurso, contendo cinco subconjuntos cada um.

Variação da Saída do Sistema (ΔY)					
Erro (E)	MN	N	Z	P	MP
MN					
N					
Z					
P					
MP					

Tabela 9 - Cento e Vinte e Cinco regras para um controlador com três universos de discurso, contendo cinco subconjuntos cada um.

E	ΔY	ΔU	E	ΔY	ΔU	E	ΔY	ΔU	E	ΔY	ΔU	E	ΔY	ΔU				
MN	MN	MN	N	MN	MN	Z	MN	MN	P	MN	MN	MP	MN	MN				
		N			N			N			N			N				
		Z			Z			Z			Z			Z				
		P						P						P				
		MP			MP			MP			MP			MP				
	N	MN		N	N		MN	Z		N	MN		P	N	MN	MP	N	MN
		N					N				N				N			N
		Z					Z				Z				Z			Z
		P					P				P				P			P
		MP					MP				MP				MP			MP
	Z	MN		Z	Z		MN	Z		Z	MN		P	Z	MN	MP	Z	MN
		N					N				N				N			N
		Z					Z				Z				Z			Z
		P					P				P				P			P
		MP					MP				MP				MP			MP
	P	MN		P	P		MN	Z		P	MN		MP	P	MN	MP	P	MN
		N					N				N				N			N
		Z					Z				Z				Z			Z
		P					P				P				P			P
		MP					MP				MP				MP			MP
MP	MN	MP	MP	MN	Z	MP	MN	MP	MP	MN	MP	Z	MN					
	N			N			N			N			N					
	Z			Z			Z			Z			Z					
	P			P			P			P			P					
	MP			MP			MP			MP			MP					

Se E é $(MN_E, N_E, Z_E, P_E, MP_E)$ e ΔY é $(MN_{\Delta Y}, N_{\Delta Y}, Z_{\Delta Y}, P_{\Delta Y}, MP_{\Delta Y})$ Então ΔU é $(MP_{\Delta U}, N_{\Delta U}, Z_{\Delta U}, P_{\Delta U}, MP_{\Delta U})$

Tabela 10 – Vinte e Cinco regras válidas para um controlador com três universos de discurso, contendo cinco subconjuntos cada um.

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)				
		MN	N	Z	P	MP
Erro (E)	MN	MP	MP	P	P	Z
	N	MP	P	P	Z	N
	Z	P	P	Z	N	N
	P	P	Z	N	N	MN
	MP	Z	N	N	MN	MN

Variação da Ação de Controle (ΔU)				
---	--	--	--	--

Com base nestas regras, o esquema da figura 6 pode ser utilizado para formar um controlador.

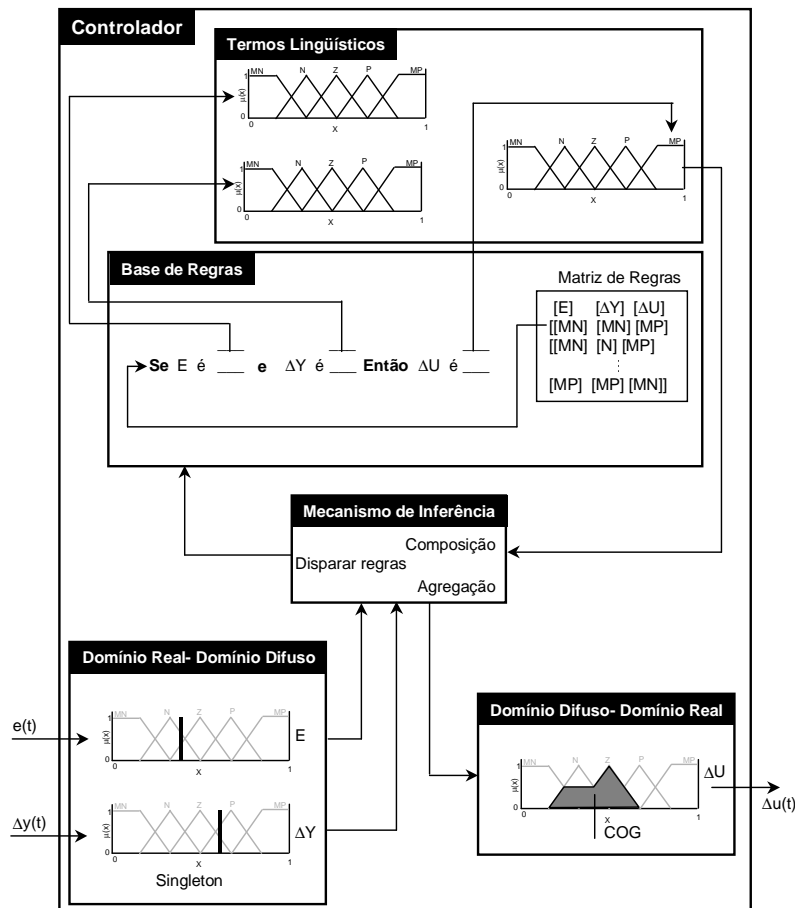


Figura 6 - Um controlador baseado em medidas do Erro e Variação da Saída do Sistema.

4.1 Controle difuso de temperatura para sistemas de processamento em batelada

O controle de temperatura de processos em batelada requer a manipulação de fontes de aquecimento e resfriamento, portanto uma estratégia deve ser definida para a manipulação destas. Neste caso as fontes de aquecimento e resfriamento são providas por correntes de vapor e água fria. Duas abordagens podem ser adotadas: manipulações do tipo *split-range* e independente. Na manipulação do tipo *split-range* (controle dividido), apenas um controlador é requerido, assim determina-se o sinal para uma das variáveis manipuladas, comumente aquela com ação direta, e a outra é alterada no sentido contrário e em igual proporção. Assim para um sinal S enviado à variável 1, envia-se um sinal $S_{max}-S$ à variável 2. A figura 7 exemplifica esta operação.

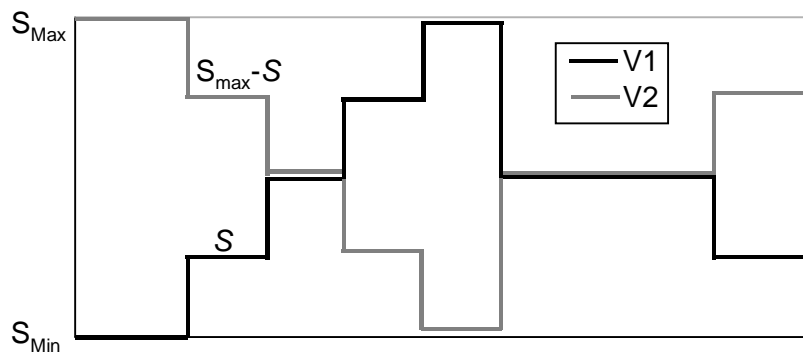


Figura 7 - Manipulação *Split-range*.

A manipulação de duas variáveis com o esquema *Split-range* é interessante pois requer menor esforço computacional e de implementação do controlador, porém é muito restritiva, pois obriga ações contraditórias na região intermediária das ações de controle. Ou seja, aquecimento e resfriamento simultâneos.

Neste trabalho, a manipulação das correntes quente e fria foi realizada através de dois controladores independentes, com uma base de regras padrão e uma específica. O controlador para manipulação da corrente quente, que está relacionado diretamente com a variável controlada (temperatura), pode aplicar diretamente as regras da tabela 10, porém o controlador para a corrente de resfriamento deve responder inversamente à variável controlada. Para isto, as regras da tabela 11 foram escritas.

Tabela 11 - Regras para o controlador da corrente de resfriamento.

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)				
		MN	N	Z	P	MP
Erro (E)	MN	MN	MN	N	N	Z
	N	MN	N	N	Z	P
	Z	N	N	Z	P	P
	P	N	Z	P	P	MP
	MP	Z	P	P	MP	MP

Variação da Ação de Controle (ΔU_2)				

As bases de regras apresentadas nas tabelas 10 e 11 constituem 50 regras e podem ser agrupadas em uma única base com regras do tipo Se E é E' e ΔY é $\Delta Y'$ então ΔU_1 é $\Delta U_1'$ e ΔU_2 é $\Delta U_2'$ com 25 regras. Porém, do ponto de vista da implementação, bases separadas são mais simples de serem mantidas.

Na tabela 16, as regras:

Se E é N e ΔY é P então ΔU é Z ,

Se E é N e ΔY é MP então ΔU é N ,

Se E é P e ΔY é N então ΔU é Z e

Se E é P e ΔY é MN então ΔU é P

atuam "antecipadamente" à ocorrência de sobrelevação. No entanto, esta atuação somente será efetiva se os conjuntos difusos Erro Negativo/Positivo e Variação da saída do sistema Positiva/Muito Positiva/Negativa/Muito Negativa estiverem devidamente posicionados sobre os domínios dos universos de discurso. Ou seja, os conjuntos devem ser ajustados tanto no suporte quanto na posição para que estas regras sejam disparadas no instante correto.

Conforme será apresentado a seguir, a adoção de 5 termos lingüísticos para qualificar as entradas e as saídas do controlador restringe algumas manipulações durante o ajuste. O aumento do número de termos lingüísticos resolve esta limitação. A figura 8, apresenta 11 termos lingüísticos (normalizados no intervalo $[-1;+1]$) para qualificar **E**, ΔY e ΔU .

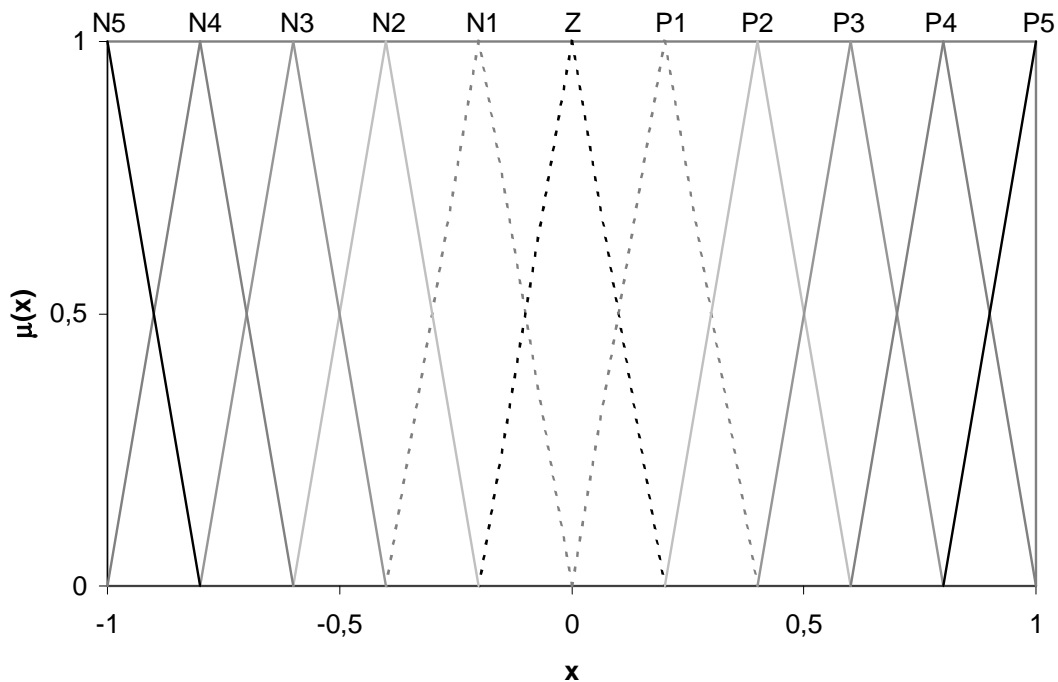


Figura 8 - 11 termos lingüísticos igualmente espaçados para **E**, ΔY e ΔU .

Os conjuntos mostrados na figura 8, quando aplicados para os devidos universos de discurso, resultam em 1331 regras para cada controlador (2662 ao todo) e, entre estas, 121 não são contraditórias e portanto podem ser aplicadas. As tabelas 12 e 13 apresentam as regras para os controladores das correntes quente e fria, respectivamente. Estas regras são conhecidas como grupo padrão de regras.

Tabela 12 - Regras envolvendo 11 termos lingüísticos para o controlador da corrente quente

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)										
		N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
Erro (E)	N5	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z
	N4	P5	P5	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1
	N3	P5	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2
	N2	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3
	N1	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4
	Z	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5
	P1	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5
	P2	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5
	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5	N5
	P4	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5	N5	N5
	P5	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5	N5	N5	N5

Tabela 13 - Regras envolvendo 11 termos lingüísticos para o controlador da corrente fria

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)										
		N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
Erro (E)	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z
	N4	N5	N5	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1
	N3	N5	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2
	N2	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3
	N1	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4
	Z	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
	P1	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5
	P2	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5
	P3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5
	P4	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5	P5
	P5	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5	P5	P5

4.1.1 Ajuste dos conjuntos difusos

É difícil estabelecer regras precisas para atuar em sistemas com tempo morto e com medidas que contém ruído. Desta forma, o ajuste fino dos conjuntos ganha maior importância, constituindo-se na fase mais delicada da implantação de um sistema difuso. Os ajustes podem ser realizados com base na experiência de operação do processo e com o conhecimento da dinâmica deste. Entretanto, o ajuste fino configura-se como um método de Tentativa-Erro. Mazzucco et al. (2000) aplicaram algoritmos genéticos para o ajuste do suporte de conjuntos difusos em um problema linear, aproximado como um sistema de primeira ordem com tempo morto. Excelentes resultados foram obtidos, porém a aplicação está limitada ao modelo do sistema.

É possível utilizar a experiência da operação manual. Por exemplo:

- Não abrir demasiadamente a válvula de aquecimento (V2, figura 24), em pequenas transições de temperatura, para evitar sobrelevação;
- Fechar, lentamente, a válvula de aquecimento antes da temperatura desejada ser atingida;
- Acionar a válvula de resfriamento (V4, figura 24) somente para corrigir ou aumento ou decréscimo rápido e indesejado da temperatura.

Com estas considerações, pode-se realizar os primeiros ajustes nos domínios das variáveis utilizadas no controlador. O ajuste é iniciado pela determinação dos limites para **Erro**, **Variação da saída do sistema** e **Variações nas ações de controle**:

I) Para Erro:

Como a temperatura do sistema pode variar entre 20° C e 120° C o erro máximo, definido na equação (1), que pode ocorrer é de 100° C, quando a temperatura é 20° C e o *setpoint* é 120° C. O erro mínimo, por sua vez, pode ser de até -100° C quando a temperatura for 120° C e o *setpoint* 20° C. Casos,

como o processo de polimerização utilizado, onde não é requerida uma transição de temperatura de 100° C, mas sim transições de aproximadamente 10° C o domínio pode ser revisto.

II) Para a variação da saída do sistema:

A variação da saída do sistema, equação (2), representa as variações da temperatura ao longo do tempo. Através da resposta do sistema (figuras 9 e 10) é possível determinar a magnitude da variação da temperatura (figura 11). Devido a presença de ruído nas medidas, a determinação exata da magnitude desta torna-se difícil. A aplicação da média móvel (figura 11) pode auxiliar a determinação destes valores. Neste caso a média móvel foi calculada utilizando um período de dez amostras. A máxima variação de temperatura durante aquecimento (limitação física do sistema) entre dois intervalos de amostragem é de 3° C. Durante o resfriamento a máxima variação de temperatura é de -1,5° C. Assim, este domínio está limitado a [-1,5 ; +3° C]. Para reduzir a complexidade do controlador, devido ao uso de conhecimento na estruturação deste, os valores máximos serão adotados ([-3 ; +3° C]).

III) Para a Variação da Ação de Controle:

As variações nas ações de controle, equação (3), definem as alterações de abertura impostas às válvulas. A limitação física confere variações percentuais no intervalo [-100 ; 100]. Porém em sistemas com tempo morto, a experiência de operação indica que grandes variações nas ações podem produzir resultados inesperados, pois quanto maior o tempo de resposta maior será a dificuldade de reparar ações indevidas (através do ajuste manual) podendo ocorrer sobrelevações e oscilações. Desta forma um ajuste neste domínio será necessário.

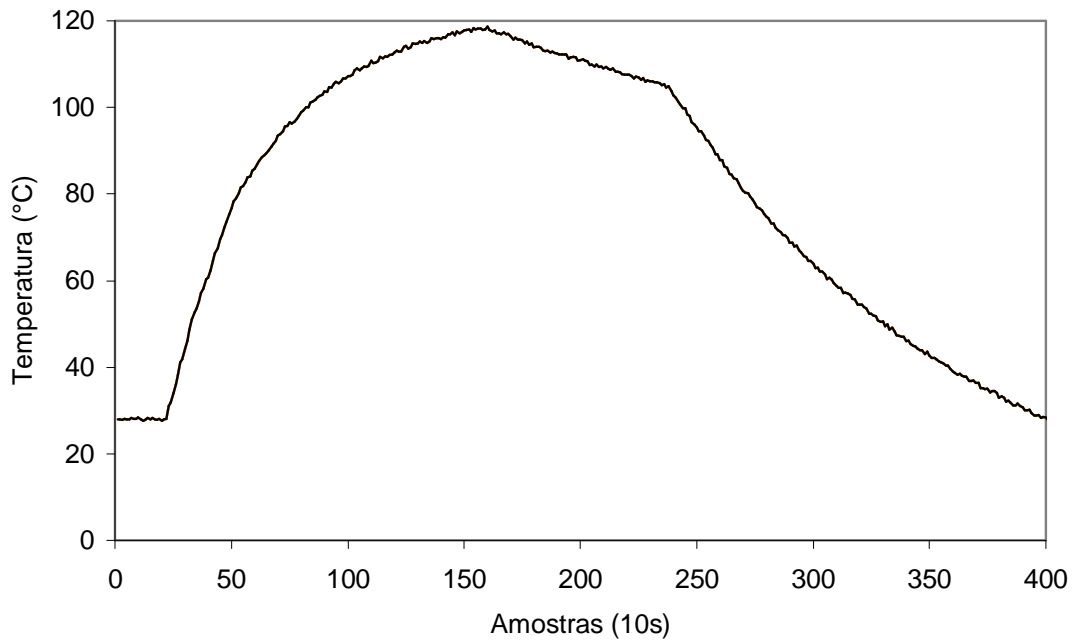
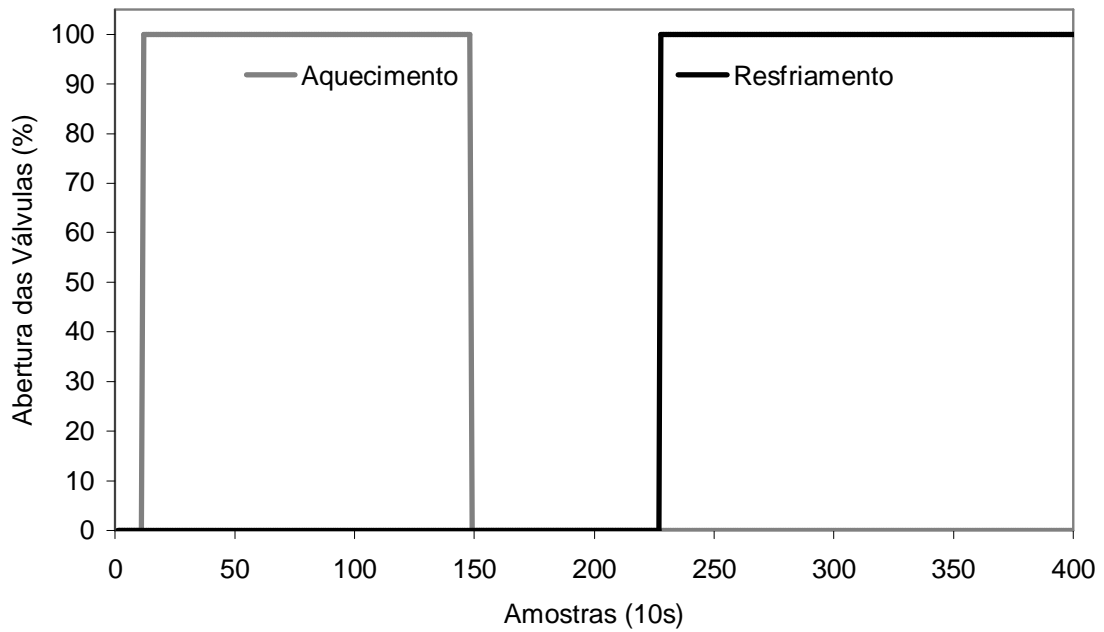
Figura 9 –Temperatura x tempo ($\Delta U=100\%$)

Figura 10 –Abertura das válvulas de aquecimento e resfriamento.

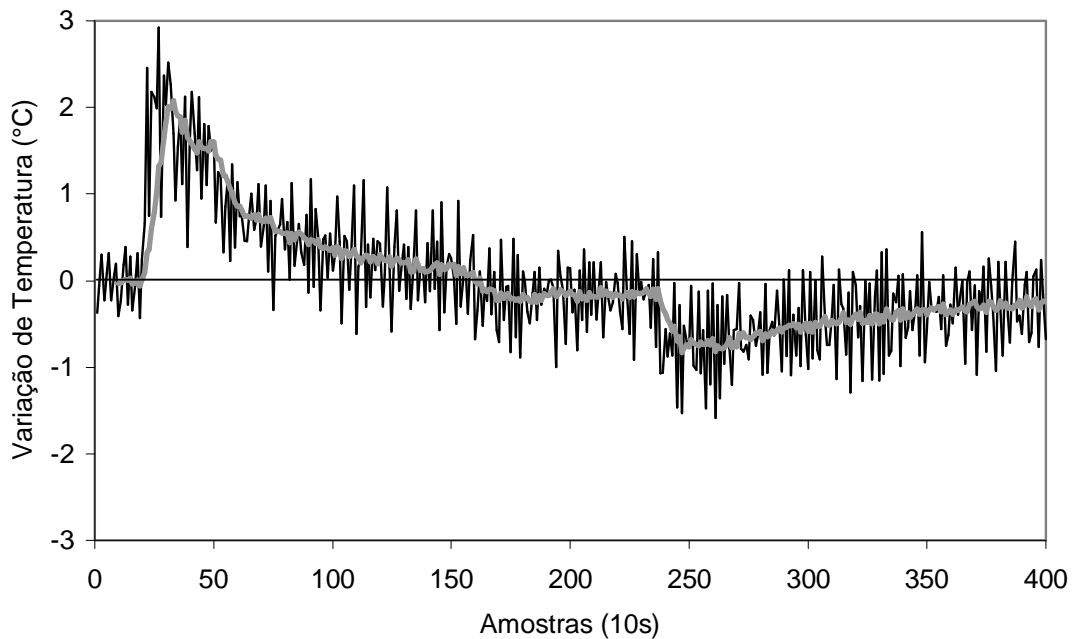


Figura 11 – Variação de Temperatura durante aquecimento e resfriamento.

Definidos os domínios dos universos de discurso, o ajuste pode ser efetuado de forma puntual, ou seja através da alteração dos parâmetros dos centros e bases dos conjuntos difusos, além do formato destes (Triângulo, Trapézio, Gaussiana, etc.). Esta forma de ajuste é a mais fina que pode ser realizada. Contudo, em um sistema baseado, exclusivamente, em conhecimento, esta abordagem é excessivamente complexa. Somente para os conjuntos difusos (neste caso 11 conjuntos por universo de discurso) deveriam ser ajustados 99 parâmetros. Assim, este trabalho propõe a definição de:

- I) Técnicas globais de ajuste;
- II) Técnicas conjuntas de ajuste e
- III) Técnicas de ajuste em nível de sistema.

Definem-se técnicas globais, aquelas que alteram o contexto global dos conjuntos, como os "parâmetros de deslocamento" e os "fatores de escala".

Definem-se como técnicas conjuntas aquelas que alteram os conjuntos de forma proporcional no intervalo do universo de discurso (Sobreposição dos conjuntos, Razão de distribuição).

Definem-se técnicas de ajuste em nível de sistema aquelas que alteram as operações difusas (Entrada Difusa, Grau de ativação mínimo das regras, Operadores difusos).

De forma sucinta: as técnicas globais operam sobre o universo de discurso, as técnicas conjuntas operam sobre os conjuntos difusos e os ajustes em nível de sistema operam sobre o comportamento matemático deste.

4.1.1.1 Fator de Escala

A implementação, em *hardware*, de controladores difusos requer equacionamento simples e genérico. Para tanto, a implementação é realizada em intervalo normalizado (normalmente entre -1 e $+1$) o que torna necessário o uso dos fatores de escala para adequar as entradas e saídas do controlador às ordens de grandeza reais do problema. O fator de escala constitui-se na divisão das entradas do controlador por uma constante (constantes ou função no caso adaptativo). No caso de um desvio entre um valor de referência e a saída do sistema (Erro) possuir uma magnitude de 100 unidades o fator de escala será 100. Para implementação em *software*, o fator de escala é um multiplicador do universo de discurso normalizado que altera as coordenadas deste para as coordenadas reais do sistema. A multiplicação dos conjuntos na figura 8 pelo fator de escala 100 resulta na figura 12.

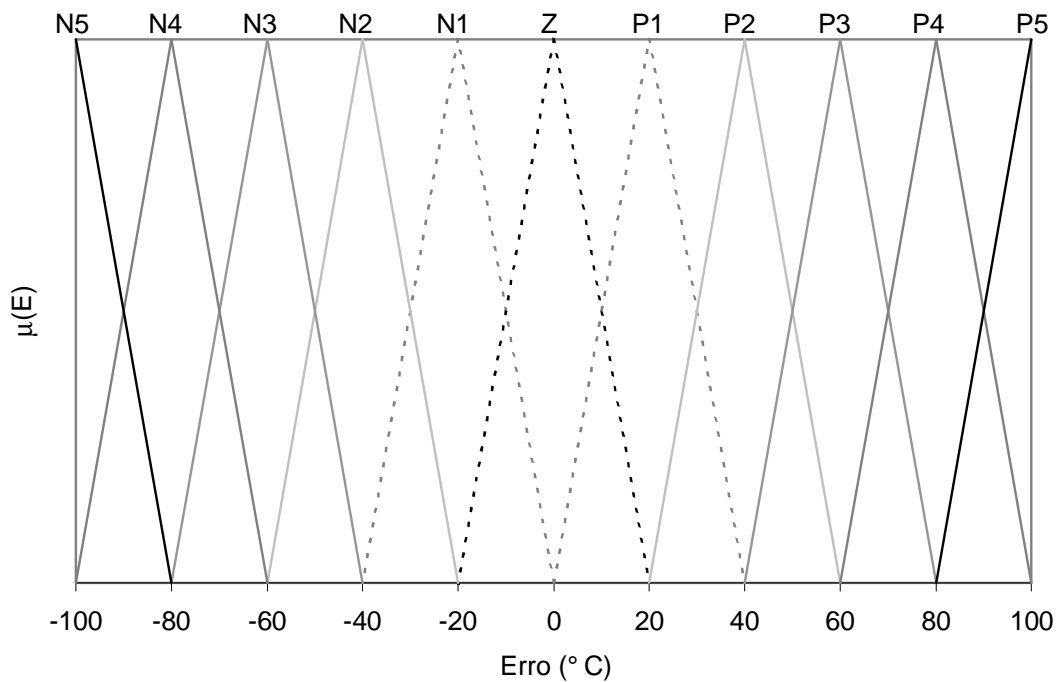
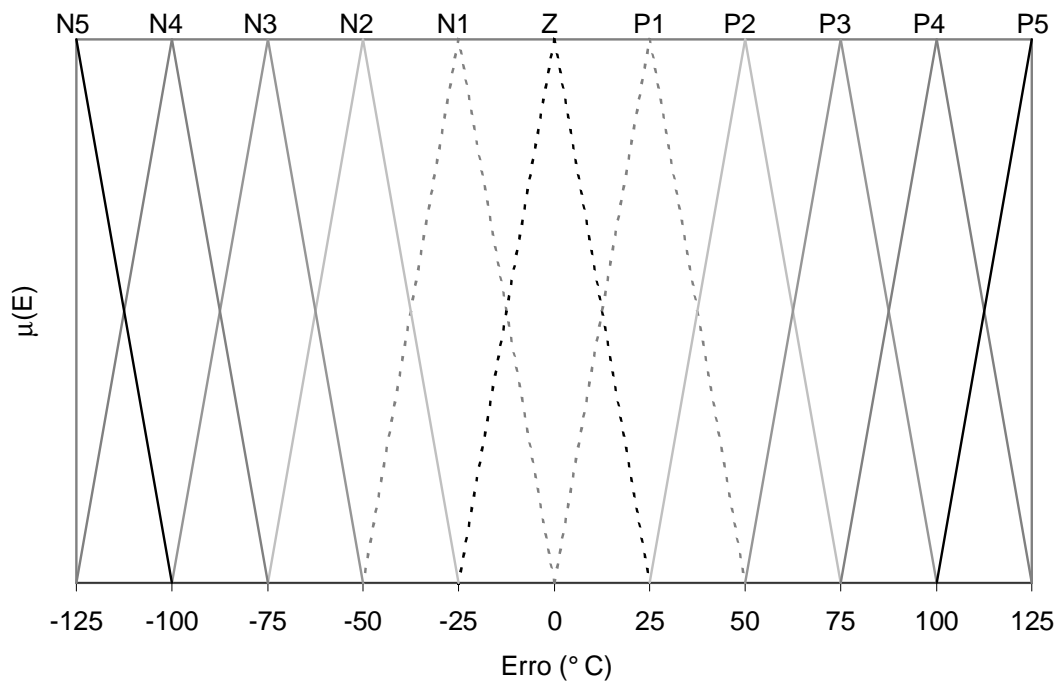
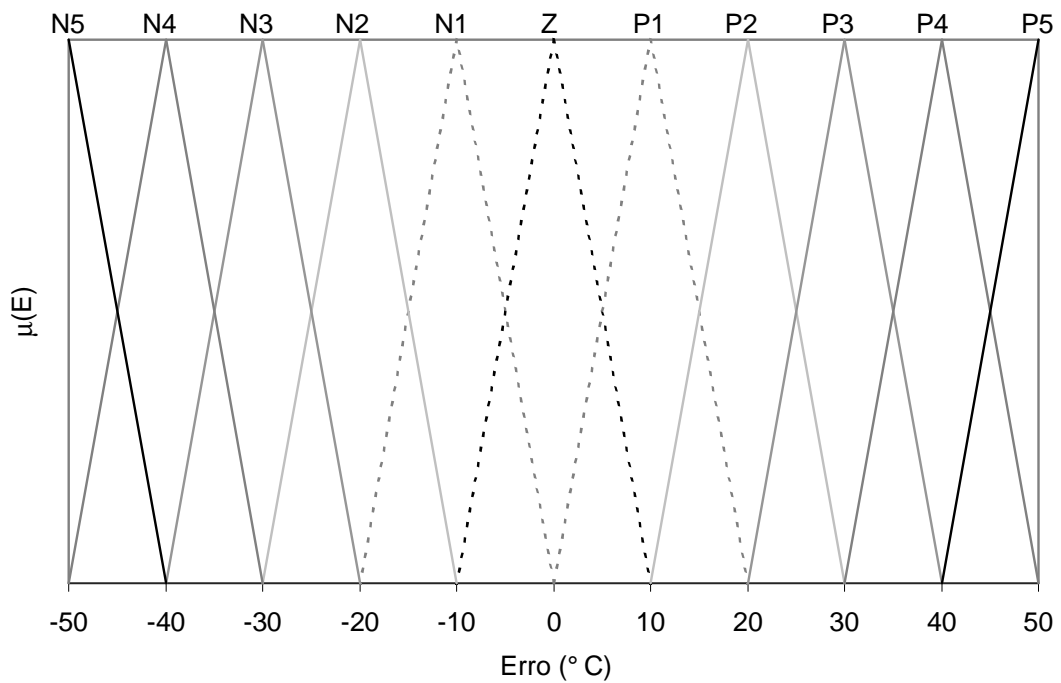


Figura 12 – 11 termos linguísticos para **E** (fator de escala 100)

O uso do fator de escala maior que o requerido para o escalonamento do universo de discurso, resulta na alteração do significado da base de regras. Por exemplo: com um fator de escala para Erro igual a 125, o valor máximo de erro (100°C) passa a ser classificado como P4 ao invés de P5, como pode ser observado na figura 13. Isto implica na exclusão das regras que envolvem $E=P5$ e $E=N5$ (tabelas 12 e 13), desde que estas nunca serão ativadas. A adoção de um fator de escala menor que o requerido, no escalonamento, resulta no deslocamento da base de regras do controlador e alteração da sensibilidade deste. Observando as figuras 12 e 14, torna-se evidente que enquanto $E=40$ é classificado como P2 quando o fator de escala é 100, esta classificação é alterada para P5 quando o fator de escala é 50. Analisando as tabelas 12 e 13, se $E=50^{\circ}\text{C}$ é considerado P5, pois 50°C é o maior valor de E classificado, as ações da última linha nestas tabelas serão aplicadas a partir de $E=50^{\circ}\text{C}$ ao invés de $E=100^{\circ}\text{C}$ (no caso do fator de escala 100).

Figura 13 – Aumento do fator de escala (125) para **E**Figura 14 – Redução do fator de escala (50) para **E**

Para a variação da ação de controle, a adoção de um fator de escala maior que o real implica em um aumento de ganho do controlador. Na figura 15, está representado o universo de discurso ΔU escalonado para o intervalo $[-100\%, +100\%]$. Na aplicação de um fator de escala igual a 166,67; a ação de controle equivalente a 100%, cuja classificação é P5, passa a ser classificada como P3 (figura 16). Como ocorre a saturação do elemento de controle com $\Delta U=+100\%$ e $\Delta U=-100\%$, todas as regras que envolvem $\Delta U=P4$, $\Delta U=P5$, $\Delta U=N4$ e $\Delta U=N5$ passam a atuar como $\Delta U=P3$ e $\Delta U=N3$. De forma semelhante, a classificação de $\Delta U=P1$, na figura 15, que ocorre com grau 1 para $\Delta U=20\%$ é alterada para $\Delta U=33,34\%$ na figura 16, resultando em um aumento de 66,67% no ganho do controlador.

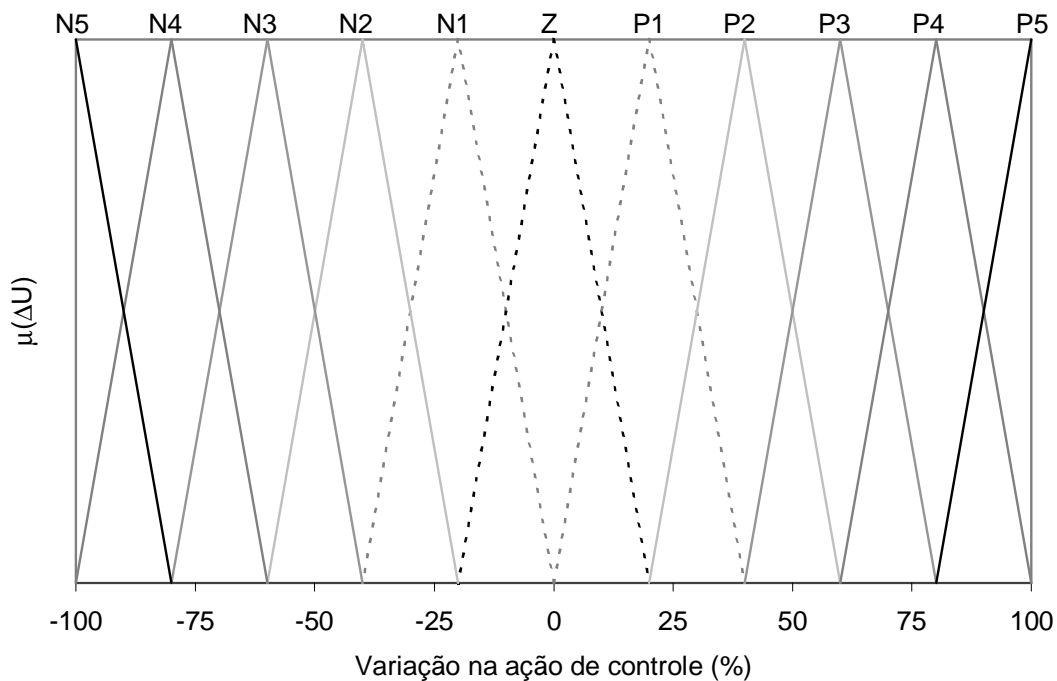


Figura 15 – 11 termos linguísticos para ΔU com fator de escala 100.

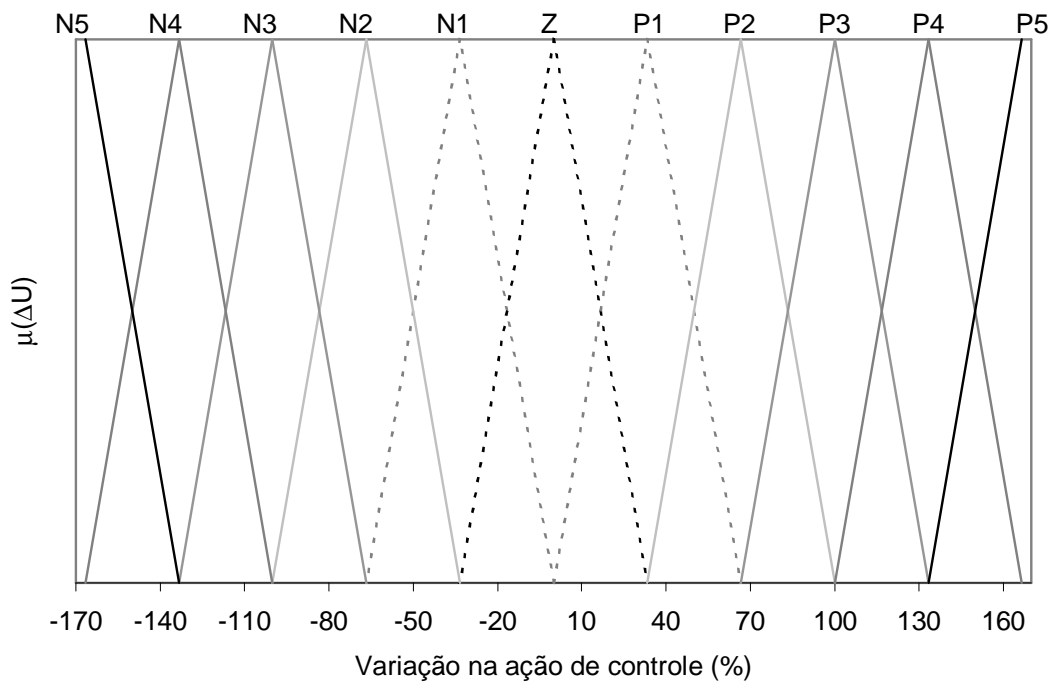


Figura 16 – Aumento do fator de escala (100) para ΔU

A determinação da magnitude de ΔU deve considerar os aspectos dinâmicos do sistema a ser controlado e a base de regras adotada. Considere-se o caso de um sistema térmico com tempo morto igual a 10 intervalos de amostragem. Se a saída do sistema avança em direção à referência com uma velocidade máxima $\Delta Y = 3^\circ \text{C}/\text{amostra}$, em 10 intervalos de amostragem uma variação de temperatura, máxima, de 30°C será obtida. Como qualquer ação somente manifesta sua resposta após o tempo morto, se não for possível uma ação contrária que altere a velocidade para $\Delta Y = -3^\circ \text{C}/\text{amostra}$, o sistema será sujeito a sobrelevação para uma transição menor que $Y(t) - \text{SetPoint} = 30^\circ \text{C}$. Desta forma o fator de escala para ΔU constitui-se no parâmetro mais difícil de ser ajustado.

É importante observar que, embora os parâmetros de escala possam ser utilizados como parâmetros de ajuste, devem ser resguardados os limites físicos do sistema para o escalonamento, evitando o uso destes como parâmetros ajustáveis e mantendo a correlação com o significado físico das variáveis de entrada e saída do controlador.

4.1.1.2 Parâmetros de Deslocamento

Para manter o significado físico das escalas adotadas para os universos de discurso (E , ΔE , ΔU), introduz-se os parâmetros de deslocamento, os quais são multiplicadores sobre as entradas do controlador difuso escalonado de forma a deslocar os centros de ativação na base de regras. Para valores limites, maiores que um e menores que zero, estes parâmetros podem, inclusive, eliminar parte da base de regras por, ou subvalorizar excessivamente as entradas ou supervalorizá-las gerando a saturação das entradas, da mesma forma que os fatores de escala.

A alteração da base de regras pode ser realizada através de parâmetros de deslocamento (λ_E , $\lambda_{\Delta Y}$) aplicados conforme as equações (4) e (5). Quando estes parâmetros estão entre 0 e 1 as regras são deslocadas para o centro da figura 17. Para valores maiores que 1 a ativação das regras é deslocada para as laterais desta.

$$\mathbf{E}(t) = \lambda_E(Y(t) - Y_{SP}) \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{Y}(t) = \lambda_{\Delta Y}(Y(t) - Y(t - \Delta t)) \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{U}(t) = \lambda_{\Delta U}(\Delta U^*(t)); \Delta U^*(t) = \text{valor inferido pelo controlador} \quad (6)$$

A figura 17 mostra a influência dos parâmetros de deslocamento sobre a base de regras para o controlador da corrente quente (válvula de aquecimento). Em essência, os parâmetros de deslocamento possuem o mesmo efeito dos fatores de escala, porém mais intuitivos que estes.

ΔY E	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
N5	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z
N4	P5	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2
N3	P5	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2
N2	P5	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3
N1	P5	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4
Z	P5	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5
P1	P4	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5
P2	P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5
P3	P2	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5	N5
P4	P1	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5	N5	N5
P5	Z	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N5	N5	N5	N5

Figura 17 - Alterações nos parâmetros de deslocamento (λ_E , $\lambda_{\Delta Y}$).

4.1.1.3 Sobreposição dos conjuntos

Para conjuntos difusos simétricos e igualmente espaçados, o grau de interseção ou sobreposição máximo é de 0,5. Isto significa que para compor informações intermediárias (novas) os conjuntos atuam com graus complementares ([0,5;0,5], [0,2;0,8], [0,8;0,2], [1;0], [0;1], etc.). O aumento do grau máximo de sobreposição reflete a semelhança entre os significados dos conjuntos, enquanto a redução reflete a discrepância destes. Trata-se de um parâmetro difícil de ser analisado e, portanto, pouco manipulado.

4.1.1.4 Razão de distribuição

É importante definir a distribuição dos conjuntos sobre o domínio do universo de discurso. Os conjuntos apresentados nas figuras 8, 12 e 15 são simétricos e igualmente distribuídos sobre os universos de discurso. Alternativamente, poderiam estar mais concentrados em torno do centro do universo de discurso ou das extremidades deste. Porém, para alterar a disposição dos conjuntos sobre o domínio difuso é necessário alterar individualmente os parâmetros de todos os conjuntos, 99 ao todo. Desta forma, neste trabalho é sugerido um algoritmo para alterar a

disposição dos conjuntos difusos no domínio do universo de discurso. O algoritmo, baseado em conjuntos difusos triangulares, segue:

algoritmo alterar_disposição_dos_conjuntos

início

```

<Determinar o domínio do Universo de Discurso>
<Determinar o número de conjuntos difusos para o Universo de Discurso>
<Estabelecer o conjunto difuso central do Universo de Discurso>
<Determinar as coordenadas dos máximos graus de pertinência dos...
...conjuntos através de:
    centro_conjunto =1
    Assumir uma razão de deslocamento (R)
    <Para cada conjunto difuso fazer:
        <centro_conjunto= centro_conjunto *R>
    >
    <Rescalar os centros para o domínio do Universo de Discurso determinado>
>
<Determinar as coordenadas dos mínimos graus de pertinência dos...
...conjuntos (base) através de:
    <Para cada conjunto difuso fazer:
        <Grau mínimo a esquerda do centro do conjunto difuso= centro do...
        ... conjunto difuso a esquerda >
        <Grau mínimo a direita do centro do conjunto difuso= centro do conjunto ...
        ...difuso a direita>
    >
>
fim

```

Este algoritmo, após o refinamento, produz uma distribuição simétrica dos conjuntos para uma razão de distribuição $R=1$. Para valores de razão de distribuição entre 0 e 1, os conjuntos são concentrados nas extremidades do universo de discurso. Para valores de razão de distribuição maiores que 1, os conjuntos são concentrados no centro do universo de discurso. As figuras 18 e 19 apresentam os conjuntos difusos obtidos para valores de razão de distribuição 0,5 e 1,5.

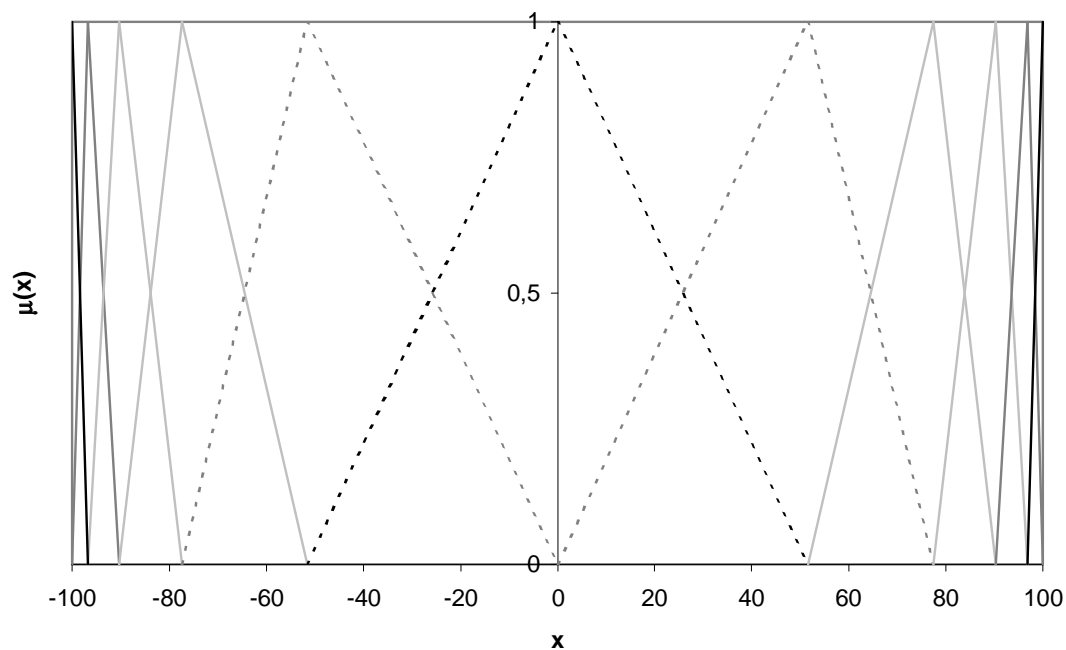


Figura 18 – Razão de distribuição 0,5

A distribuição dos conjuntos, neste caso segue uma progressão geométrica, de forma que o conjunto central é simétrico e a sobreposição entre estes sempre possui grau máximo 0,5, portanto é respeitada a complementaridade das informações.

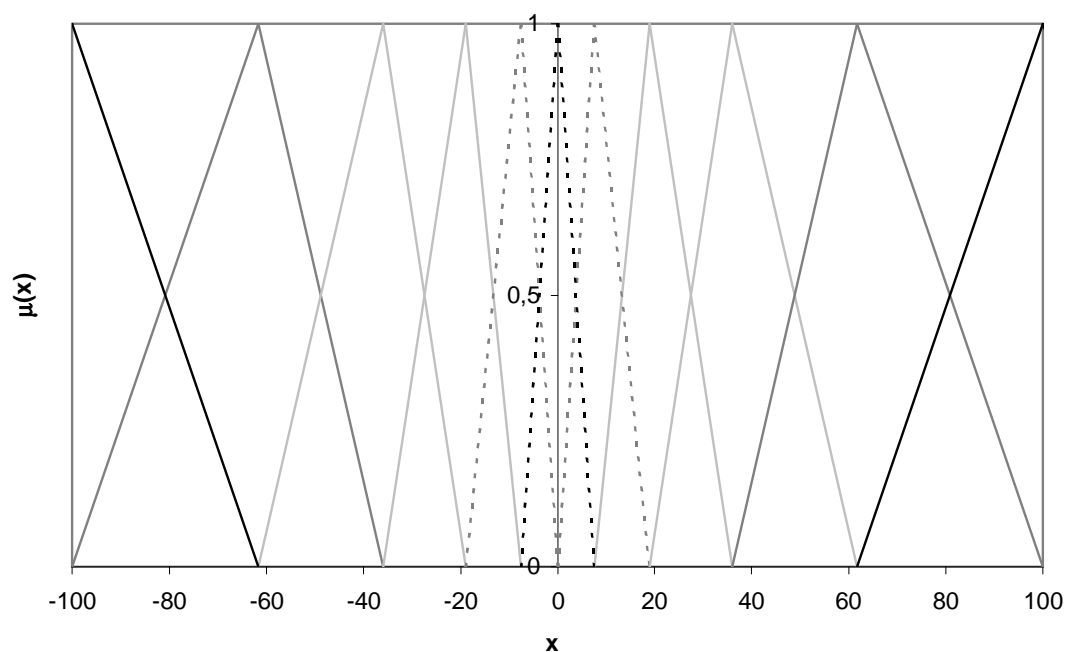


Figura 19 - Razão de distribuição 1,5.

4.1.1.5 Entrada Difusa

A imprecisão e o ruído nas entradas do controlador podem ser manipulados na forma de uma entrada difusa. A maioria dos trabalhos de controle de processos utilizam como entradas conjuntos difusos unitários (*singleton*), pela simplicidade da implementação. Neste trabalho, foram estudadas as influências das entradas unitária e triangular para o sistema de controle de temperatura de processos em batelada, com o intuito de observar o potencial de uso de entradas triangulares e suas implicações. Uma implicação inicial limitante é a maior complexidade de implementação. A figura 20 mostra as entradas triangular (aproximadamente -50) e unitária (+50) sobre um universo difuso.

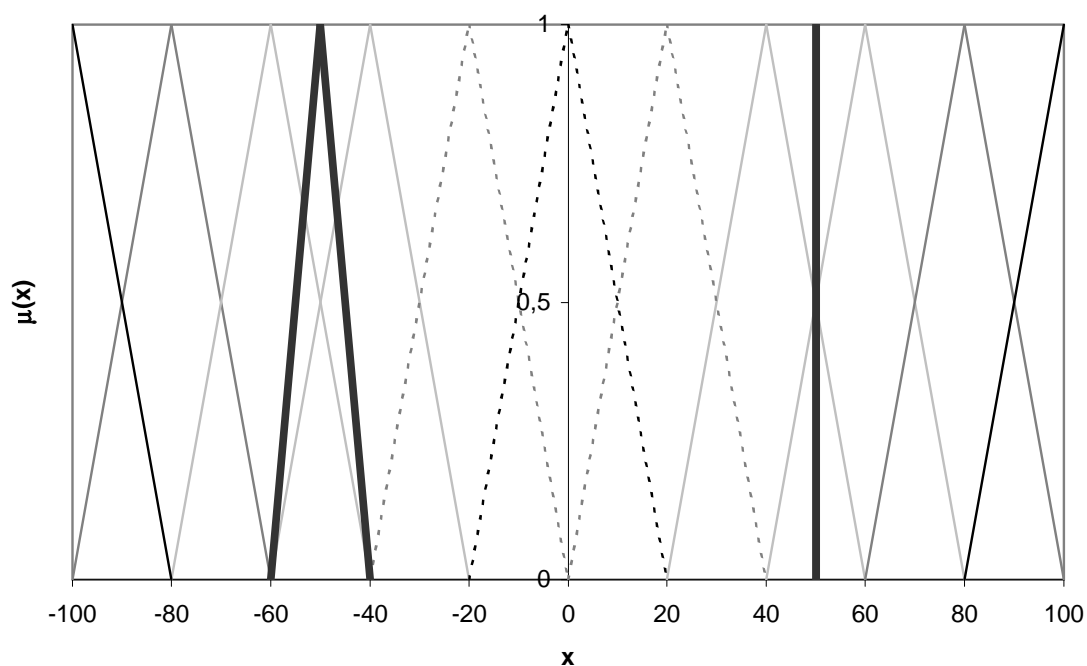


Figura 20 – Entradas difusas triangular e unitária .

4.1.1.6 Grau de ativação mínimo das regras

A alteração do estado de ativação das regras é simples de ser efetuada e altera o comportamento do sistema difuso em nível de conversão Domínio-difuso-Domínio-real (*defuzzification*). Consiste, essencialmente, em

estabelecer um limiar de ativação das regras e normalizar os graus das regras, então disparadas, para o intervalo $[0;1]$. Desta forma o processo de conversão Domínio-difuso-Domínio-real (*defuzzyfication*) produz novos resultados. Este tipo de alteração, somente deve ser utilizado com o objetivo de alterar o comportamento do sistema, visto que é removida a capacidade de interpolação abaixo do limiar estabelecido. A manipulação da imprecisão nas medidas também pode ser realizada desta forma, porém o efeito se estende sobre as ações em todo o universo difuso.

4.1.1.7 Base de regras difusas

Os controladores baseados nas regras apresentadas nas tabelas 12 e 13 são destinados a sistemas genéricos de controle de temperatura. Para sistemas de processamento em batelada estas regras podem ser especializadas, resultando em uma significativa redução de consumo dos insumos energéticos. O senso comum e a experiência de operação indicam que:

- I) Devem ser evitadas aberturas simultâneas das válvulas de aquecimento e resfriamento;
- II) Quando determinada a abertura de válvula de aquecimento que mantém o sistema em temperatura constante, a válvula de resfriamento deve estar completamente fechada;
- III) O uso do sistema de resfriamento implica em um consumo excessivo de insumos (água+energia), não deve ser utilizado durante o aquecimento e portanto o controlador da corrente quente deve receber maior atenção durante a fase de ajuste.

Para especializar o controlador da corrente de resfriamento para processos em batelada, a tabela 13 foi rescrita na tabela 14 onde as regras são identificadas em 4 quadrantes e uma diagonal, responsáveis por ações de resfriamento distintas, com os seguintes significados:

Diagonal: $E = 0$ e $\Delta Y = 0$, ou $E \neq 0$ mas ΔY é adequado.

Quadrante 1: $E < 0$ ($Y(t) < Y_{SP}(t)$) e $\Delta Y > 0$ ($Y(t) > Y(t-\Delta t)$):

Diagonal superior: ΔY é superior ao desejado. Grupo de ações negativas preventivas.

Diagonal inferior: ΔY é inferior ao desejado. Ações positivas para aumento de ΔY .

Quadrante 2: $E > 0$ ($Y(t) > Y_{SP}(t)$) e $\Delta Y(t) > 0$ ($Y(t) > Y(t-\Delta t)$): Grupo de ações corretivas positivas (*overshoot*, oscilação, perturbação)

Quadrante 3: $E > 0$ ($Y(t) > Y_{SP}(t)$) e $\Delta Y(t) < 0$ ($Y(t) < Y(t-\Delta t)$)

Diagonal superior: ΔY é superior ao desejado. Grupo de ações preventivas negativas.

Diagonal inferior: ΔY é inferior ao desejado. Ações positivas para aumento de ΔY .

Quadrante 4: $E < 0$ ($Y(t) < Y_{SP}(t)$) e $\Delta Y(t) < 0$ ($Y(t) < Y(t-\Delta t)$): Grupo de ações corretivas negativas (*undershoot*, oscilação, perturbação).

Tabela 14 - Regras envolvendo 11 termos lingüísticos para o controlador da corrente fria

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)										
		N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
Erro (E)	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z
	N4	N5	N4	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1
	N3	N5	N4	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2
	N2	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3
	N1	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4
	Z	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
	P1	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5
	P2	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5
	P3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5
	P4	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5	P5
	P5	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5	P5	P5

Para o caso específico de processos em batelada a tabela 14 pode ser modificada para satisfazer a segunda e terceira indicações com base na experiência de operação. A primeira indicação, que se refere ao uso simultâneo das correntes de aquecimento e resfriamento, somente pode ser implementada pela incorporação das ações de controle nas premissas das regras. Regras do tipo: **se** E é E' **e** ΔE é $\Delta E'$ **e** ΔU_{Resf} é $\Delta U'_{Resf}$ **então** ΔU_{Aq} é $\Delta U'_{Aq}$ (ou **se** E é E' **e** ΔE é $\Delta E'$ **e** ΔU_{Aq} é $\Delta U'_{Aq}$ **então** ΔU_{Resf} é $\Delta U'_{Resf}$) seriam obtidas. Esta alteração implica no aumento do número de regras, das atuais 242 para 2662, e portanto não foi implementada. As seguintes modificações podem ser implementadas:

Diagonal: Não deve ser alterada pois versa sobre o equilíbrio entre E e ΔY , exceto na condição $E=0$ e $\Delta Y=0$, quando a ação deve ser negativa para que sejam reduzidas as taxas de aquecimento e resfriamento. A redução do resfriamento deve ser gradativa para permitir a redução conseqüente do aquecimento sem oscilações excessivas.

Quadrante 1:

Diagonal superior: sem alterações.

Diagonal inferior: sem alterações.

Quadrante 2: sem alterações.

Quadrante 3: $E > 0$ ($Y(t) > Y_{SP}(t)$) e $\Delta Y(t) < 0$ ($Y(t) < Y(t-\Delta t)$)

Diagonal superior: sem alterações.

Diagonal inferior: sem alterações.

Quadrante 4: $E < 0$ ($Y(t) < Y_{SP}(t)$) e $\Delta Y(t) < 0$ ($Y(t) < Y(t-\Delta t)$): Reduzir a taxa de resfriamento ao máximo para determinação da condição de equilíbrio da válvula de aquecimento.

A tabela 15 apresenta as modificações efetuadas na base de regras.

Tabela 15 - Regras modificadas envolvendo 11 termos lingüísticos para o controlador da corrente fria.

		Variação da Saída do Sistema (ΔY)										
		N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
Erro (E)	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N4	N3	N2	N1	Z
	N4	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N3	N2	N1	Z	P1
	N3	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N2	N1	Z	P1	P2
	N2	N5	N5	N5	N5	N5	N5	N1	Z	P1	P2	P3
	N1	N5	N5	N5	N5	N5	N5	Z	P1	P2	P3	P4
	Z	N5	N4	N3	N2	N1	N1	P1	P2	P3	P4	P5
	P1	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5
	P2	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5
	P3	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5
	P4	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5	P5
	P5	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P5	P5	P5

Os controladores baseados nas regras apresentadas nas tabelas 12, 13 e 15 foram testados no controle de temperatura dos sistemas de processamento em batelada sem reação química e com a reação de polimerização de Estireno em suspensão. Os resultados serão apresentados no capítulo 6.

No próximo capítulo é detalhada a unidade de processamento em batelada utilizada em ensaios preliminares e no controle de temperatura.

5 UNIDADES EXPERIMENTAIS

A infra-estrutura necessária para a realização dos experimentos requeridos neste trabalho foi fornecida pelo Laboratório de Controle de Processos (LCP) do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina (LCP/EQA/CTC/UFSC).

Para fornecer os aparatos necessários para o estudo em questão foram instaladas unidades experimentais completamente automatizadas. Estas unidades constituem seis experimentos, quatro dos quais constituídos por tanques cilíndricos, os quais formam malhas de controle de nível, representando sistemas de primeira e segunda ordem e com dinâmica variante. Os outros dois sistemas são constituídos por tanques de mistura que atuam como reatores químicos que podem ser operados em forma contínua ou batelada.

Os sistemas de controle de nível são apresentados nas figuras 21, 22 e 23. A resistência ao escoamento na saída de cada tanque pode ser regulada através de uma válvula do tipo gaveta.

Na figura 21, a variação da altura da coluna d'água no tanque representa um sistema de primeira ordem, onde a medida desta é realizada através de um medidor de pressão instalado na base do tanque. Um sinal na faixa de 4-20mA é gerado para pressões entre 0 e 400mBar, ou seja aproximadamente 0-4mca. Este sinal é convertido para o intervalo 1-5VDC através de um conversor Corrente/Tensão. Uma placa Analógico/Digital (AD) recebe o sinal, em tensão, o qual, através de uma curva de calibração, permite que seja determinada a altura da coluna d'água no tanque. Este dado pode ser utilizado para que algum algoritmo de controle forneça a abertura da válvula pneumática, necessária para que o nível desejado seja mantido. Para isto, um sinal no intervalo 1-5VDC é gerado e enviado à um conversor Tensão/Corrente e seguidamente à um conversor Corrente/Pressão onde a pressão sobre a válvula pneumática, no intervalo 3-15psi, é gerada. Para este caso está disponível uma válvula do tipo "Iguar percentagem" e "Ar abre/Falha fecha", ou seja, uma válvula não linear onde um aumento de pressão de alimentação de ar promove um aumento em sua abertura.

O acionamento da bomba e conversores pode ser realizado via *software* através de um conjunto de relês (apresentados na figura 21) conectados à uma placa especial para este propósito.

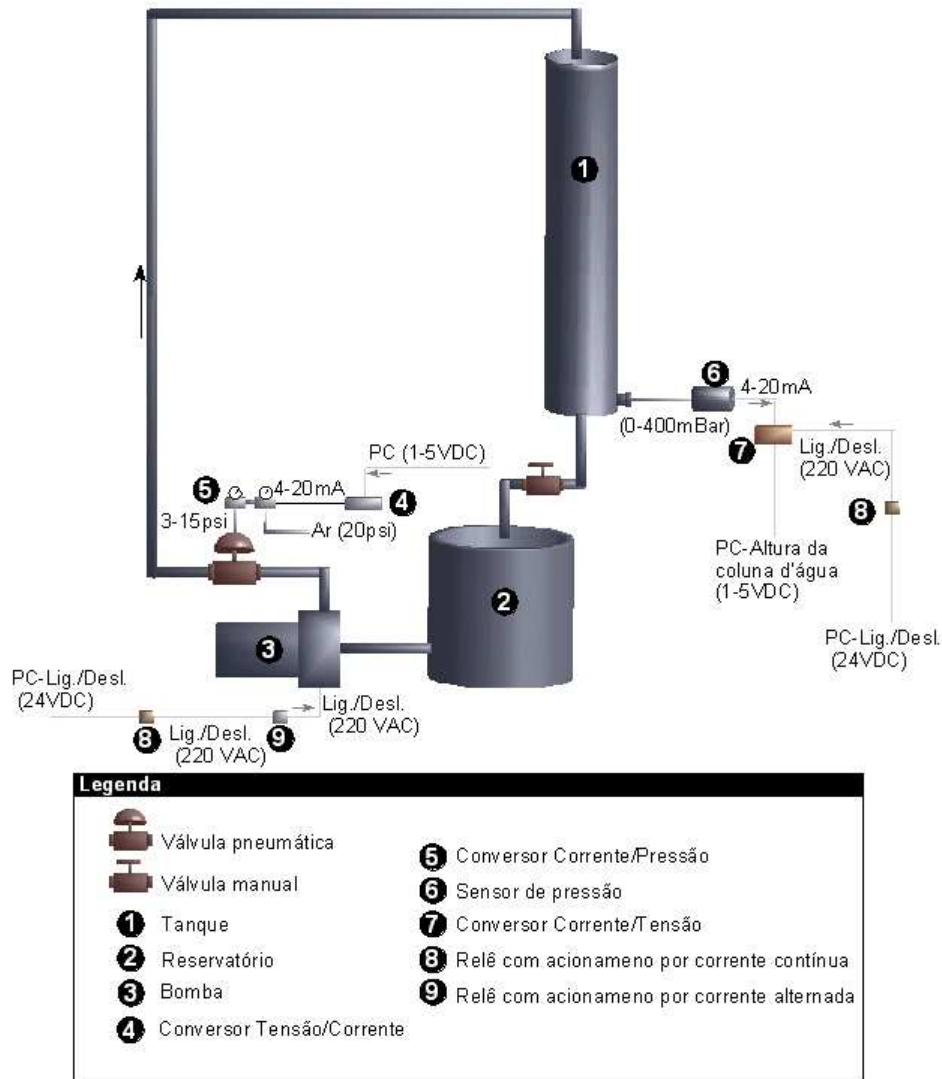


Figura 21 - Um sistema de primeira ordem.

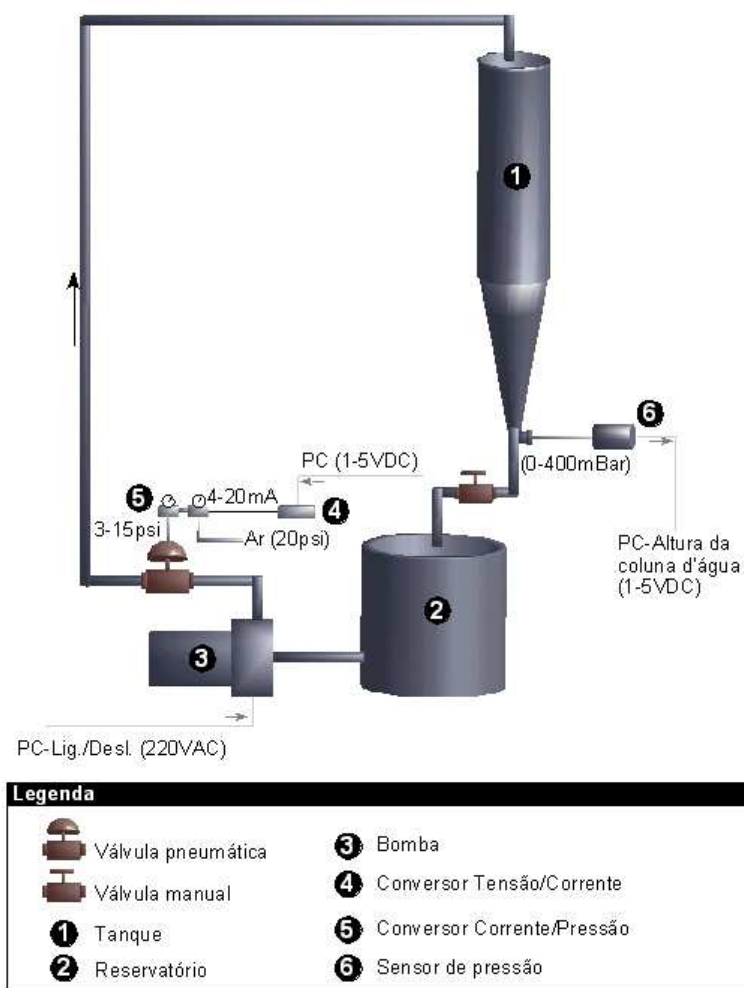


Figura 23 - Um sistema com dinâmica variante.

5.1 Sistema de processamento em batelada

A unidade de processamento em batelada (reação/mistura) instalada constitui-se, basicamente, de um tanque encamisado em aço inox 316L, provido de um sistema de agitação com acionamento por *software*. As trocas térmicas necessárias ao sistema são realizadas por um trocador de calor a placas e duas bombas centrífugas. Válvulas proporcionais são responsáveis pela dosagem das correntes quente e fria, conforme a figura 24.

O sistema de troca térmica é iniciado pela abertura total das válvulas V1, V5 e V6 (figura 24), seguido pelo acionamento das bombas de resfriamento (3) e

circulação (4). Neste estágio a pressão na camisa do reator é de aproximadamente 2 kgf/cm^2 . A válvula V2 é responsável pela circulação de vapor no trocador de calor a placas, através do qual é gerada a corrente quente para o aquecimento do tanque de mistura. Com a válvula V4 mantida fechada, apenas a corrente quente circula na camisa do tanque, recebendo à cada passagem pelo trocador de calor mais energia, podendo atingir a temperatura de 120°C (temperatura máxima requerida nesta reação de polimerização de Estireno). A abertura da válvula V4, diminui a pressão na camisa do tanque, bem como em toda linha de circulação, fazendo com que a corrente fria (bomba 3) circule nesta. Como V2 e V4 são válvulas proporcionais, é possível estabelecer a temperatura ótima para o processo.

O sistema de agitação é composto por uma unidade motriz formada de um motor trifásico com saída reduzida (para permitir maior torque) e rotação variável, através de um variador de frequência, com rotação manipulada remotamente por um sinal de 1-10 VDC. O variador de frequência requer um sinal de 12VDC para que possa ser iniciada a manipulação remota. O agitador é do tipo hélice dupla, centrada (figura 25) se estende até a base o equipamento. Vários acessórios foram omitidos da figura 24 para permitir a melhor visualização do processo, e alguns podem ser vistos na figura 21.

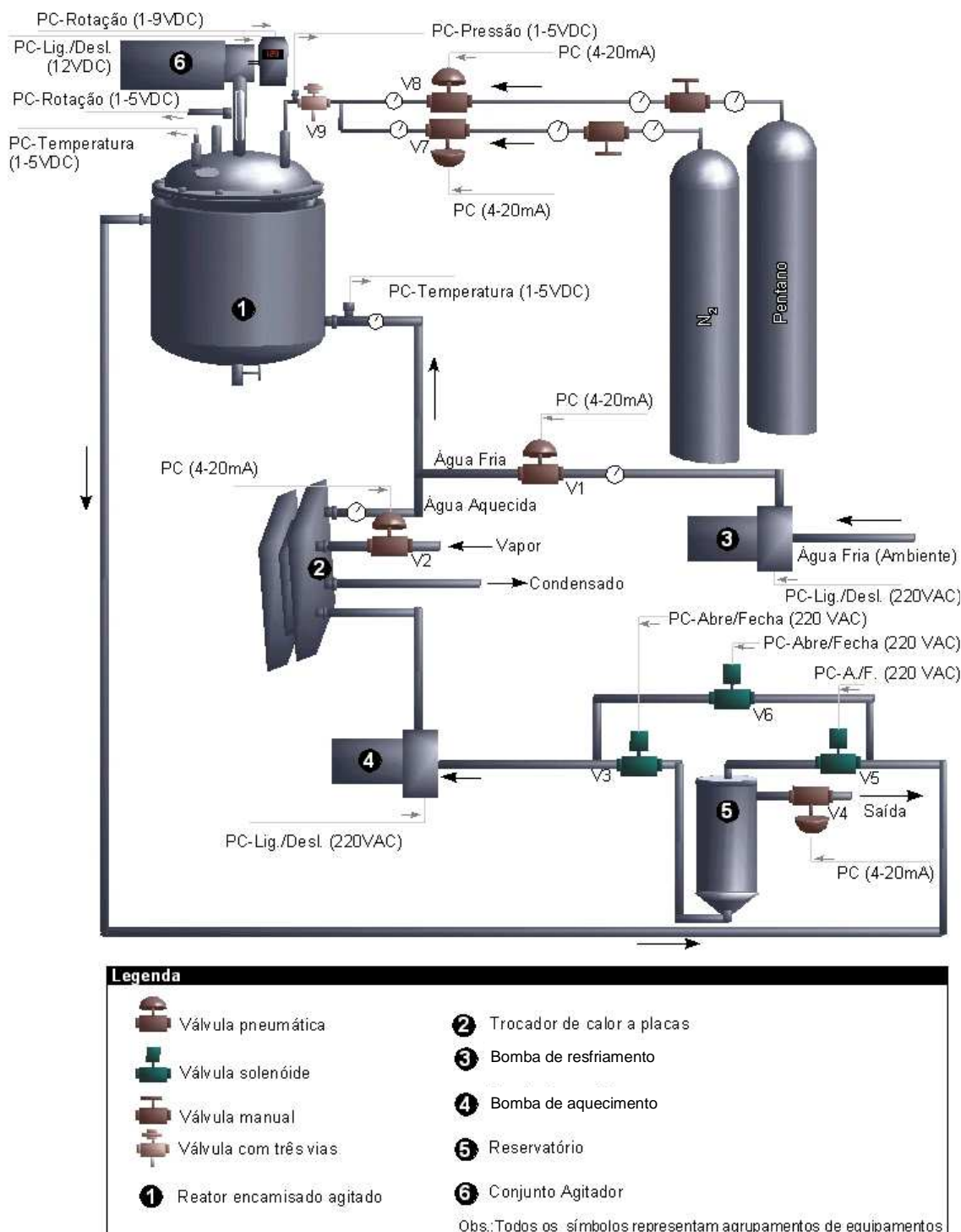


Figura 24 – Unidade para polimerização

O tanque encamisado foi projetado para operar com pressão máxima de $15 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ enquanto a pressão de operação é de $6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$. A presença de um poço isolado para termopar e uma seção para alimentação de gases, permite que

temperatura e pressão internas sejam monitoradas. Uma válvula com três vias permite que seja injetado o gás desejado no sistema, que este seja isolado ou ainda despressurizado com um único equipamento (para operação manual). O tanque possui também duas aberturas roscáveis, uma anterior e outra posterior para alimentação de reagentes ou aditivos. As especificações de todos os equipamentos estão no apêndice B. O reservatório, na figura 24, atua como um acumulador de energia para permitir aquecimento mais rápido e reduzir os efeitos das flutuações de pressão na corrente de vapor.

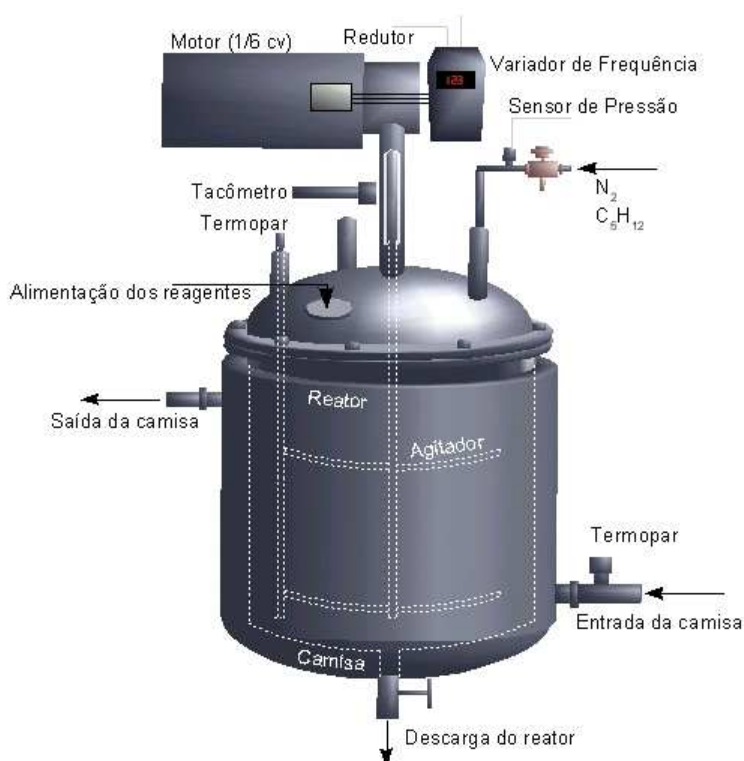


Figura 25 – Detalhes do tanque de mistura.

De forma a simplificar a operação do sistema apresentado na figura 24, algumas modificações foram efetuadas, constituindo a figura 26.

(válvula de aquecimento 100% aberta). Com esta configuração, a válvula de saída (V1 na figura 26) passa a atuar como válvula de resfriamento pela redução da pressão na camisa do tanque de mistura. A válvula de retenção e a bomba de resfriamento garantem esta alternativa.

Durante os testes o tanque de mistura foi completamente preenchido com água não havendo, portanto, os efeitos da reação química. Posteriormente a água foi substituída pelo meio de reação (água+estireno+aditivos). A figura 27 apresenta o comportamento dinâmico não-linear do sistema sem reação química. Observa-se nas figuras 28 e 29 que uma abertura, na válvula de aquecimento, de 10% é suficiente para manter a temperatura do sistema em aproximadamente 90° C, enquanto uma abertura de 40% é suficiente para manter a temperatura do sistema em aproximadamente 100-105° C. Uma abertura de 80% é requerida para manter a temperatura do sistema em, aproximadamente 120° C. As oscilações entre 105 e 120° C são devidas ao consumo elevado de vapor.

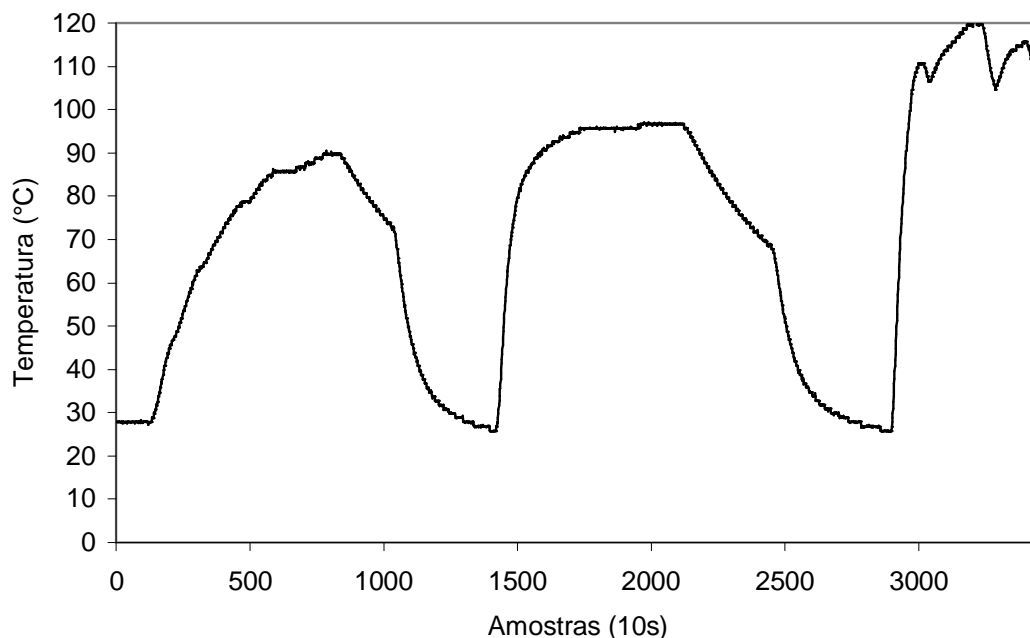


Figura 27 – Sistema não-linear: Temperatura x Tempo

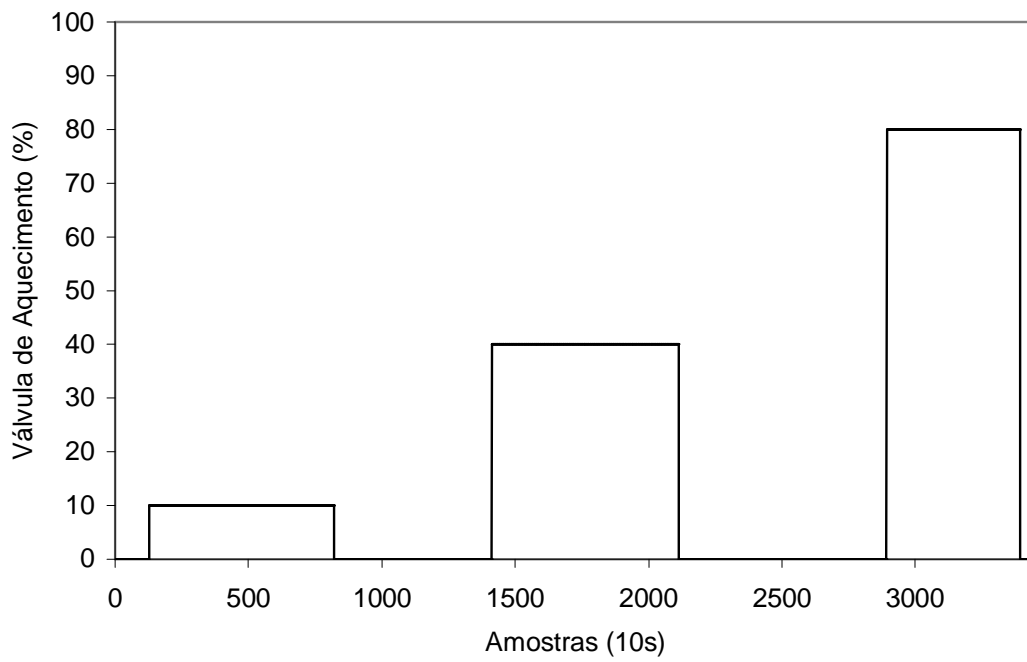


Figura 28 – Sistema não-linear: Válvula de Aquecimento x Tempo

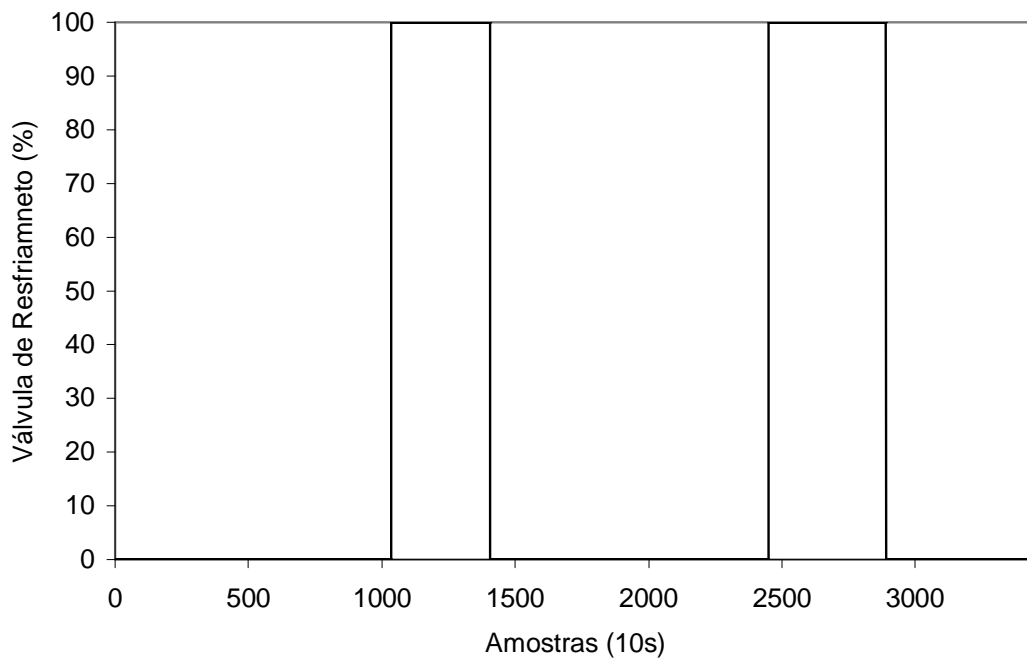


Figura 29 – Sistema não-linear: Válvula de Resfriamento x Tempo

A polimerização em suspensão do Estireno apresentou-se estratégica para este trabalho por representar um problema complexo. O apêndice C apresenta os conceitos básicos de polimerização e descreve a reação de polimerização do Estireno.

No próximo capítulo são apresentados os resultados e comentários da aplicação do controlador descrito na unidade de processamento mostrada nesta seção.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento do *software*, pré-requisito para a execução das atividades necessárias para cumprir o objetivo deste trabalho, está descrito no Apêndice D.

Como uma das principais indicações de sistemas difusos trata da manipulação de conhecimentos heurísticos e os ensaios no controle de temperatura requerem muito tempo devido a dinâmica do sistema, ensaios preliminares foram realizados sobre sistemas de controle de nível (apresentados anteriormente). Devido a simplicidade destes sistemas e como o objetivo deste trabalho está centrado sobre processos em batelada, os resultados para os sistemas de controle de nível serão omitidos. Alguns destes resultados estão disponíveis em Mazzucco et al. (2000, 1999, 1998).

Os testes do sistema de controle de temperatura (LCP/EQA/CTC/UFSC) foram baseados em um grupo de perturbações na referência (temperatura desejada ou *set point*), para as quais é requerida uma transição rápida e com a menor incidência de sobrelevações e oscilações.

Os ajustes que foram realizados sobre os controladores contemplaram:

- I- Fator de Escala;
- II- Parâmetros de deslocamento;
- III- Sobreposição dos conjuntos;
- IV- Razão de distribuição;
- V- Entrada Difusa ;
- VI- Grau de ativação mínimo das regras;
- VII- Base de regras difusas;

O objetivo das experimentações é obter conhecimento sobre o comportamento dos controladores para os ajustes realizados e estabelecer a metodologia mais simples para o ajuste.

Os experimentos seguiram os seguintes procedimentos:

- I) Ajustar o intervalo de amostragem para 10s;
- II) Abrir completamente a válvula de aquecimento durante 20s;
- III) Abrir completamente a válvula de resfriamento até que a temperatura do reator esteja, entre 28 e 32° C;
- IV) Manter as válvulas de resfriamento e aquecimento totalmente fechadas;
- V) Ajustar os conjuntos difusos e a base de regras para os controladores;
- VI) Iniciar o experimento;
- VII) Aplicar um conjunto de transições de temperatura preestabelecido.

6.1 Determinação dos fatores de escala

Os primeiros experimentos foram realizados com o sistema de controle baseado nas regras apresentadas nas tabelas 12 e 13 e com os conjuntos difusos apresentados nas figuras 30, 31 e 32.

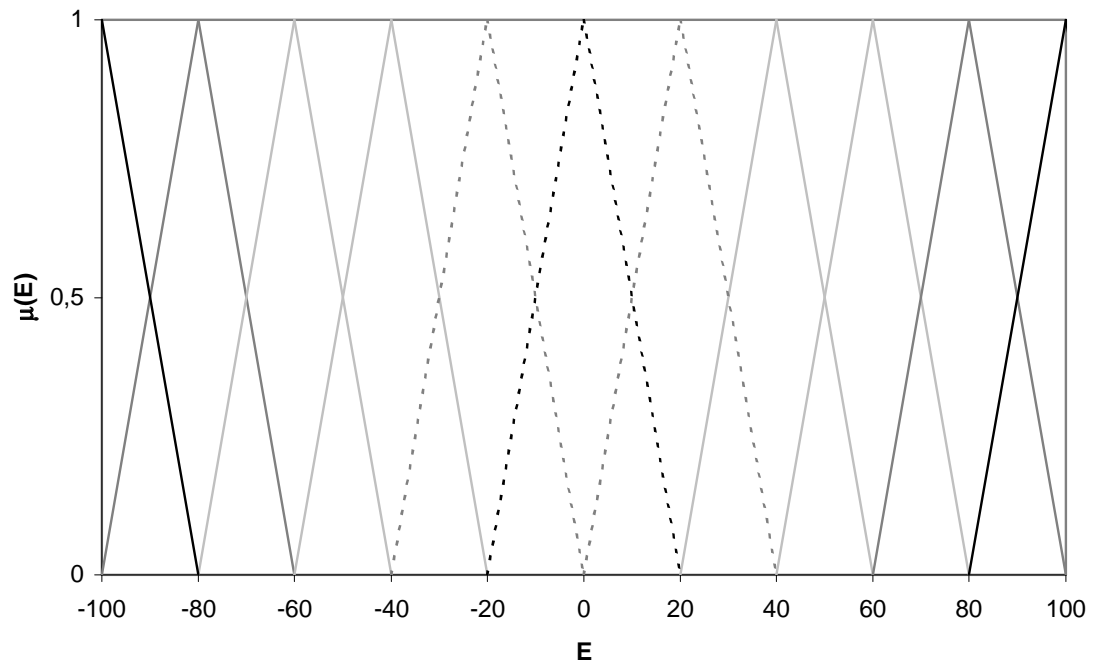


Figura 30 – Conjuntos difusos para universo de discurso E .

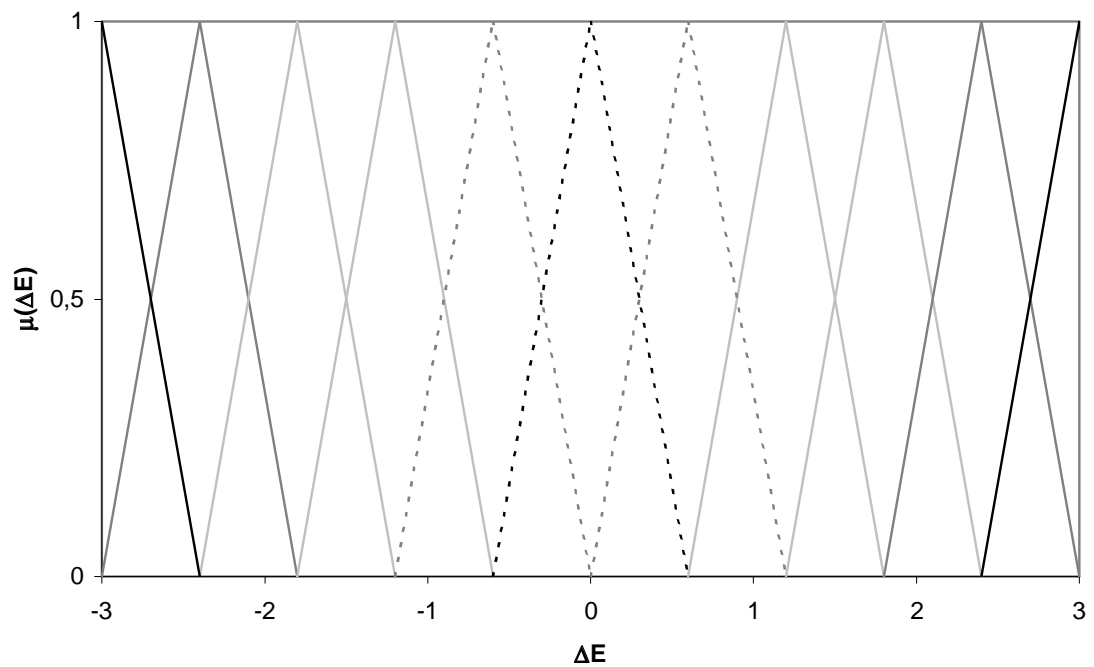


Figura 31 – Conjuntos difusos para universo de discurso ΔY .

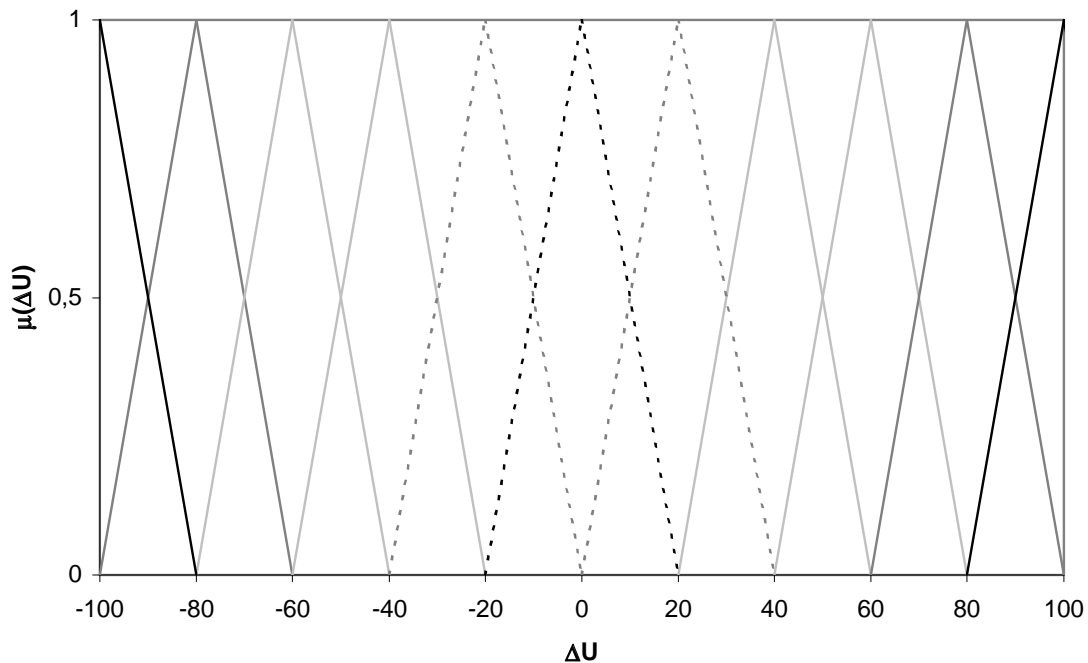


Figura 32 – Conjuntos difusos para universo de discurso ΔU .

Os fatores de escala para os controladores das correntes quente e fria foram determinados a partir dos limites físicos do sistema a ser controlado.

6.2 Ajuste dos parâmetros de deslocamento.

Os parâmetros registrados na tabela 16 foram adotados no experimento 1. Nos experimentos 2 a 6, apenas os parâmetros de deslocamento para as variações nas ações de controle de aquecimento e resfriamento foram alterados. Nos experimentos 7 a 10, os parâmetros de deslocamento para Erro e variações na saída do sistema foram alterados. Em todos os experimentos sem reação química, o tanque de mistura foi preenchido com água e submetido a uma agitação de 200 rpm.

Tabela 16 - Parâmetros adotados no experimento 1.

τ		σ		δ		π	
Aq.	Resf.	Aq.	Resf.	Aq.	Resf.	Aq.	Resf.
0	0	0	0	1	1	0	0

λ		E	ΔY	ΔU
	Aq (1)	1	1	1
Resf (2)	1	1	1	

ε		E	ΔY	ΔU
	Aq	100	3	100
Resf	100	3	100	

Onde:

ε = Fator de Escala;

σ = Sobreposição dos conjuntos;

δ = Razão de distribuição;

π = Entrada Difusa;

τ = Grau de ativação mínimo das regras;

λ = Parâmetros de deslocamento.

Observa-se nas figuras 33, 34 e 35 que para pequenas variações de temperatura (ΔY) grandes variações nas ações de controle foram assumidas. Desta forma, os ajustes sobre as variações nas ações de controle foram os primeiros realizados. Os parâmetros de escala foram mantidos e os parâmetros de deslocamento para as variações das ações de controle, $\lambda_{\Delta U1}$ e $\lambda_{\Delta U2}$, foram reduzidos para 0,5.

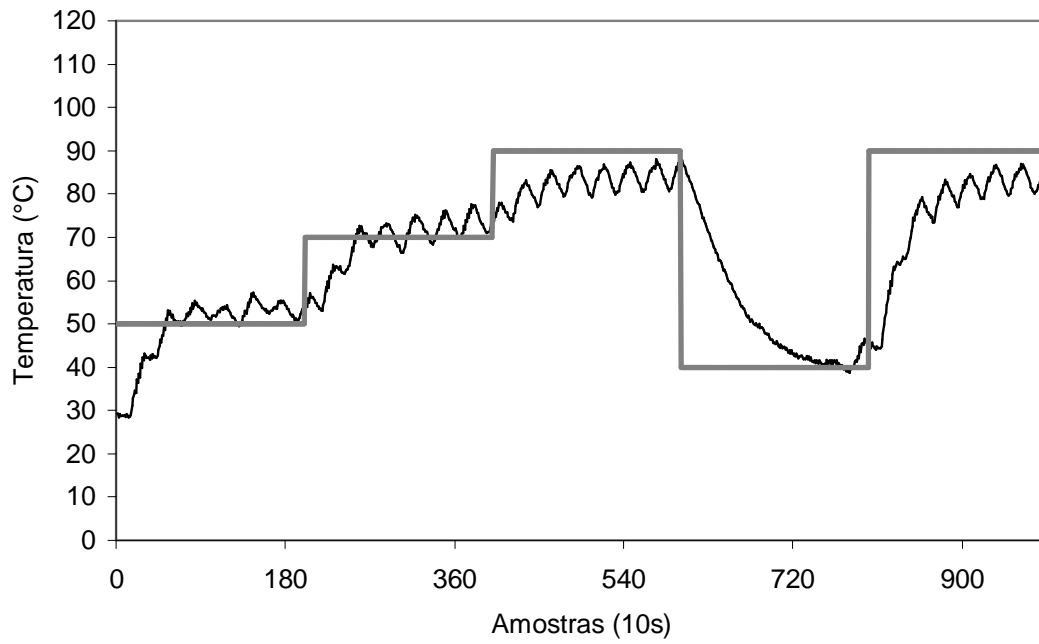


Figura 33 – Temperatura: experimento 1.

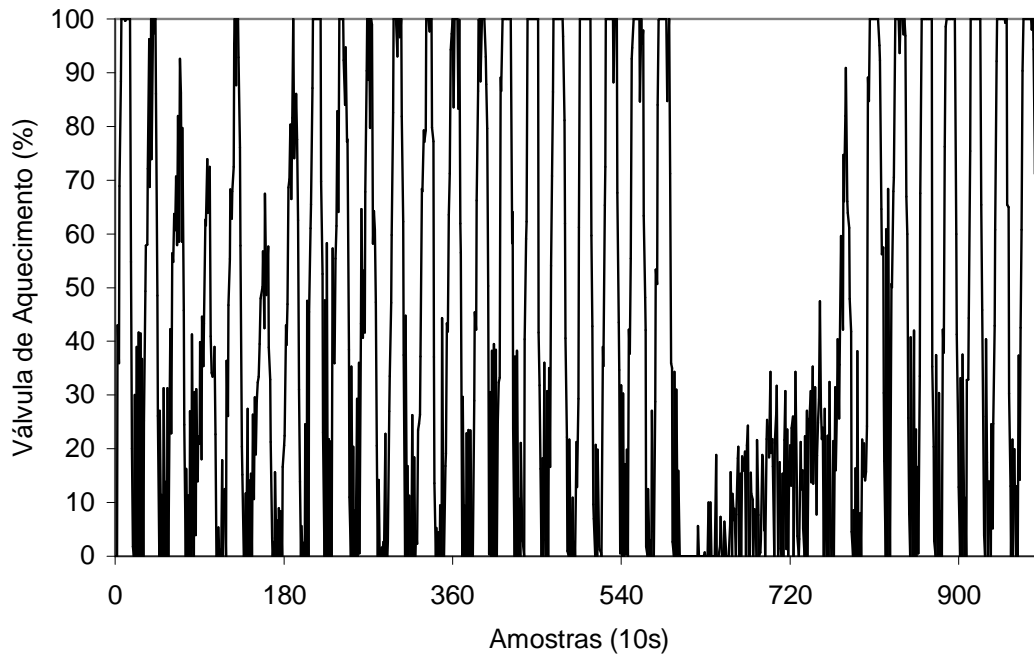


Figura 34 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 1.

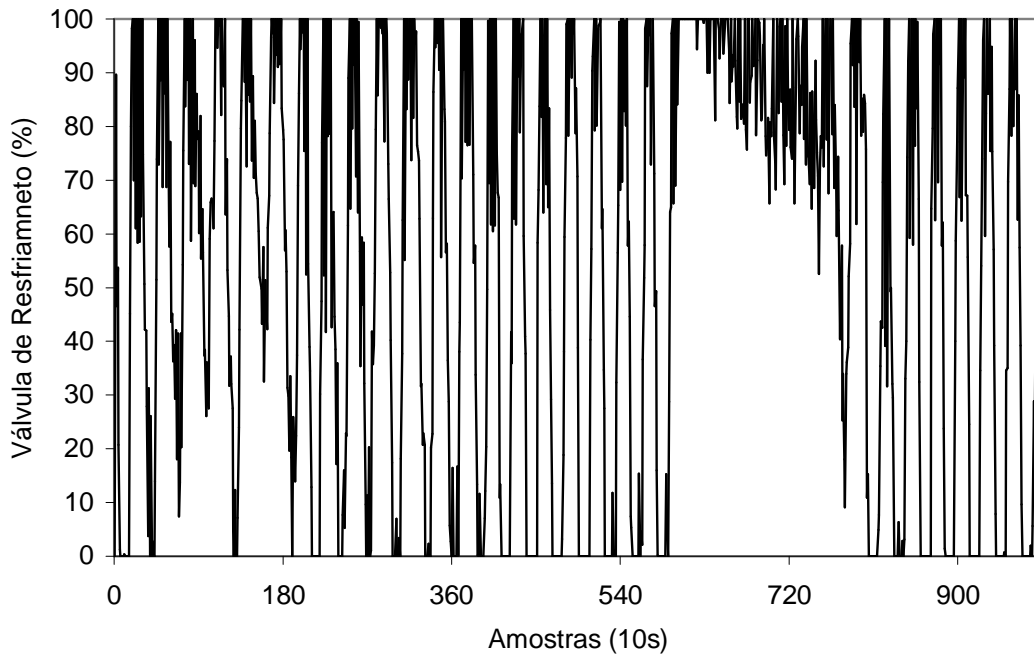


Figura 35 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 1.

Os valores $\lambda_{\Delta U1}=0,5$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,5$ (experimento 2) reduziram os incrementos nas ações de controle de aquecimento e resfriamento (figuras 37 e 38) sem, contudo, reduzir as oscilações da saída do sistema (figura 36). As ações permanecem excessivas e, assim, $\lambda_{\Delta U1}$ e $\lambda_{\Delta U2}$ devem ser reduzidos até que as oscilações sejam amortecidas.

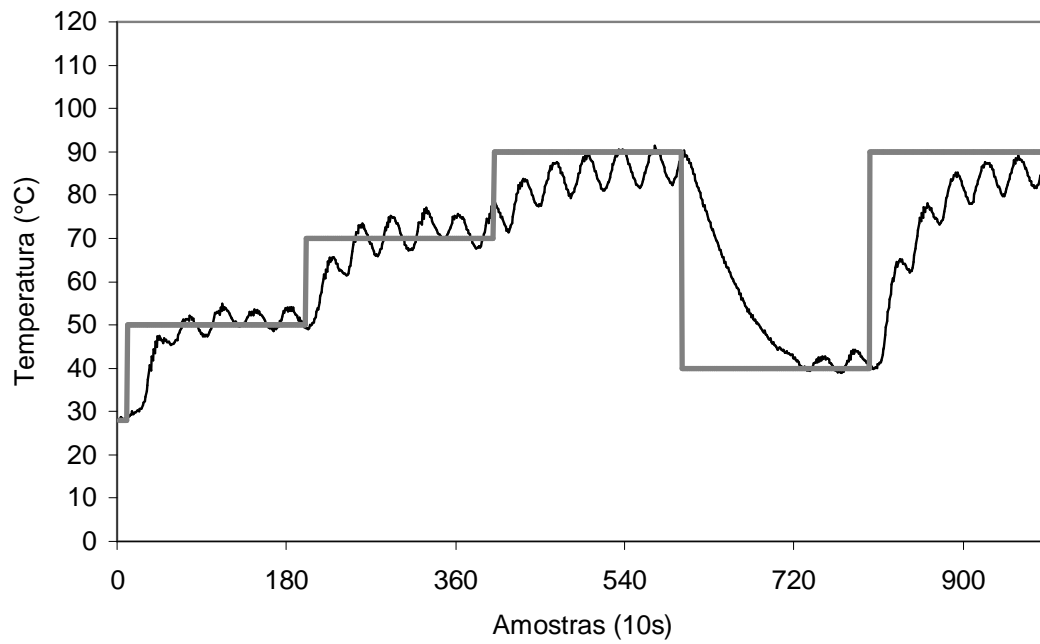


Figura 36 – Temperatura: experimento 2.

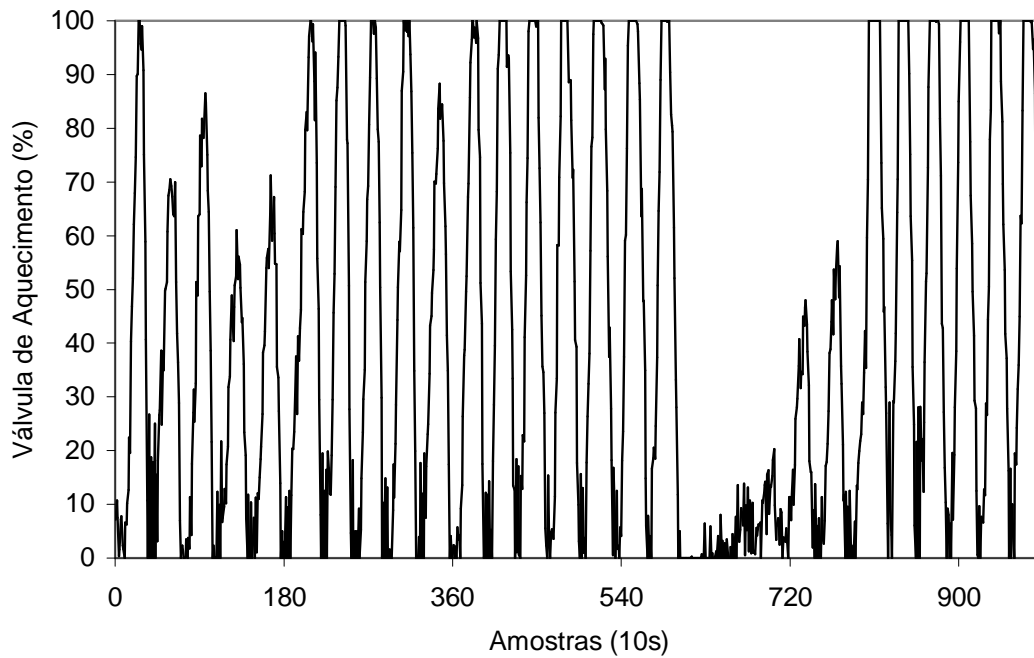


Figura 37 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 2.

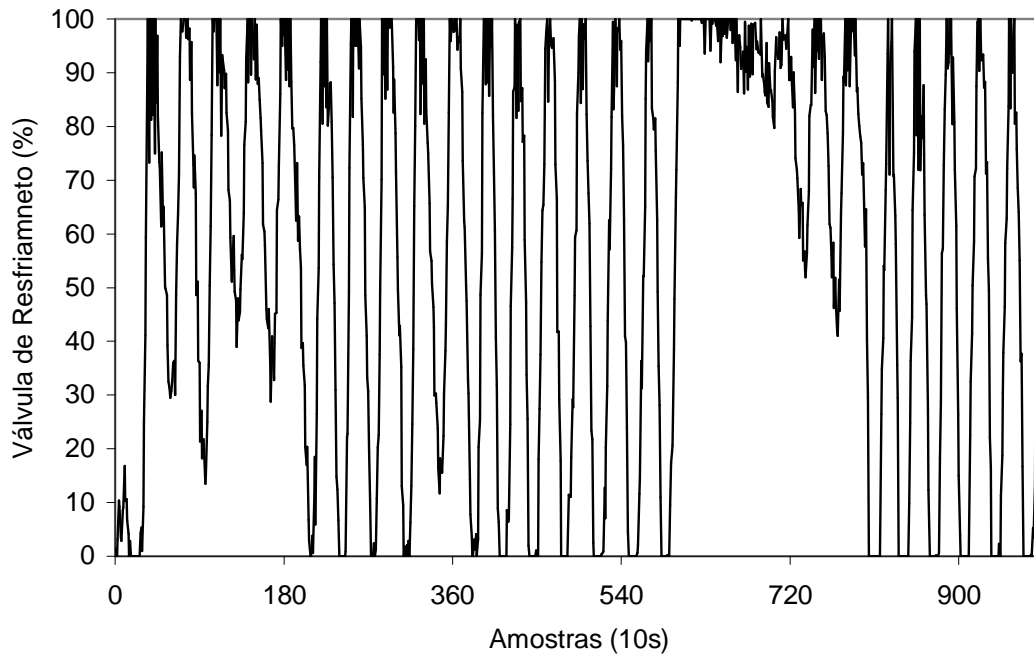


Figura 38 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 2.

Um experimento com valores de $\lambda_{\Delta U1}=0,2$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,2$ (experimento 3) mostrou uma grande redução na oscilação da saída do sistema (figura 39) e dos incrementos nas ações de controle (figuras 40 e 41), indicando que a manipulação deste parâmetro é efetiva.

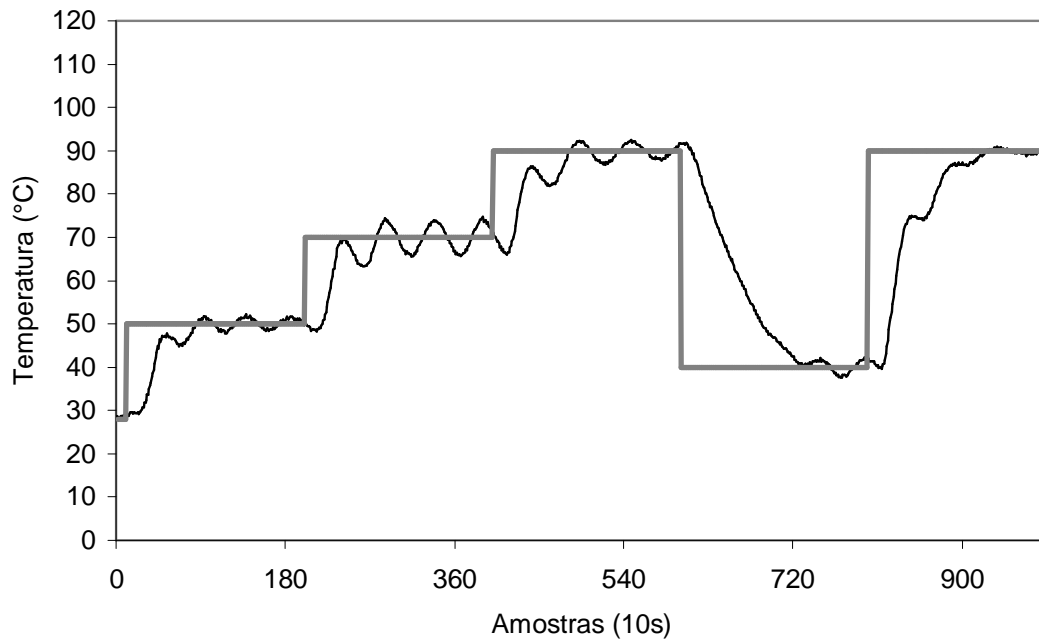


Figura 39 – Temperatura: experimento 3.

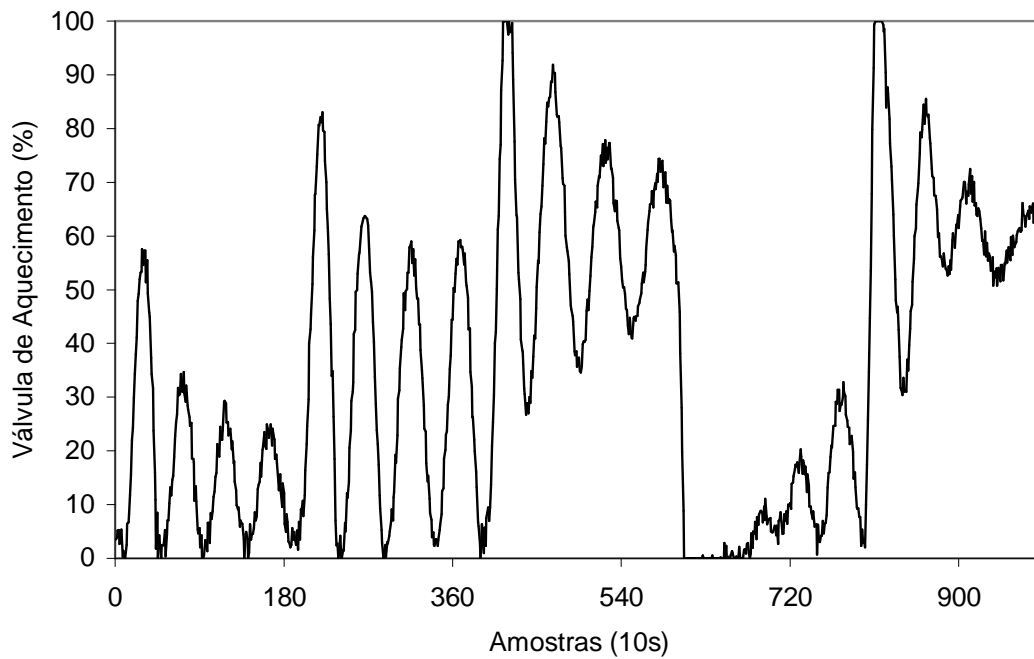


Figura 40 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 3

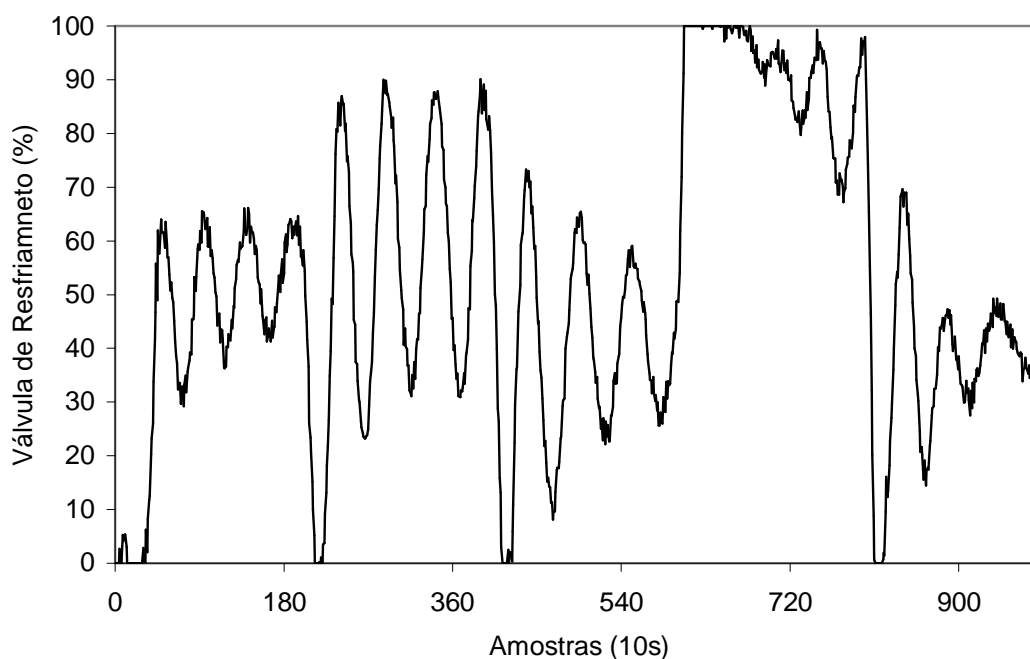


Figura 41 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 3.

A alteração dos valores de deslocamento das ações de controle para $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$ (experimento 4) reduziram os incrementos nas ações de controle de aquecimento e resfriamento (figuras 43 e 44), e estabilizaram o sistema (figura 42). O ajuste apresentou bom resultado para transições de 20° C, porém na transição entre 40° C e 90° C houve uma antecipação excessiva das ações de resfriamento, o que provocou um retardo nesta transição. Com $\lambda_{\Delta U}=0,1$, as ações de controle máximas aplicadas em cada intervalo de amostragem são de 10 %.

Na transição para 110° C ocorreu uma queda de pressão no sistema de aquecimento do tanque de mistura resultando na redução de, aproximadamente, 7° C na temperatura do sistema, a qual foi manipulada pelo controlador. Quedas de pressão no sistema de aquecimento ocorrem devido às capacidades limitadas de fornecimento de vapor pela caldeira e de transmissão de energia no trocador de calor. Estas quedas são mais freqüentes em temperaturas superiores a 105° C que exigem aberturas de válvula maiores que 80%. Posteriormente, será apresentado um experimento nas temperaturas de 100 e 105° C para demonstrar a capacidade do controlador em lidar com estas perturbações.

Como as bases de regras utilizadas (aquecimento e resfriamento) são invertidas e os parâmetros dos controladores são iguais e, ainda, o sistema de controle é incremental, a partir de amostra 1 000 as ações de controle assumem o formato *split-range* fazendo com que, para a temperatura de 40° C, a válvula de resfriamento permaneça com uma abertura de, aproximadamente, 85% e a de aquecimento, aproximadamente, 15%. Da experiência de operação para esta situação, a válvula de resfriamento deveria ser mantida fechada, enquanto a de aquecimento, levemente, aberta. Observa-se que é necessária a aplicação de bases de regras exclusivas (que excluam a característica *split-range*) para o uso mais racional das fontes de aquecimento/resfriamento.

No experimento 5, com os valores $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$ foi reduzido o ganho do controle da corrente fria, de forma a reduzir o consumo global de insumos energéticos.

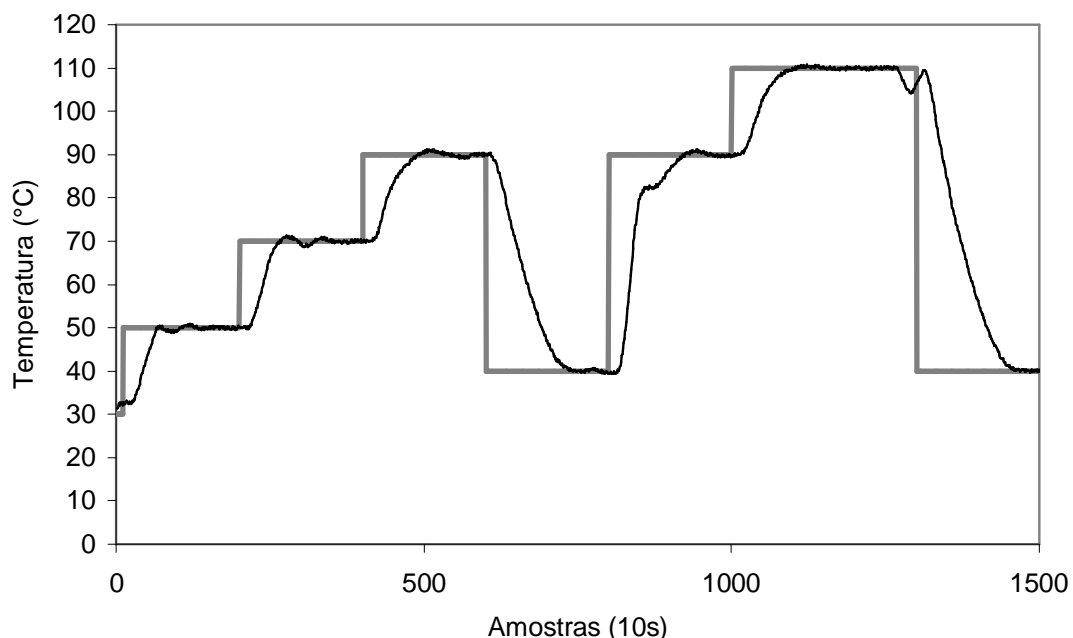


Figura 42 – Temperatura: experimento 4.

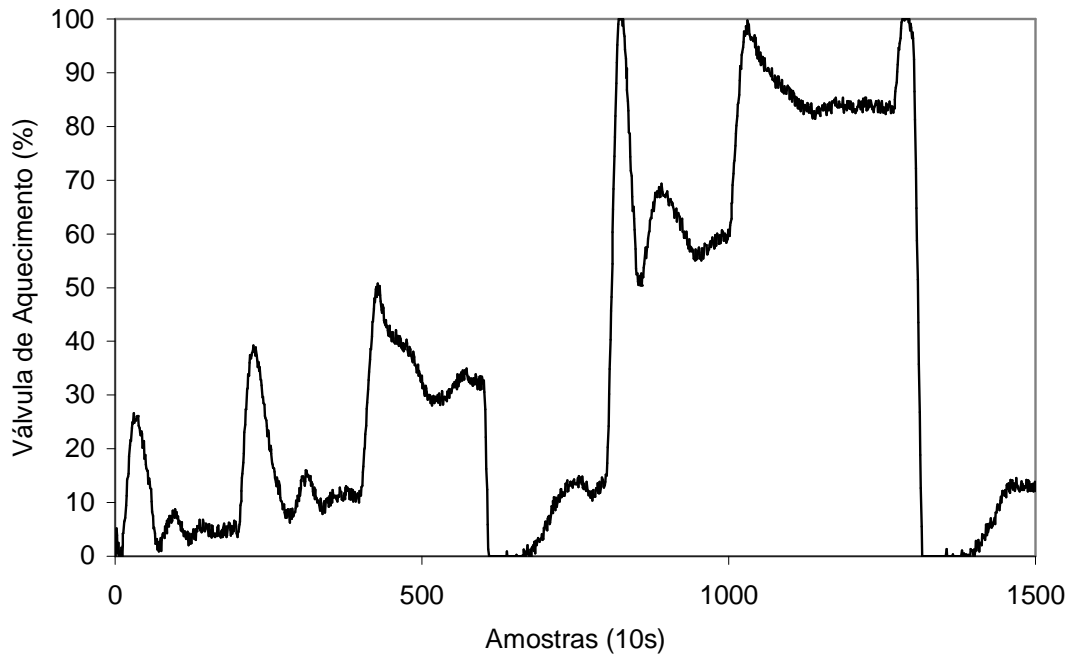


Figura 43 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 4.

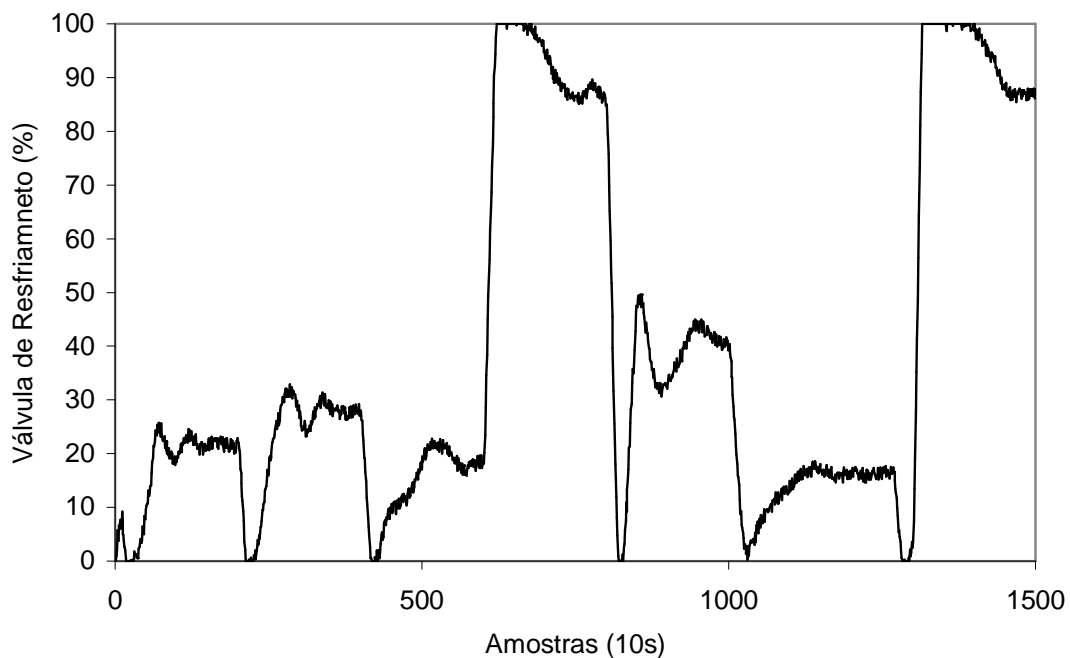


Figura 44 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 4.

As figuras 46 e 47 não indicaram redução significativa no consumo de insumos energéticos através dos parâmetros adotados no experimento 5 ($\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e

$\lambda_{\Delta U2}=0,05$). Observa-se uma pequena incidência de sobrelevação (figura 45), uma queda do desempenho no controle da corrente fria nas perturbações entre 40° C e 90° C e entre 90° C e 110° C e, desta forma, estes parâmetros não serão adotados.

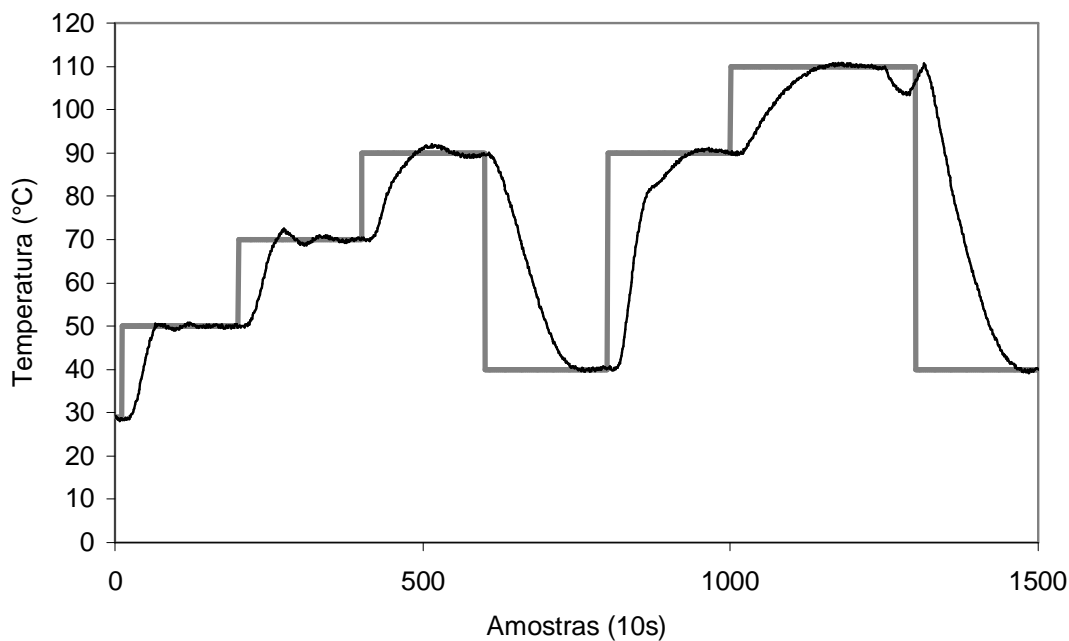


Figura 45 – Temperatura: experimento 5.

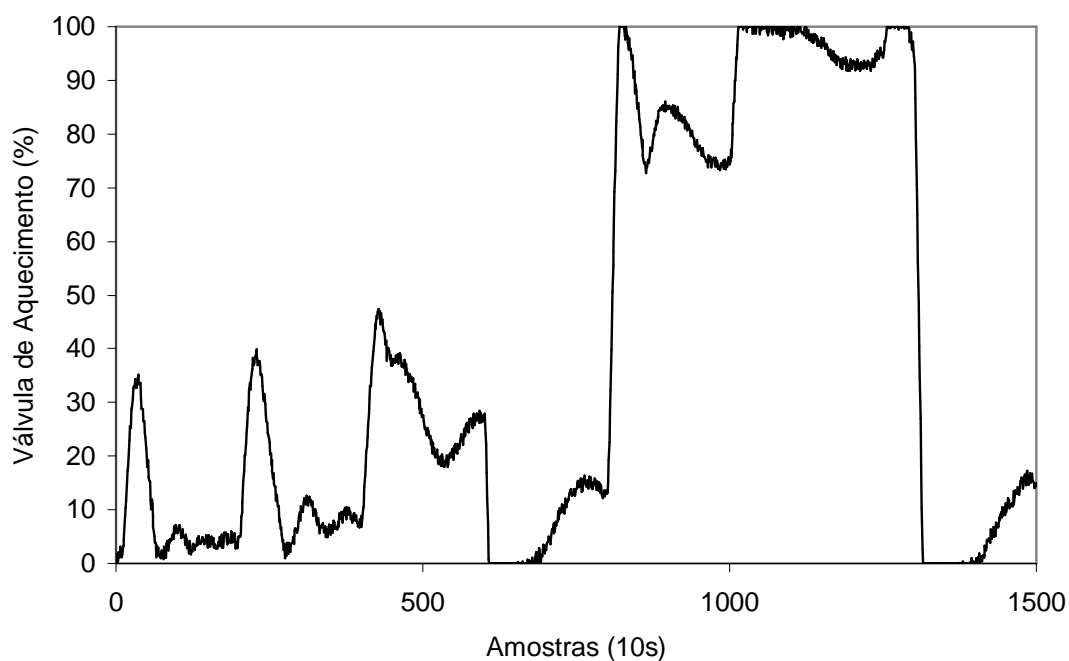


Figura 46 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 5.

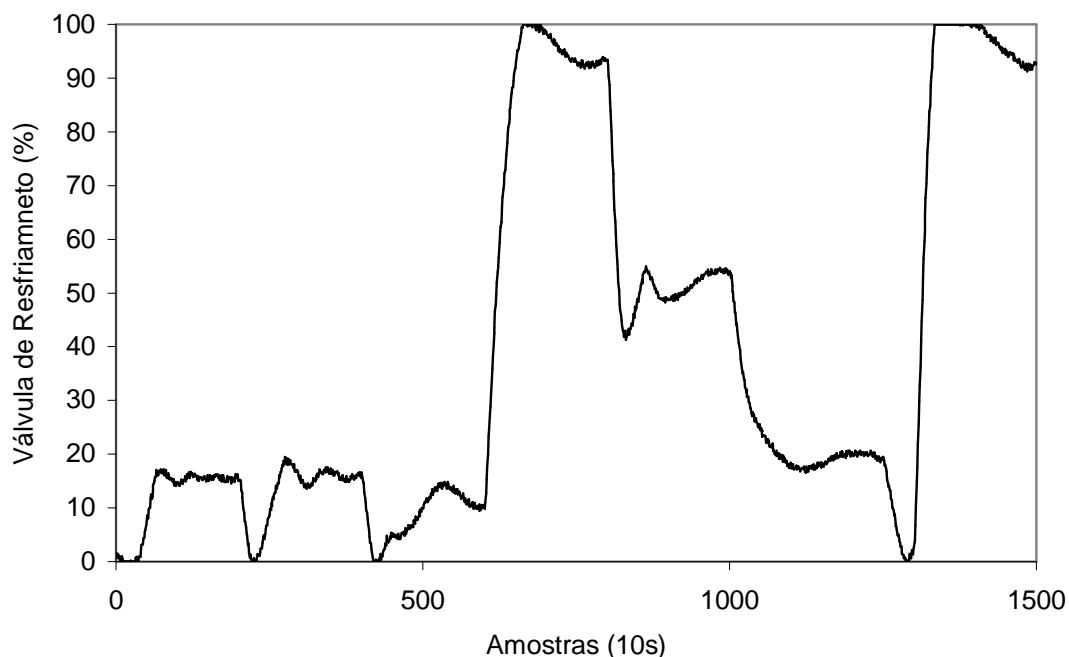


Figura 47 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 5.

As figuras 48, 49 e 50 (experimento 6) apresentam o resultado do controle de temperatura com os parâmetros determinados no experimento 4. Para uma referência de 105°C ocorreram quedas freqüentes de pressão no sistema de aquecimento. Desta forma, uma referência de 100°C foi requerida. Após a estabilização do sistema, através de uma válvula manual, a pressão de alimentação de vapor ao trocador de calor foi reduzida de $6\text{kg}_f/\text{cm}^2$ para, aproximadamente, $4\text{kg}_f/\text{cm}^2$. Com isto, foi constituída uma perturbação, para a qual o controlador estabeleceu uma nova condição de operação, estabilizando o sistema durante a perturbação e após cessada esta.

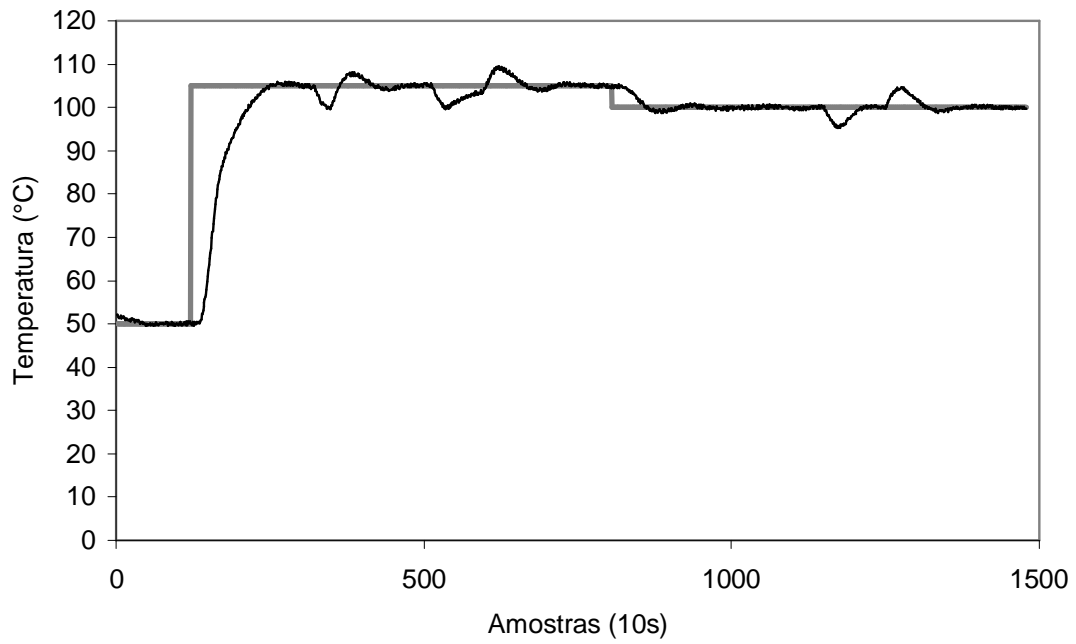


Figura 48 – Temperatura: experimento 6.

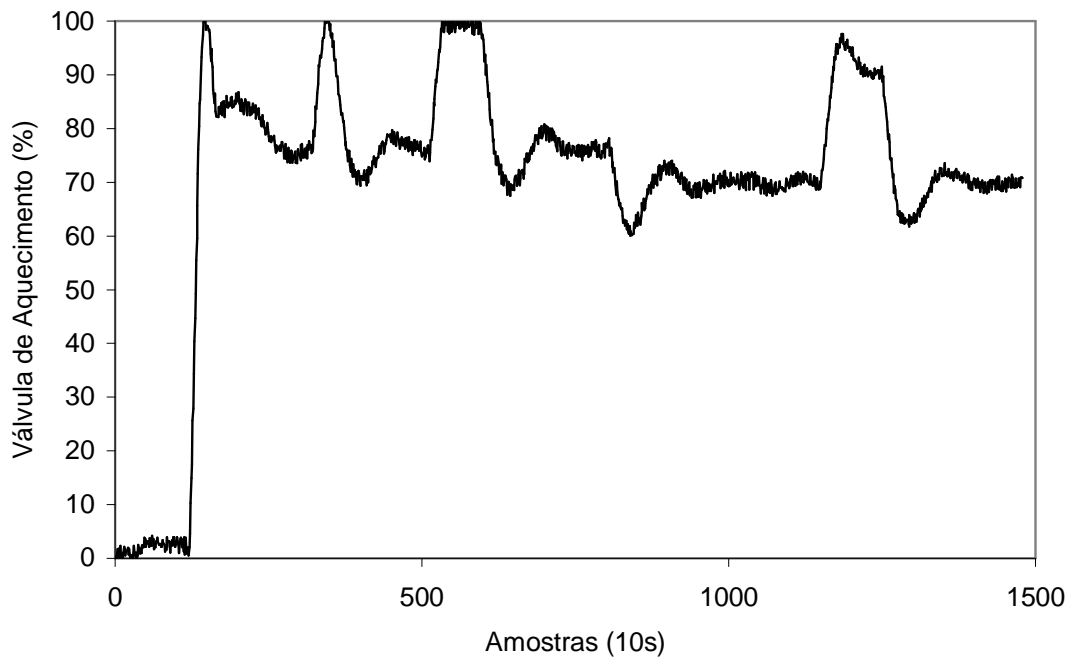


Figura 49 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 6.

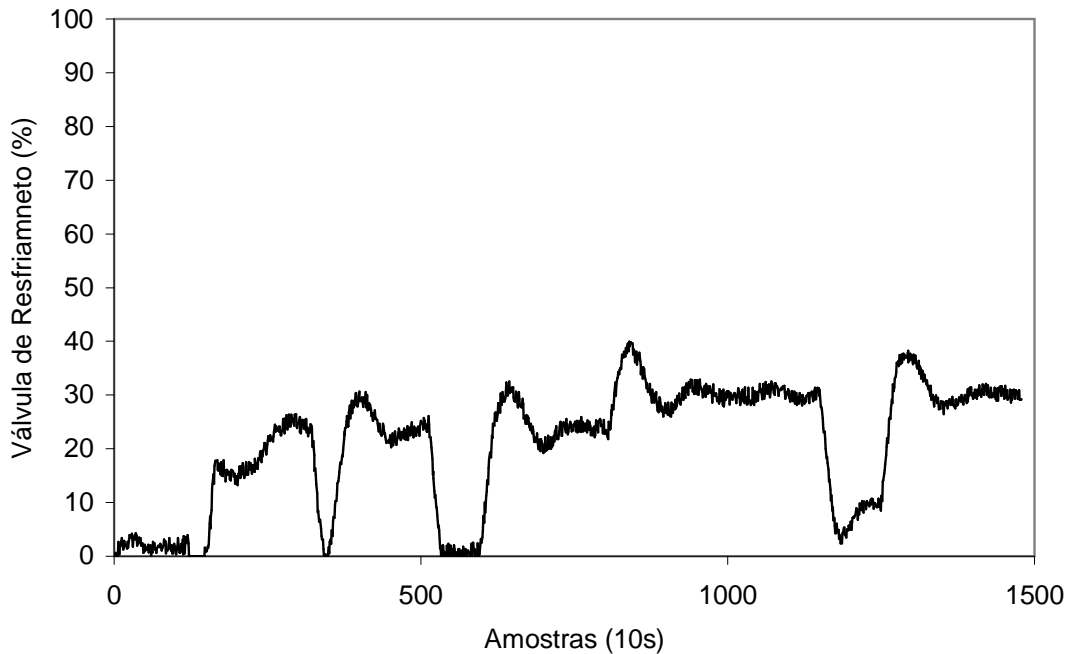


Figura 50 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 6.

Os próximos experimentos não consideram as transições entre 40 e 90° C e para 110° C, devido às sucessivas quedas de pressão no sistema de aquecimento nestes casos.

Para caracterizar as indicações da figura 17, onde é mostrada a influência dos parâmetros de deslocamento, o experimento 7 foi realizado com os parâmetros $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$; $\lambda_{\Delta Y1}=0,9$ e $\lambda_{\Delta Y2}=0,9$. A redução de $\lambda_{\Delta Y}$ de 1 para 0,9; desloca a base de regras para o centro da figura 17 acelerando as transições de referência (retardando ações corretivas), porém produzindo sobrelevação em todas as transições (figura 51).

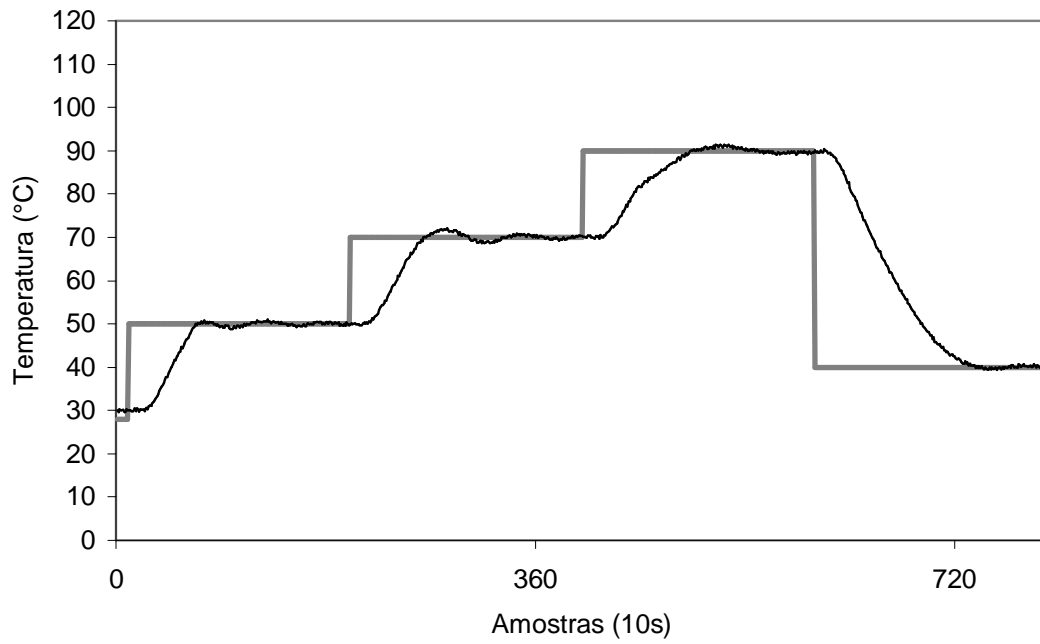


Figura 51 – Temperatura: experimento 7.

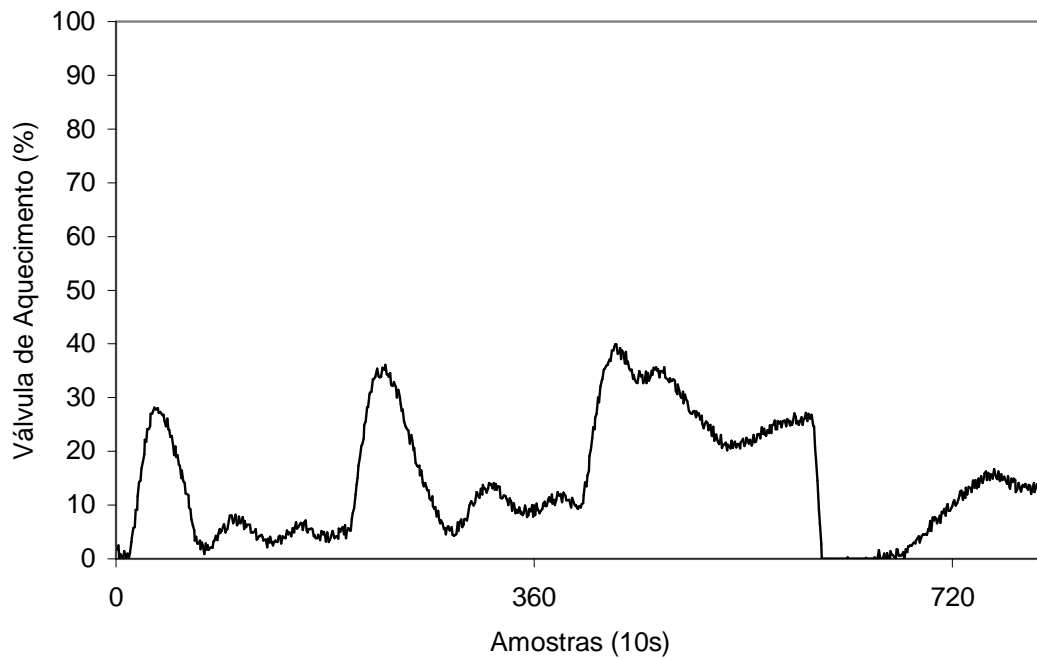


Figura 52 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 7.

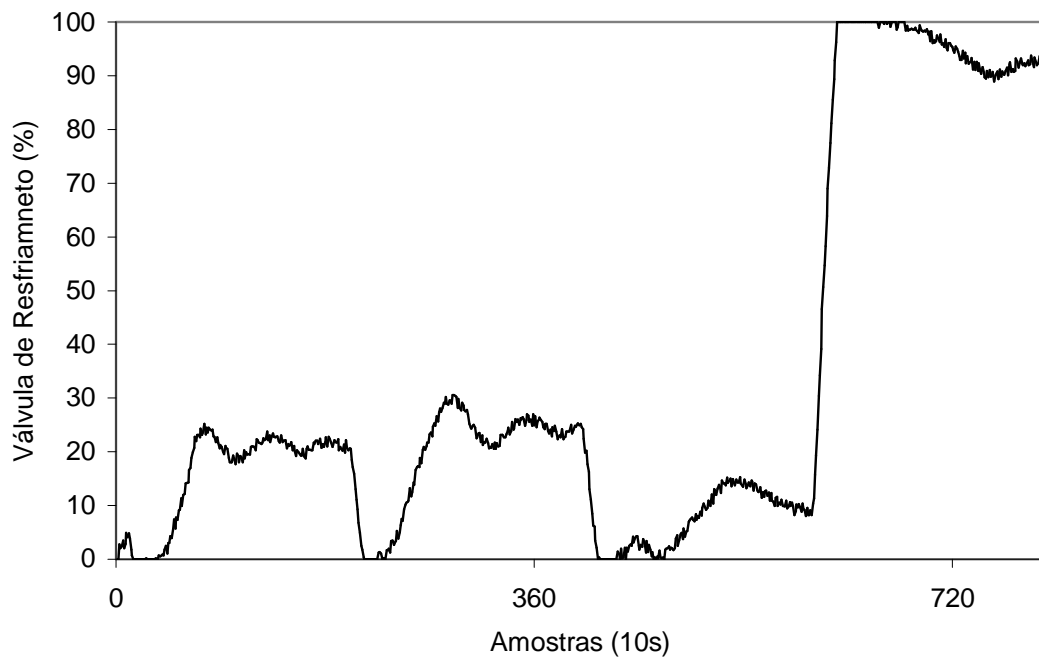


Figura 53 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 7.

Para acentuar o caráter antecipativo dos controladores, os parâmetros λ_{E1} e λ_{E2} foram reduzidos de 1 para 0,9 e foram mantidos os parâmetros do experimento 7, caracterizando o experimento 8. Os resultados para este experimento estão dispostos nas figuras 54, 55 e 56. Observando a transição entre 70° C e 90° C, ocorreu a diminuição da sobrelevação e aumento do tempo de elevação, características importantes para a qualificação de um sistema de controle.

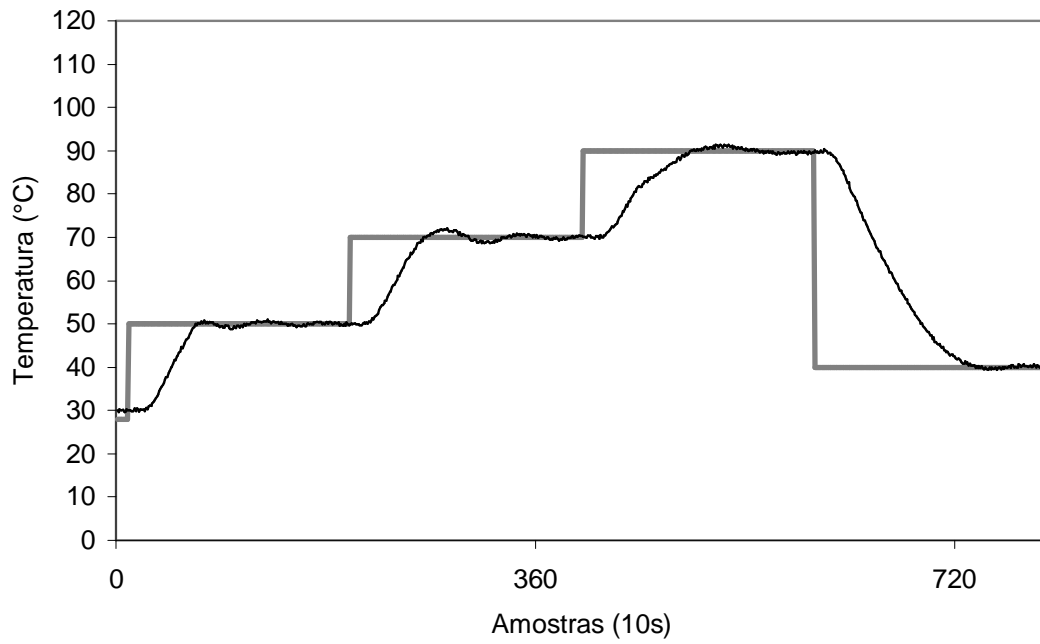


Figura 54 – Temperatura: experimento 8.

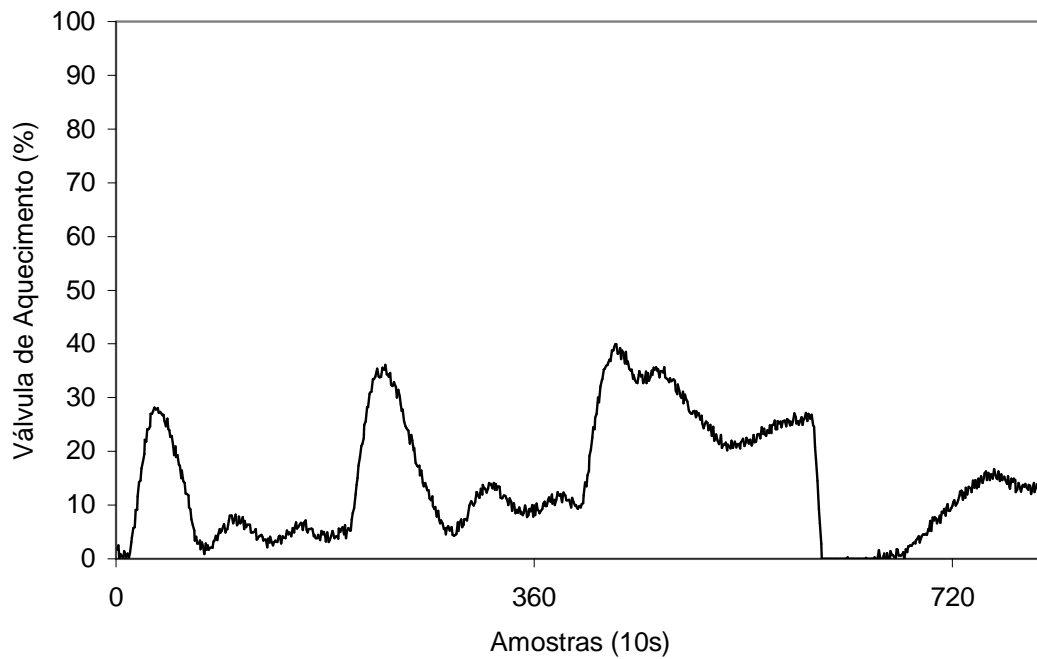


Figura 55 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 8.

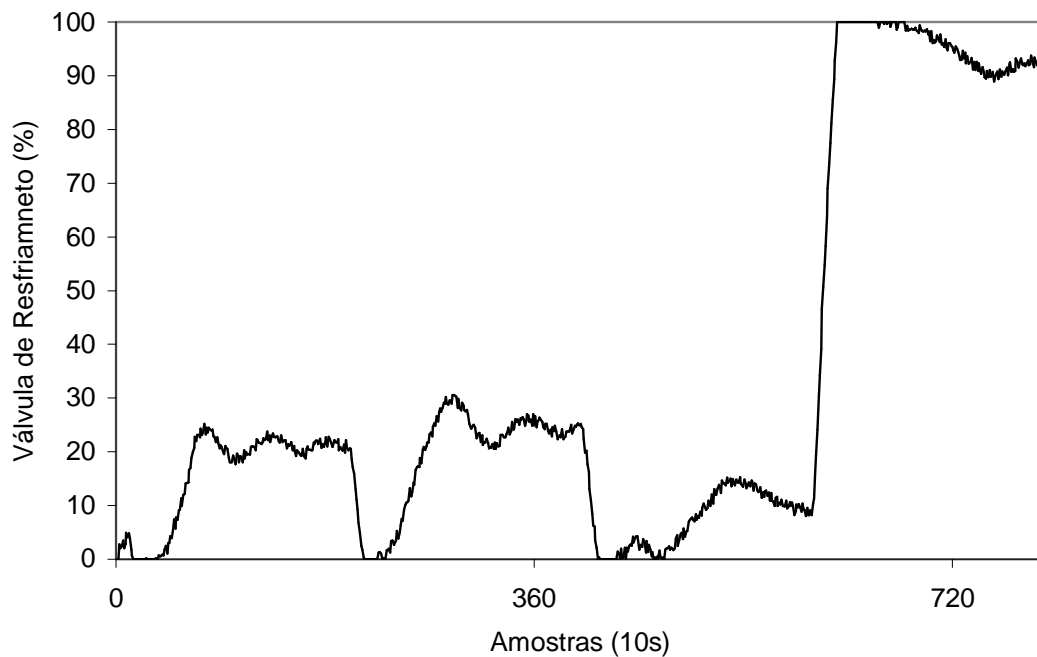


Figura 56 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 8.

No experimento 9, $\lambda_{\Delta Y1}$ e $\lambda_{\Delta Y2}$ foram ajustados para 1,1, enquanto λ_{E1} e λ_{E2} foram alterados para 0,9. Foram mantidos $\lambda_{\Delta U1}$ e $\lambda_{\Delta U2}$ em 0,1. Conforme a figura 57, a incidência de sobrelevação foi reduzida com um sensível aumento nos tempos de elevação. Segundo a figura 17, a redução/aumento de λ_E e $\lambda_{\Delta Y}$ deslocam a base de regras nos sentidos vertical e horizontal, respectivamente. A redução de λ_E em 10% e o aumento de $\lambda_{\Delta Y}$ na mesma proporção promove o deslocamento da base de regras em sentido diagonal. As ações de controle, figuras 58 e 59, mostram uma redução no consumo de água de resfriamento em função da redução da ocorrência de sobrelevação. De forma semelhante o consumo de vapor também foi reduzido. Durante a transição para 90° C tornou-se evidente a ação antecipativa exagerada, aumentando o tempo de elevação nesta transição. O experimento 10 apresenta o ajuste do controlador para esta transição.

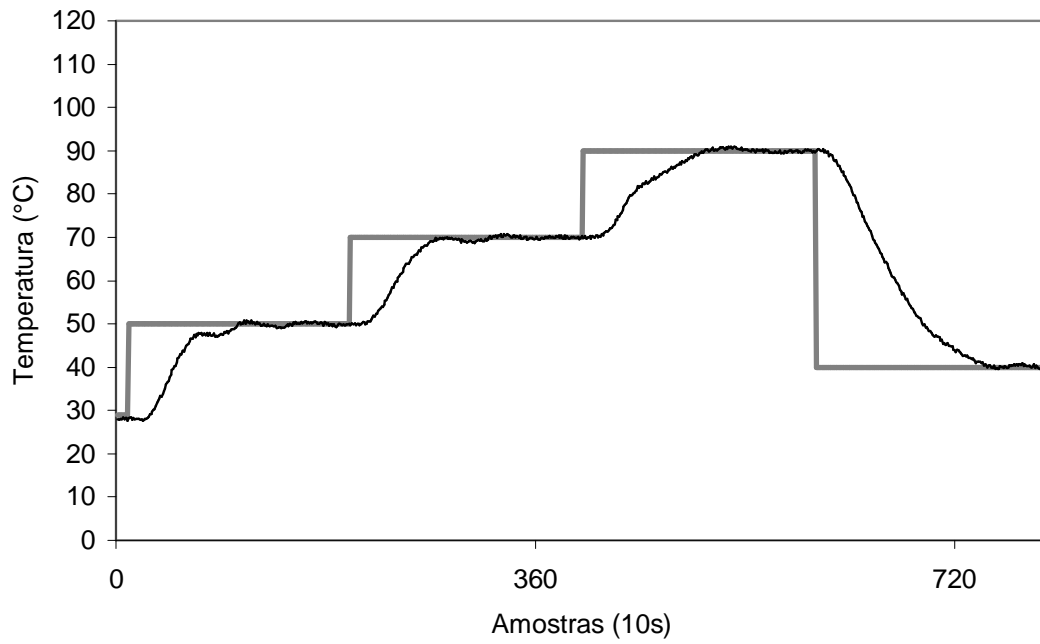


Figura 57 – Temperatura: experimento 9.

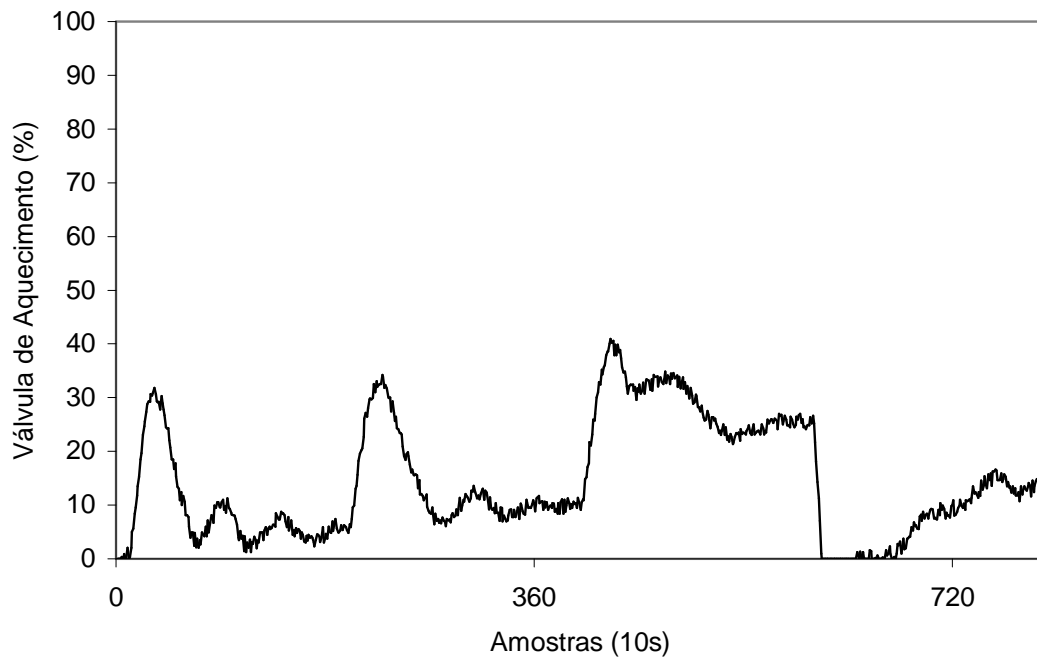


Figura 58 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 9.

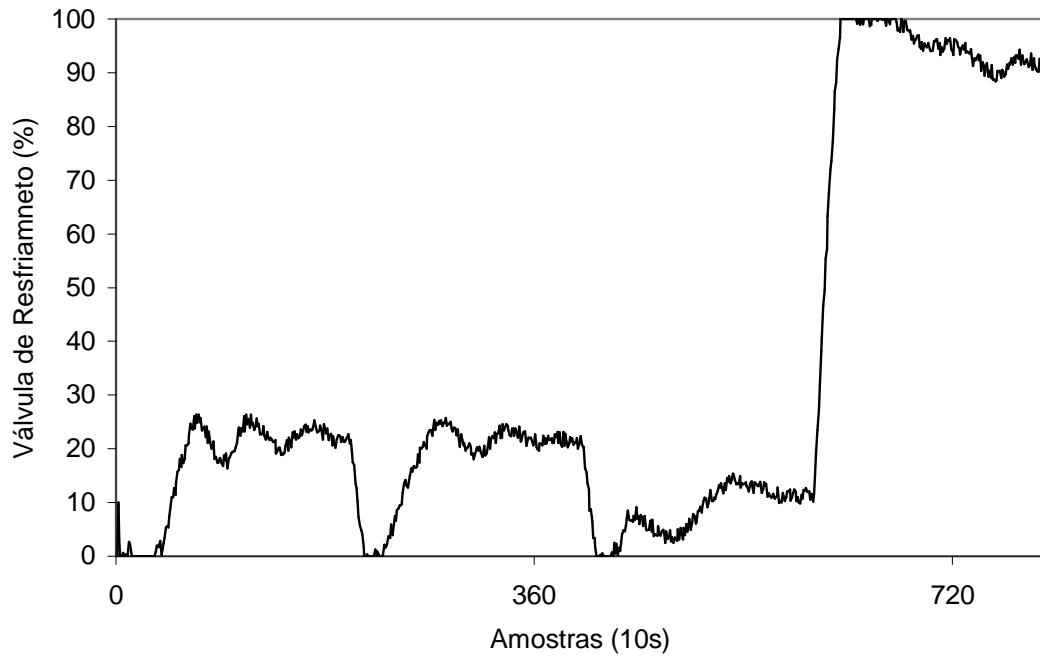


Figura 59 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 9.

No ajuste para melhora do desempenho do controlador na transição entre 40° C e 90° C (experimento 10) foram utilizados os parâmetros $\lambda_{E1}=\lambda_{E2}=1,1$ e $\lambda_{\Delta Y1}=\lambda_{\Delta Y2}=0,9$ até a amostra 360, a partir da qual foram adotados os valores $\lambda_{E1}=\lambda_{E2}=1,2$ e $\lambda_{\Delta Y1}=\lambda_{\Delta Y2}=0,8$. Como resultado deste experimento, houve a redução do tempo de elevação. Porém uma condição oscilatória na temperatura de 40° C foi obtida.

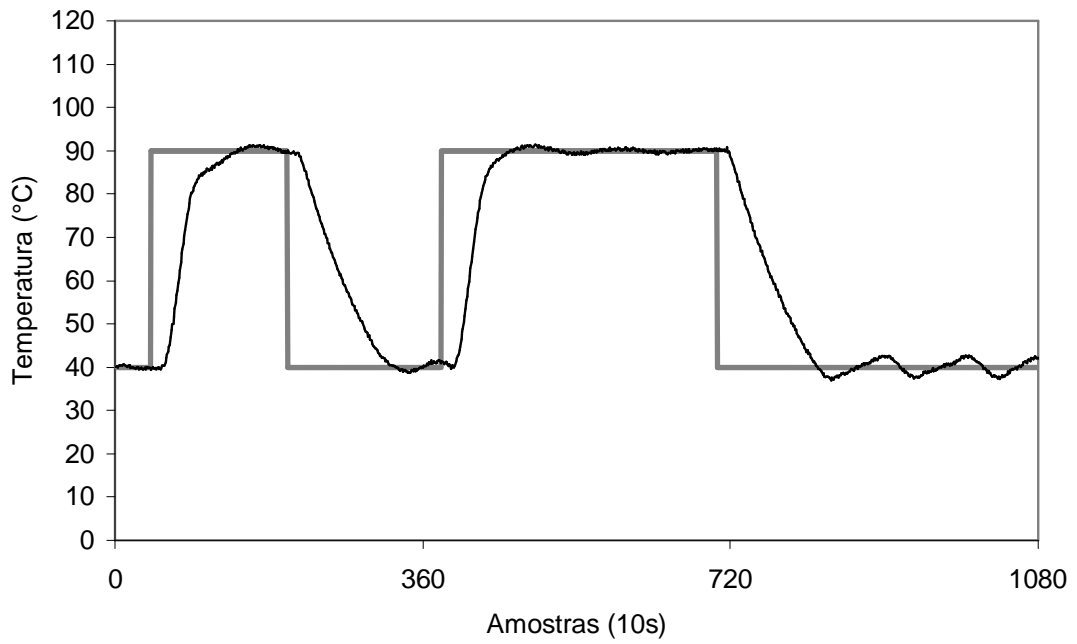


Figura 60 – Temperatura: experimento 10.

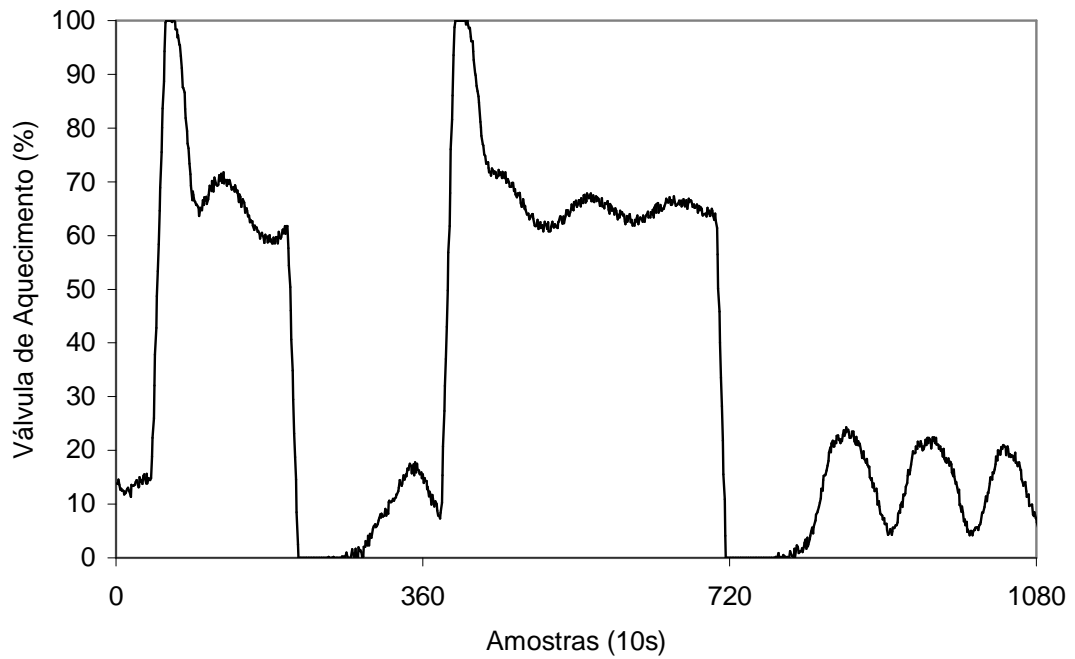


Figura 61 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 10.

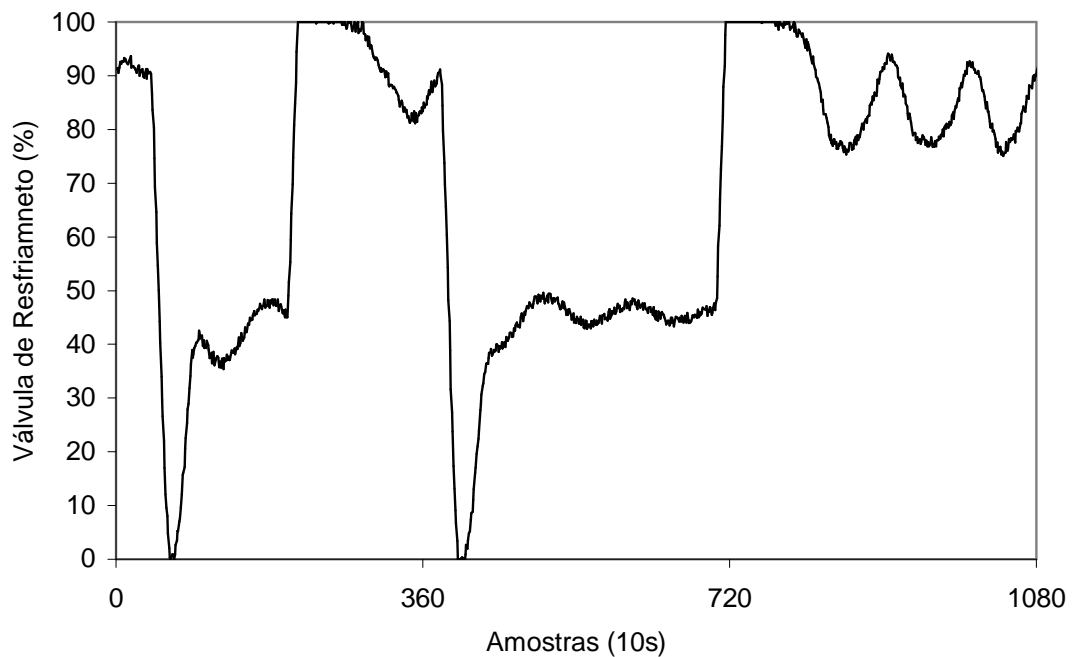


Figura 62 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 10.

Os 10 experimentos realizados indicam que a manipulação dos parâmetros de deslocamento para as variações das ações de controle das correntes de aquecimento e resfriamento são eficientes, desde que os fatores de escala sejam efetivamente determinados a partir dos limites físicos do sistema a ser controlado. Constituem-se em parâmetros de ajuste, relativamente, simples e facilmente implementáveis. Na próxima seção será abordada a aplicação do algoritmo proposto para o ajuste dos conjuntos difusos através da razão de distribuição.

6.3 Ajuste de controladores difusos através da razão de distribuição

Nos experimentos realizados nesta seção são analisadas as influências das razões de distribuição sobre o comportamento do sistema de controle para as mesmas condições dos experimentos anteriores. Para permitir uma análise comparativa, os experimentos somente foram iniciados quando a pressão no

sistema de aquecimento atingiu $6\text{kg}/\text{cm}^2$ e a temperatura inicial do sistema apresentava-se entre 28 e 32°C .

No experimento 11, foram aplicadas as razões de distribuição $\delta_{E1}=\delta_{E2}=\delta_{\Delta Y1}=\delta_{\Delta Y2}=1$ e $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2$ (figura 63). As figuras 64, 65 e 66 apresentam a saída do sistema e as ações de controle aplicadas pelos controladores, cuja comparação com os experimentos 1 e 2 mostra uma redução na magnitude das variações das ações de controle. Com base nisto o experimento 12 foi direcionado ao aumento de $\delta_{\Delta U1}$ e $\delta_{\Delta U2}$ para 3.

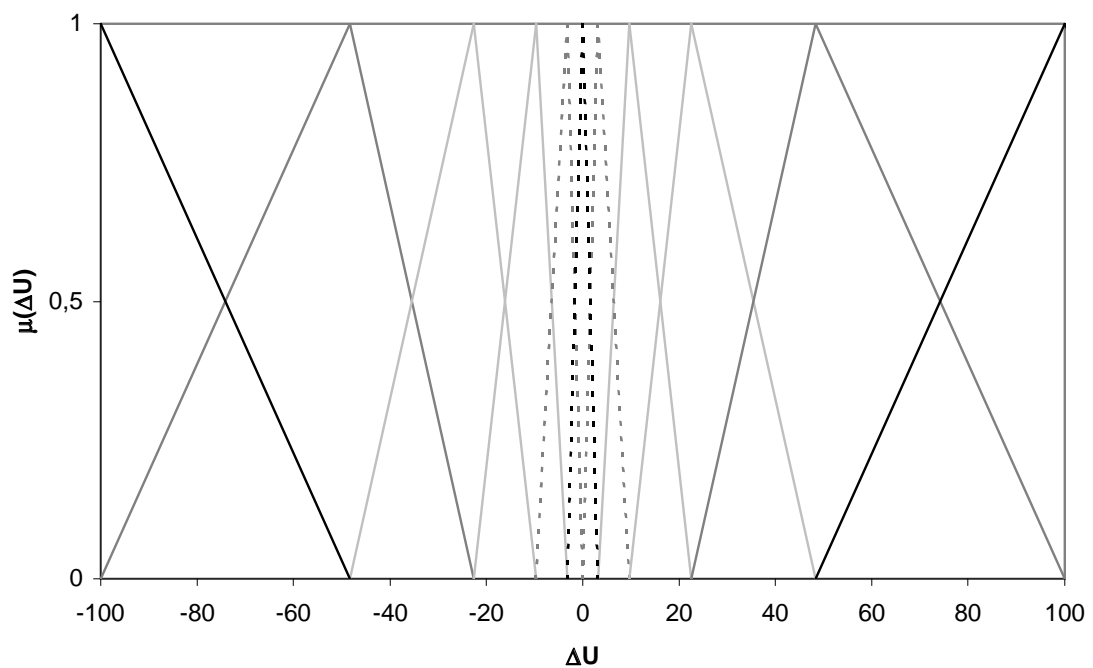


Figura 63 – Conjuntos difusos para $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2$.

Para $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=3$ resultam os conjuntos difusos da figura 67 .

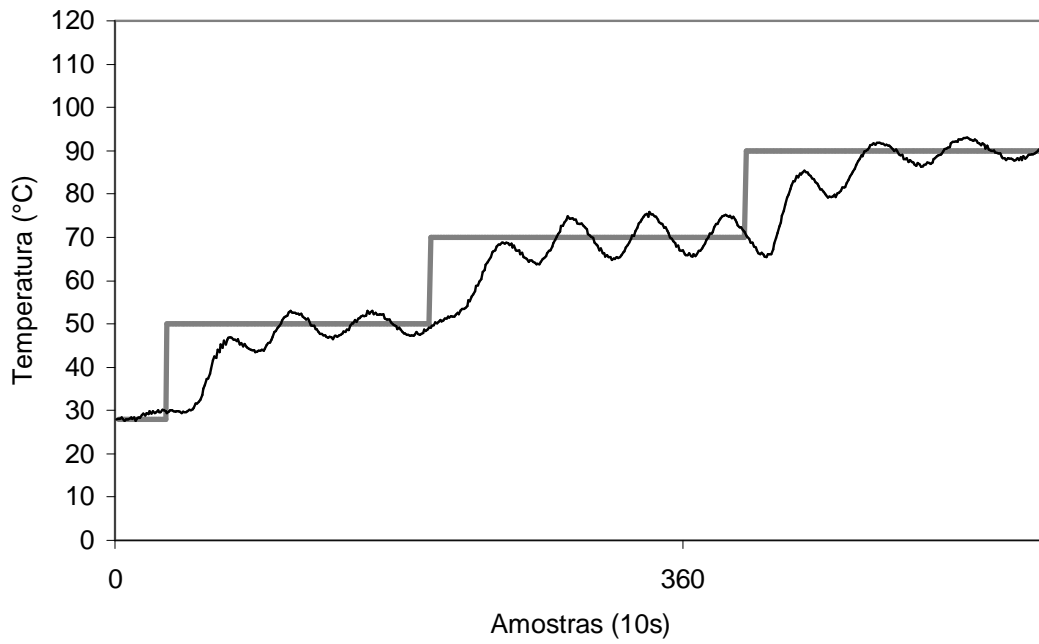


Figura 64 – Temperatura: experimento 11.

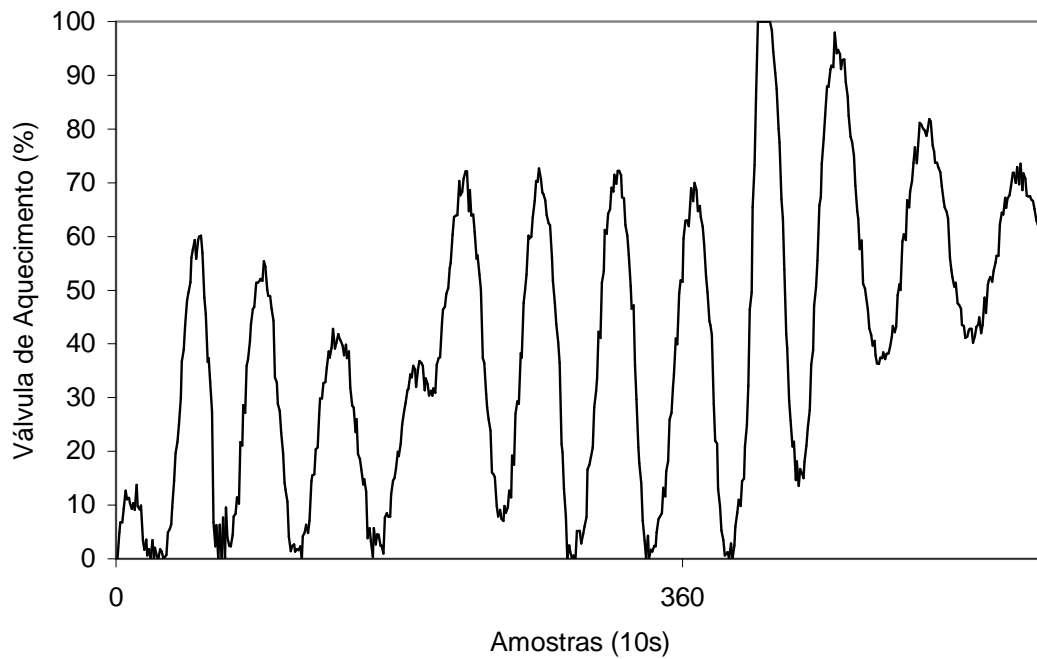


Figura 65 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 11.

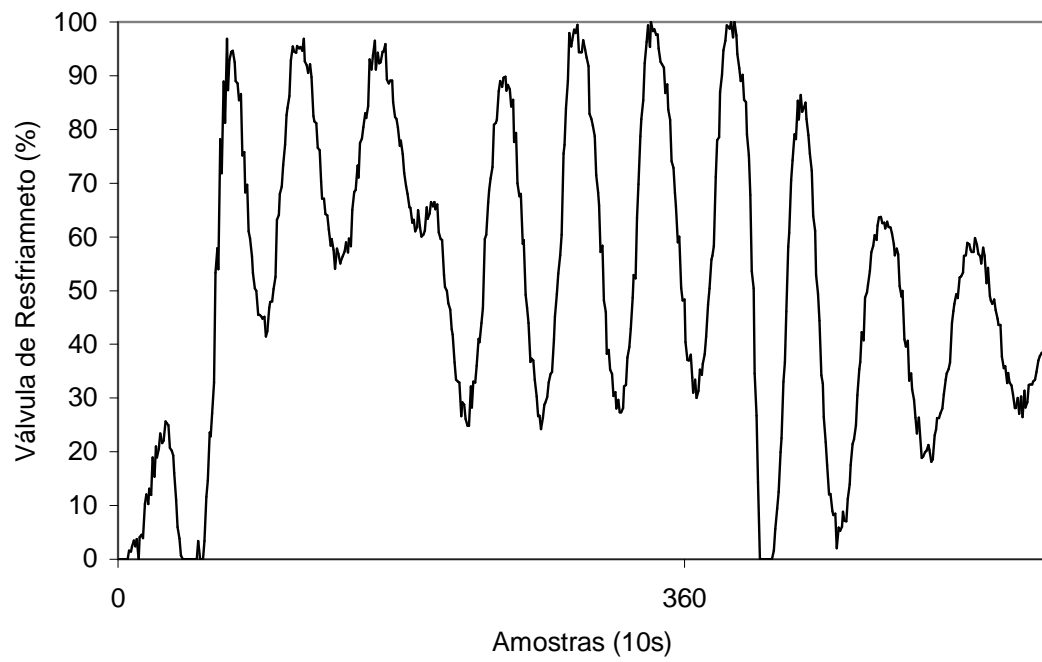
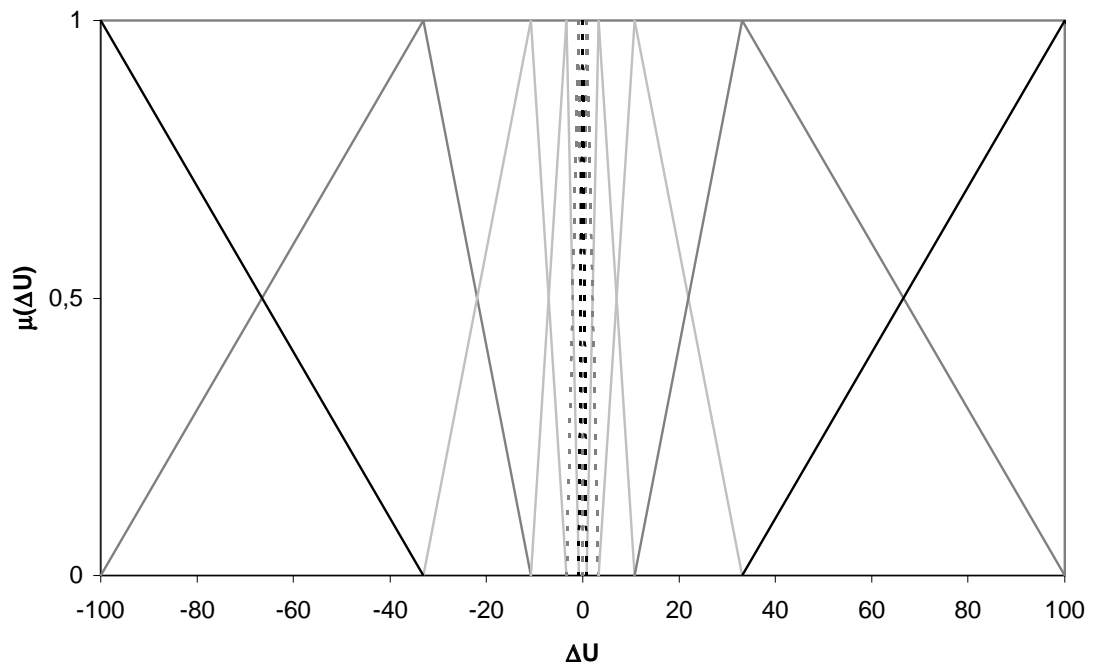


Figura 66 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 11.

Figura 67 – Conjuntos difusos para $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=3$.

A saída do sistema (figura 68) e as ações de controle (figuras 69 e 70), para os novos valores de razão de distribuição, aproximaram-se da referência com velocidade maior que a capacidade do controlador em corrigir esta trajetória, resultando em sobrelevação com oscilação amortecida. Contudo o aumento da razão de distribuição de 2,0 para 3,0 resultou em uma melhora do desempenho do controlador. A observação da figura 67 indica que os conjuntos N1, Z e P1 estão praticamente sobrepostos concentrando as regras com caráter corretivo em torno de ± 1 concentrando também a sensibilidade do controlador. Para evidenciar este fato, o experimento 13 foi executado com razão de distribuição de 4,0.

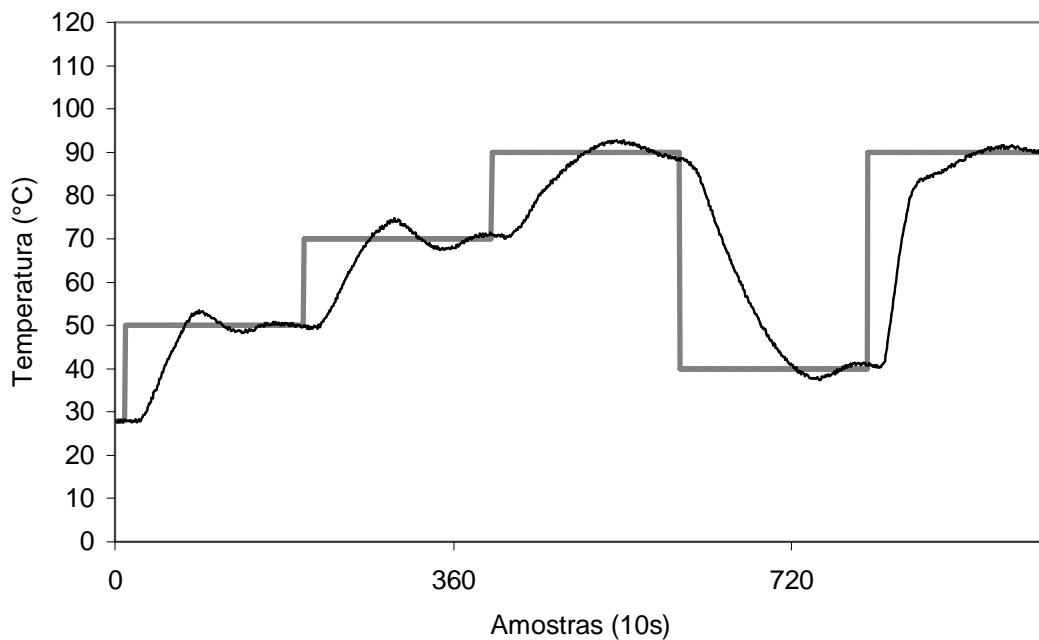


Figura 68 – Temperatura: experimento 12.

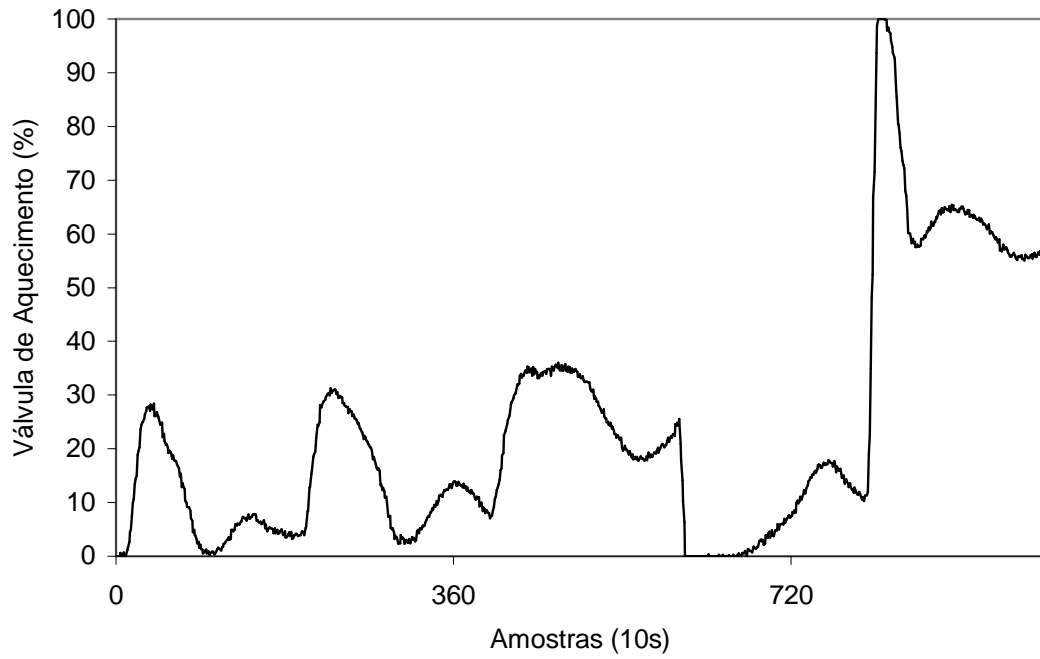


Figura 69 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 12.

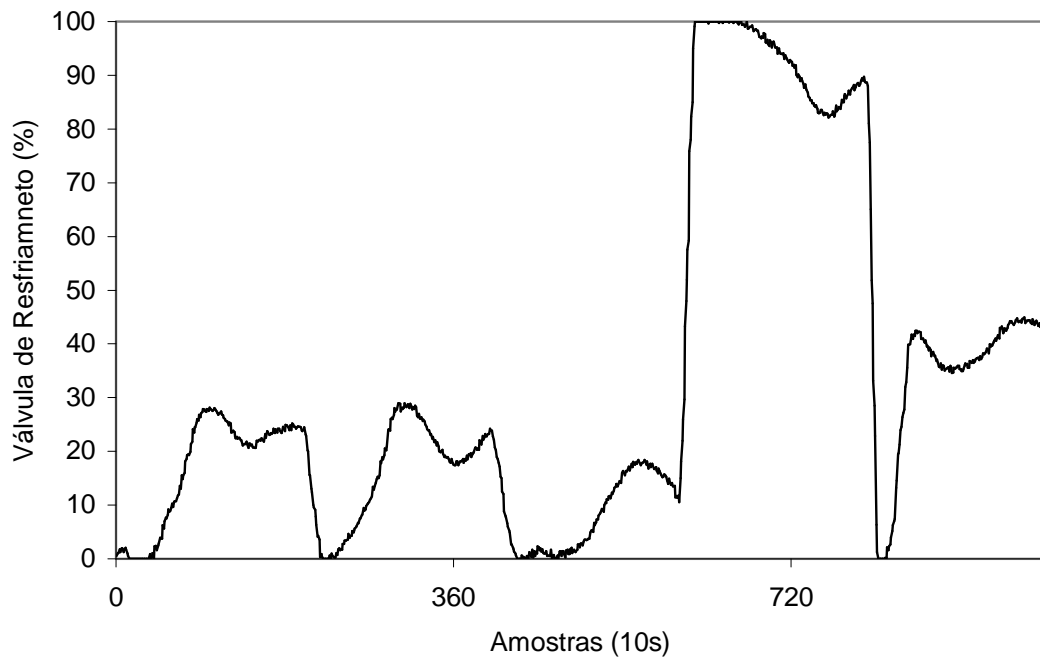


Figura 70 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 12.

As figuras 71, 72 e 74 confirmam que ocorre deslocamento da sensibilidade do controlador, resultando em sobrelevação, aumento de tempo de elevação e oscilação.

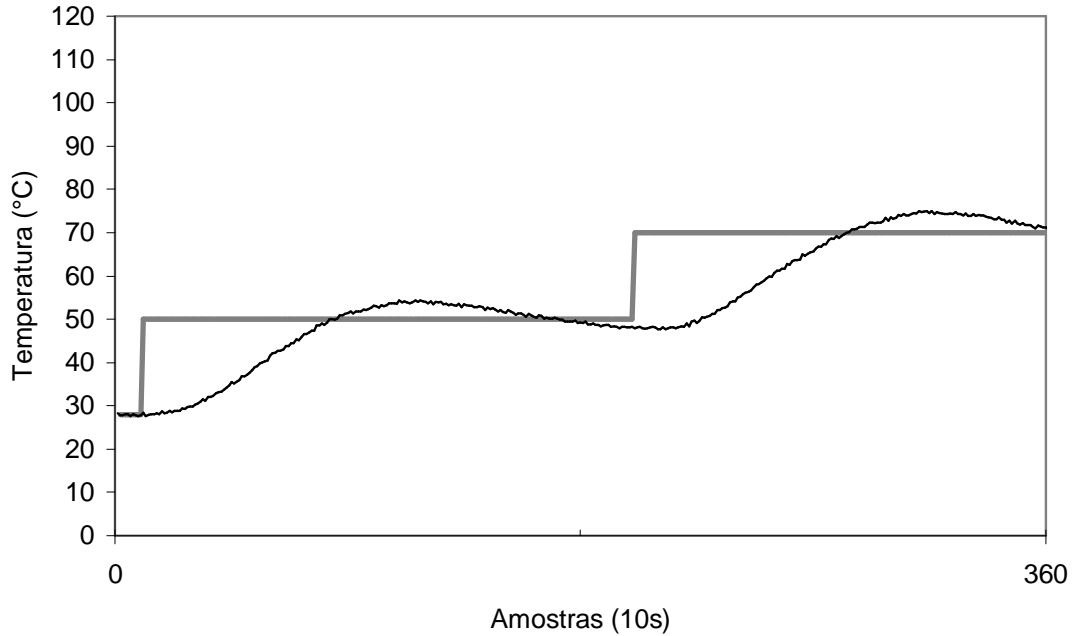


Figura 71 – Temperatura: experimento 13.

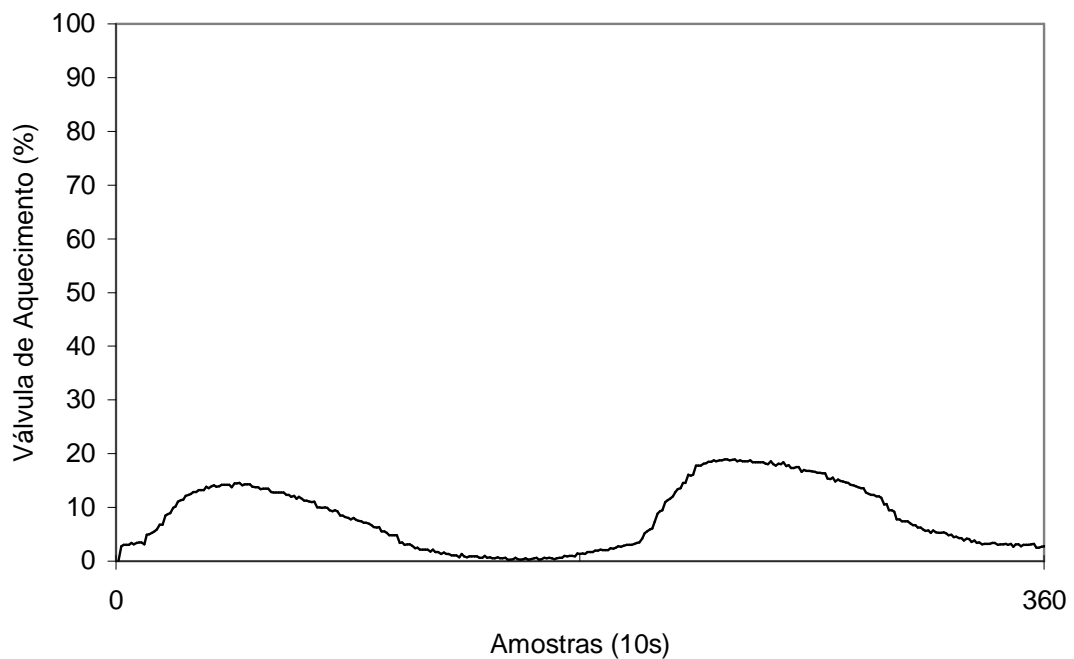


Figura 72 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 13.

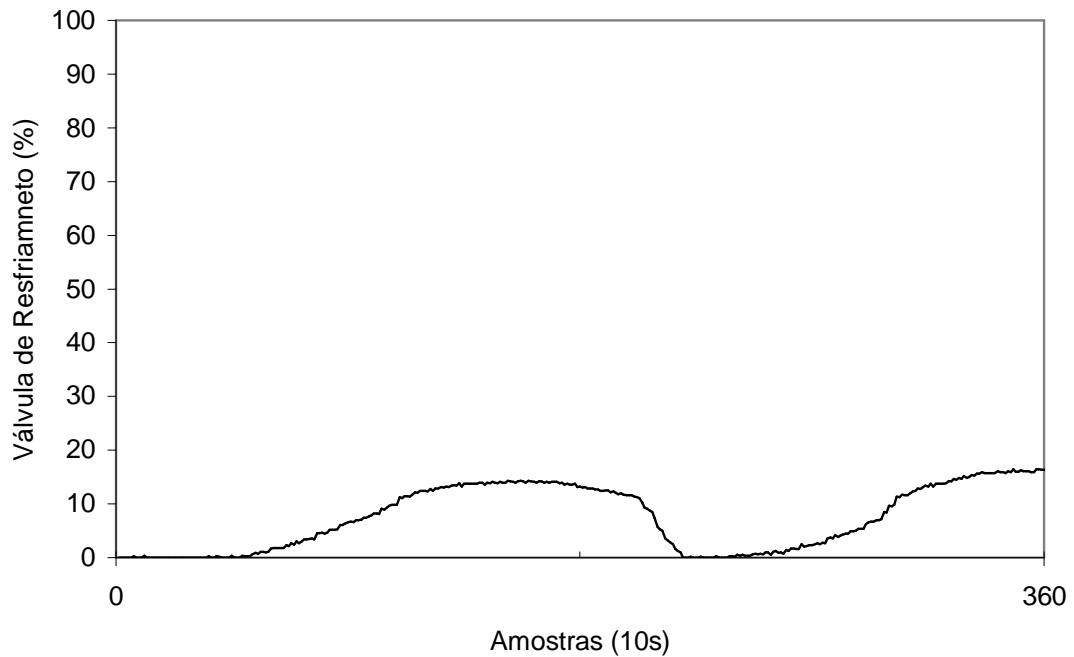


Figura 73 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 13.

A vantagem principal do ajuste fino do sistema de controle através das razões de deslocamento reside na possibilidade de formar ações de controle mais suaves em torno do ponto de operação, mantendo a possibilidade de aplicar ações mais agressivas. Nos experimentos 11, 12 e 13, condições oscilatórias são obtidas, pois altos valores de razão de deslocamento são necessários para eliminar a oscilação em torno do ponto de operação, porém tais valores produzem sobrelevação e excessivo tempo de elevação. É necessário, portanto, atenuar a aplicação das regras em termos de ações de controle, através dos parâmetros de deslocamento ($\lambda_{\Delta U}$), realizando o ajuste fino através das razões de deslocamento (experimento 14).

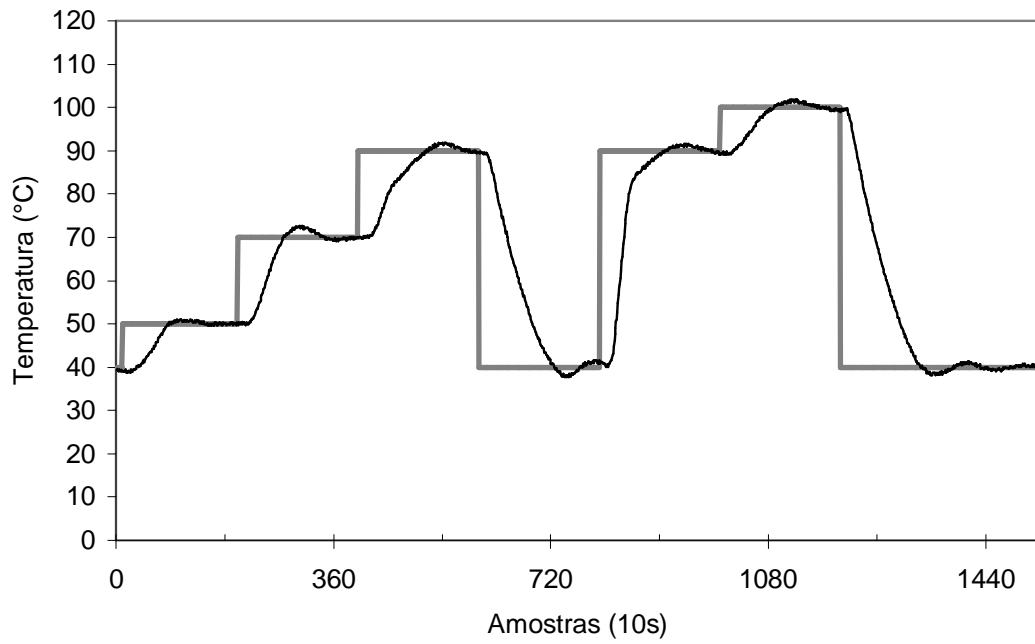


Figura 74 – Temperatura: experimento 14.

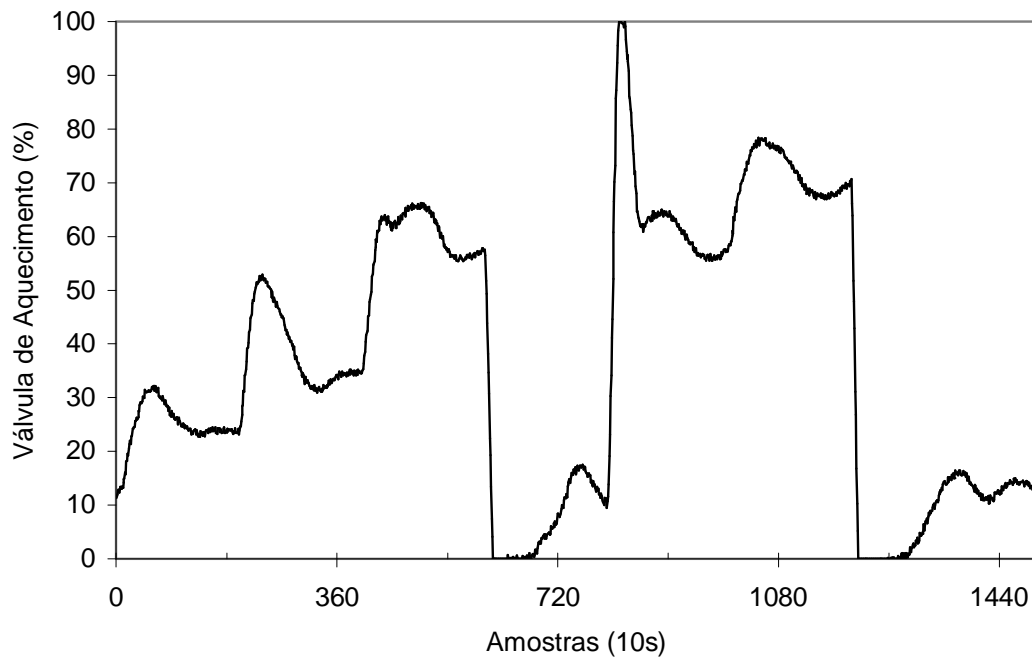


Figura 75 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 14.

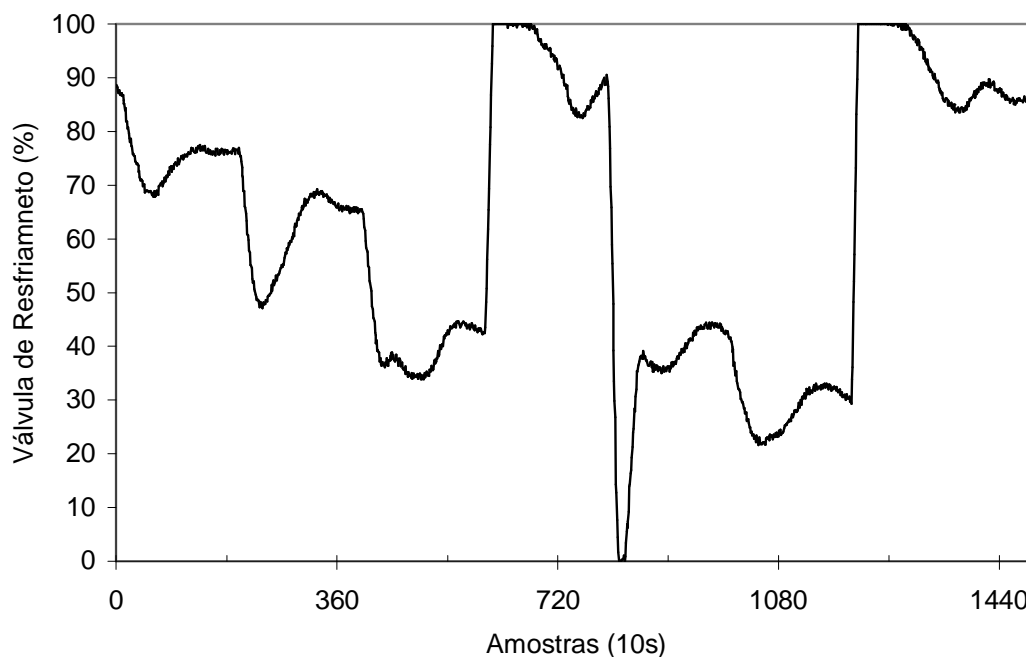


Figura 76 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 14.

O experimento 14 (figuras 74, 75 e 76) foi conduzido com $\lambda_{\Delta U1}=\lambda_{\Delta U2}=0,3$ e $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2$. Observam-se sobrelevações da ordem de 2-3° C, e ações de controle complementares, impondo consumo excessivo de água para resfriamento e vapor d'água. A seguir, estas alterações serão exploradas com uma nova base de regras.

6.4 Alteração da base de regras.

Os experimentos que seguem foram conduzidos no tanque de mistura sem reação química, com base nas regras estabelecidas nas tabelas 12 e 15, com o propósito de reduzir o consumo energético do sistema. Foram analisados os comportamentos a partir das alterações dos parâmetros de deslocamento e razões de distribuição, principalmente.

No experimento 15, todos os parâmetros foram restabelecidos às condições originais, tabela 16, sendo alterada a base de regras para o controlador da corrente

fria. As figuras 77, 78 e 79, se comparadas com as figuras 33, 34 e 35 do experimento 1, caracterizam controladores oscilatórios, porém na transição entre 30° C e 40° C, predominaram as regras que indicam o cancelamento do resfriamento. Devido às ações de controle excessivas, os parâmetros de deslocamento foram alterados para $\lambda_{\Delta U1}=\lambda_{\Delta U2}=0,1$; no experimento 16.

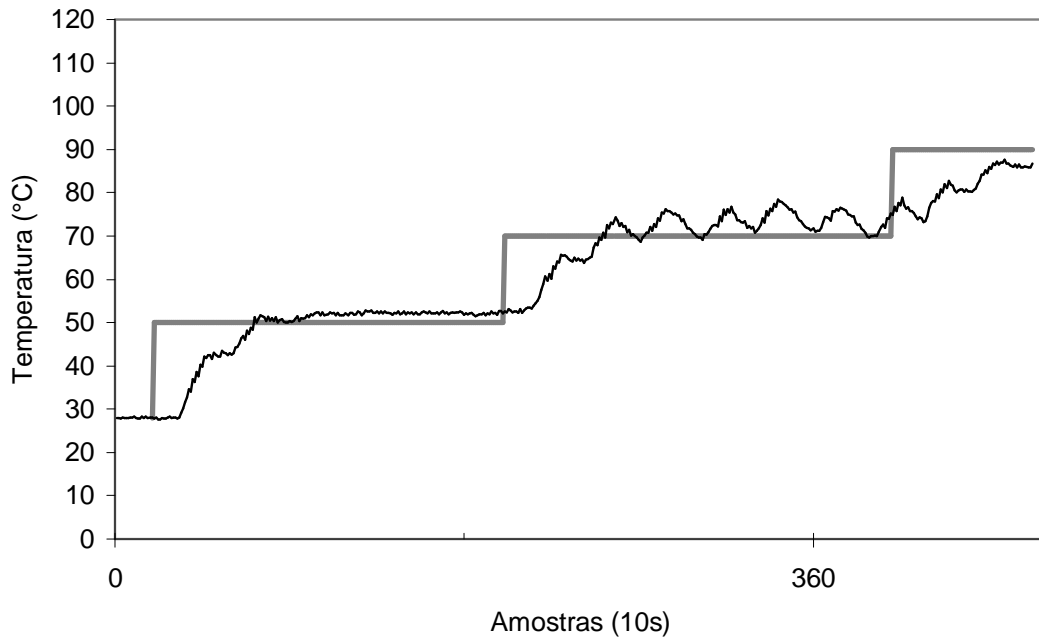


Figura 77 – Temperatura: experimento 15.

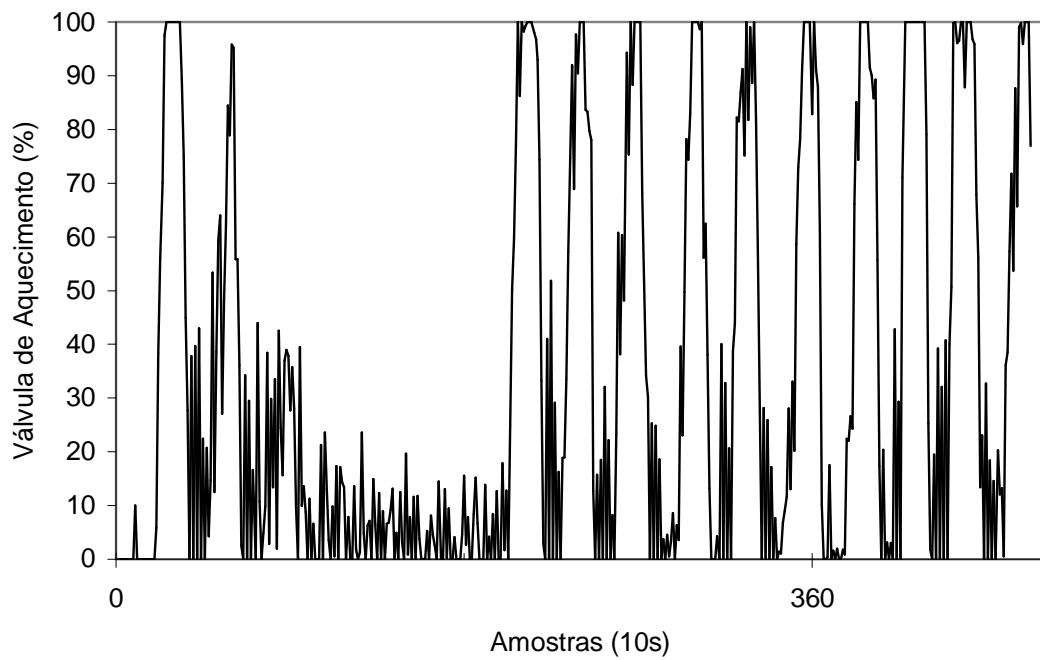


Figura 78 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 15.

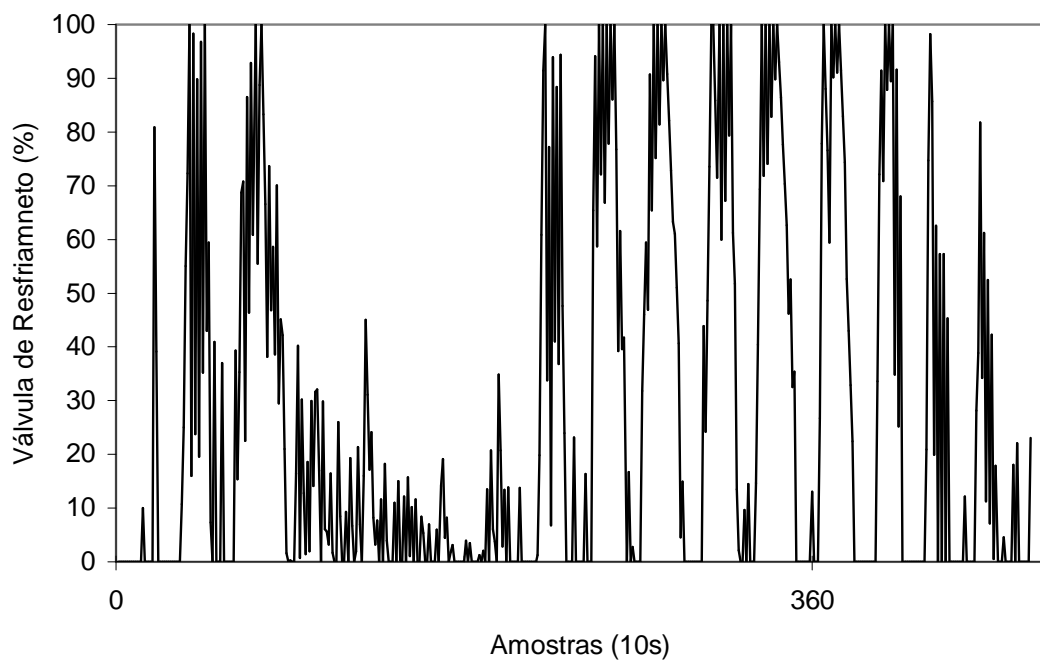


Figura 79 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 15.

O experimento 16 (figuras 80, 81 e 82) consiste na aplicação $\lambda_{\Delta U1}=\lambda_{\Delta U2}=0,1$; obtidos no experimento 4, para comparação com a nova base de regras. O consumo

de energia para aquecimento foi, extremamente, reduzido pelo fato da válvula de resfriamento permanecer fechada. Como trata-se de um sistema de pequeno porte, as perdas de calor pelas paredes do tanque de mistura e no sistema de aquecimento são pequenas e o sistema pode ser mantido com uma baixa quantidade de energia. Apenas em temperaturas acima de 90° C a perda de calor é expressiva, requerendo um fluxo de vapor de 15-20% da capacidade total do sistema. Observa-se, na figura 80, a presença de sobrelevação, entre 3° C e 5° C, em temperaturas de acima de 70° C.

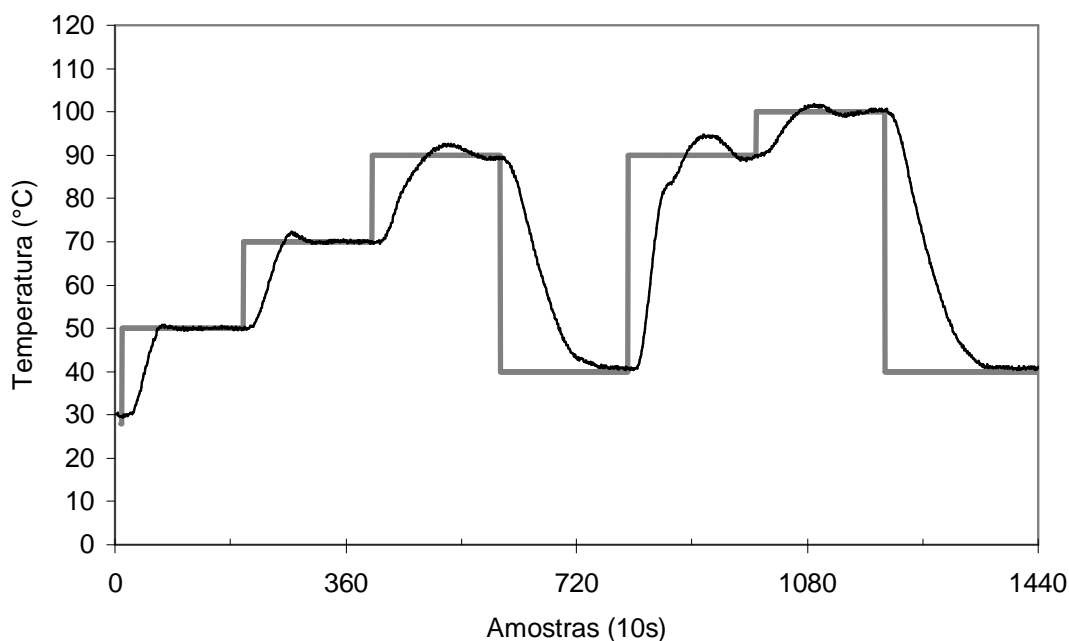


Figura 80 – Temperatura: experimento 16.

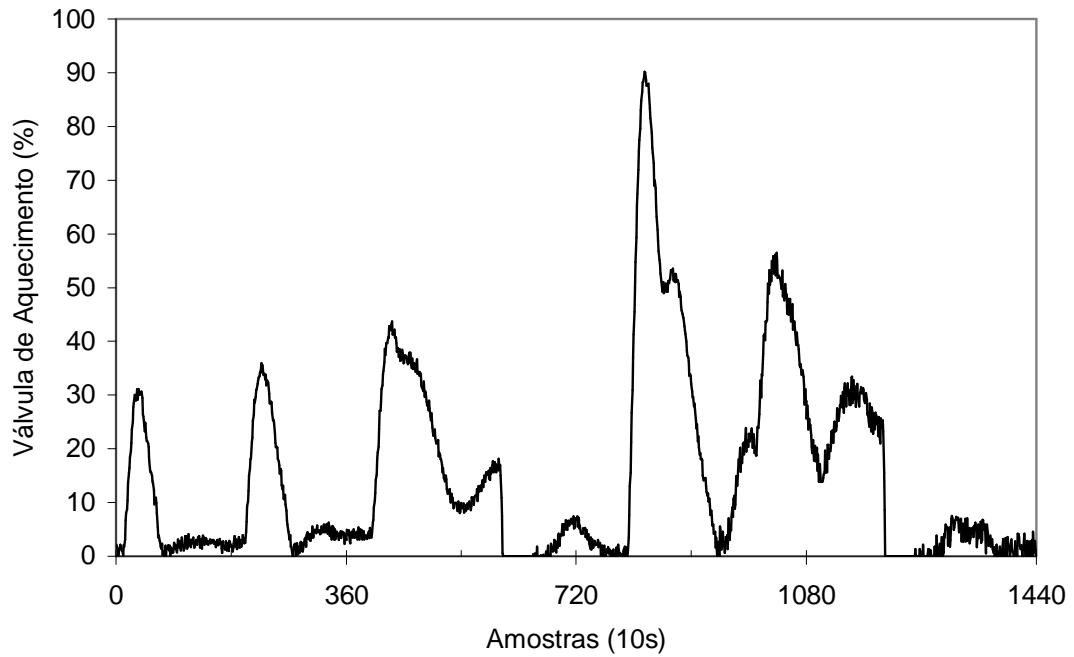


Figura 81 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 16.

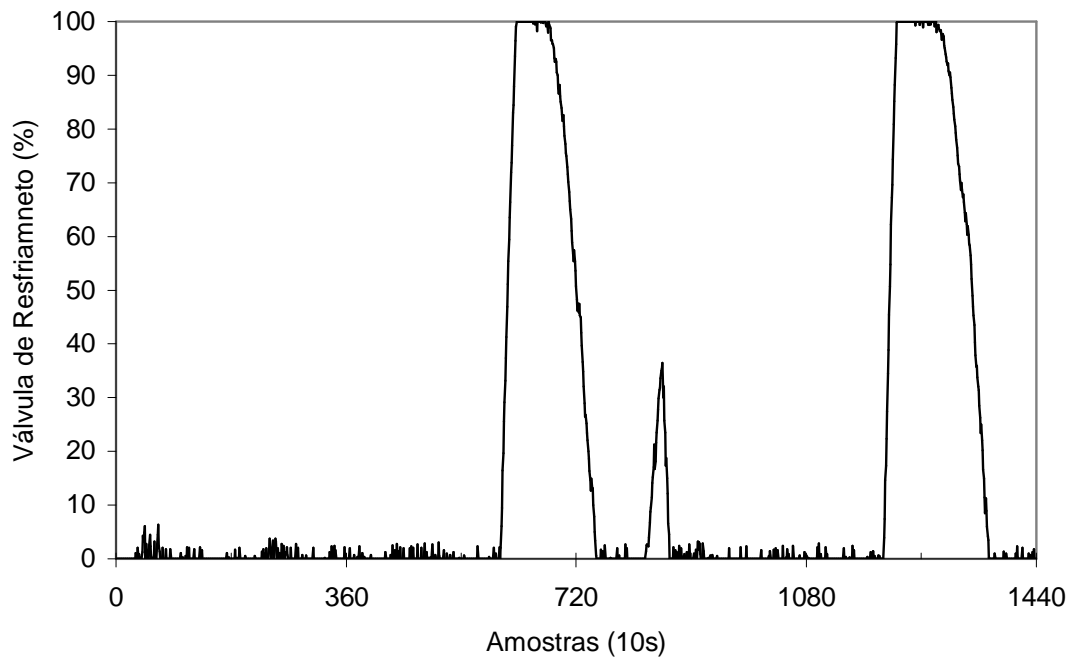


Figura 82 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 16.

O experimento 17 foi conduzido em duas etapas. Na primeira (figuras 83, 84 e 85) foram assumidos os parâmetros de deslocamento $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$ e na

segunda (figuras 86, 87 e 88) $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$. Observa-se que a mudança da base de regras torna mais difícil o ajuste, pois remove as ações que eliminam *off-set*. É exigindo, assim, um ajuste mais fino do controlador da corrente de aquecimento, do que o requerido para a corrente de resfriamento, para que esta atue apenas de forma corretiva. Como objetiva-se discriminar a forma de ajuste mais adequada, ajustes independentes somente serão realizados se grandes benefícios puderem ser obtidos.

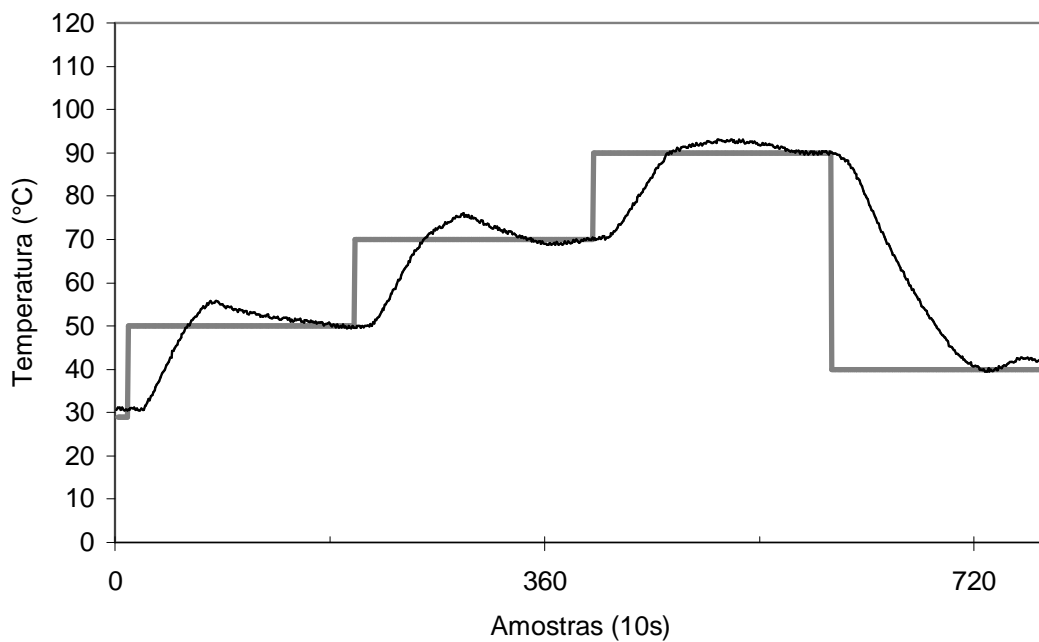


Figura 83 – Temperatura: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$.

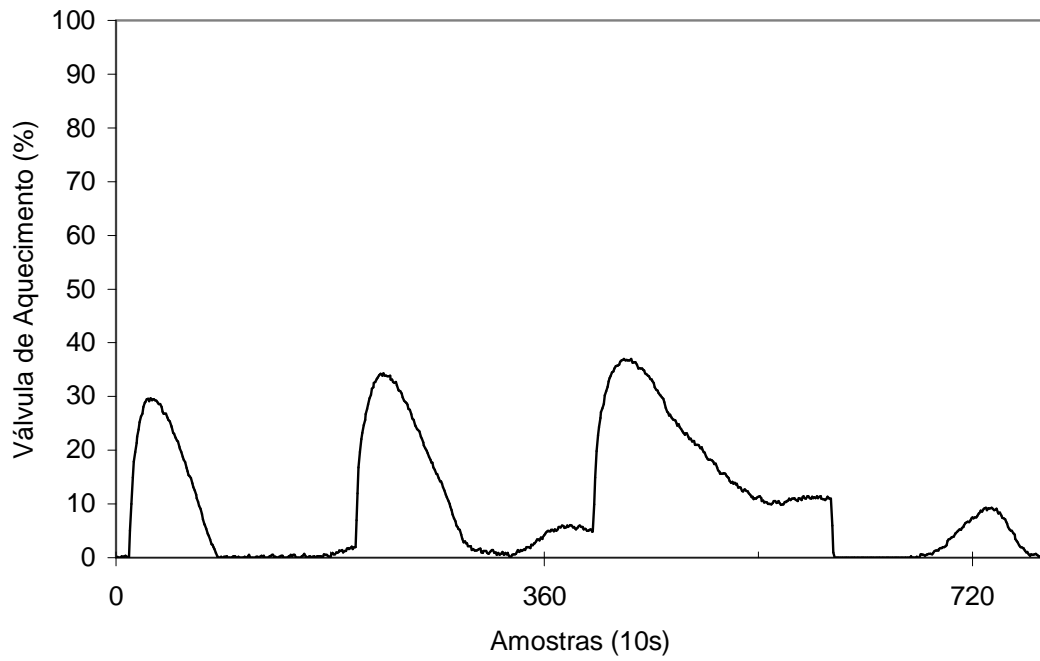


Figura 84 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$.

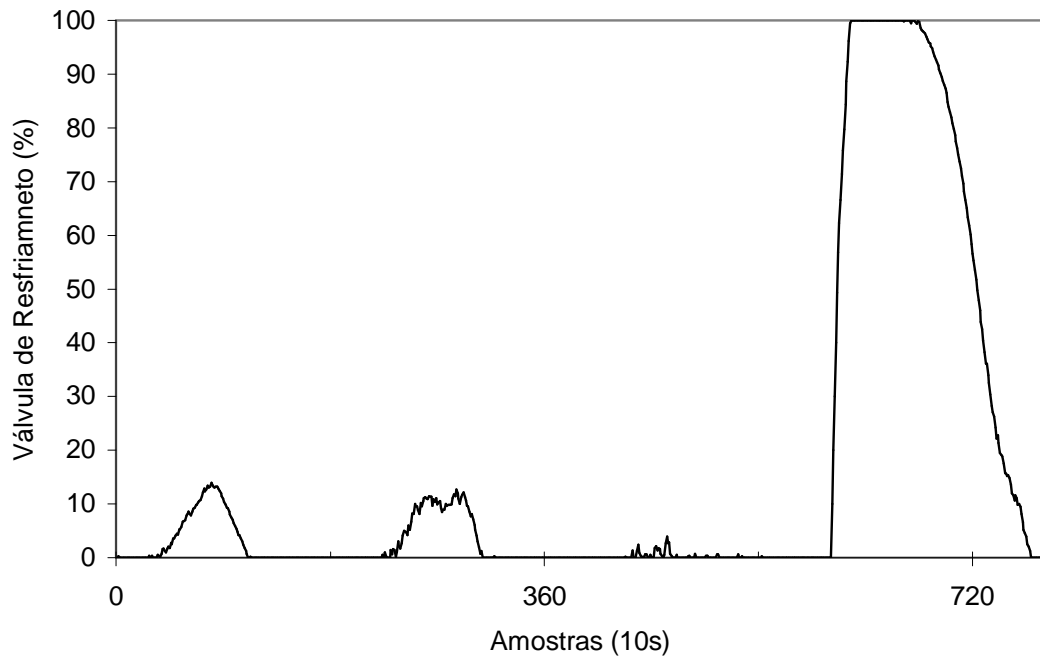


Figura 85 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,05$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,1$.

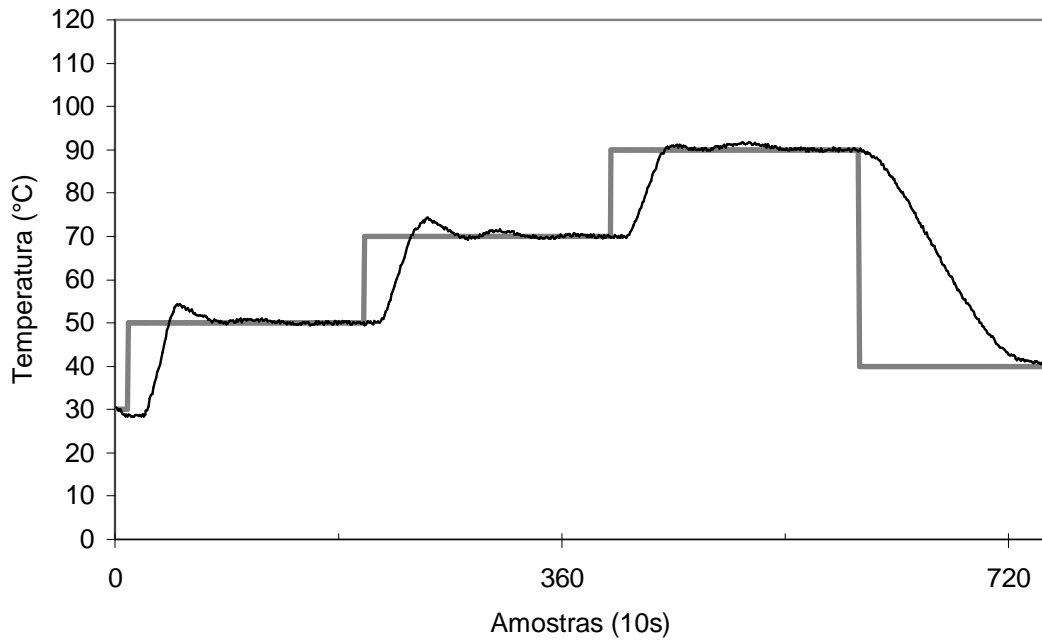


Figura 86 – Temperatura: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$.

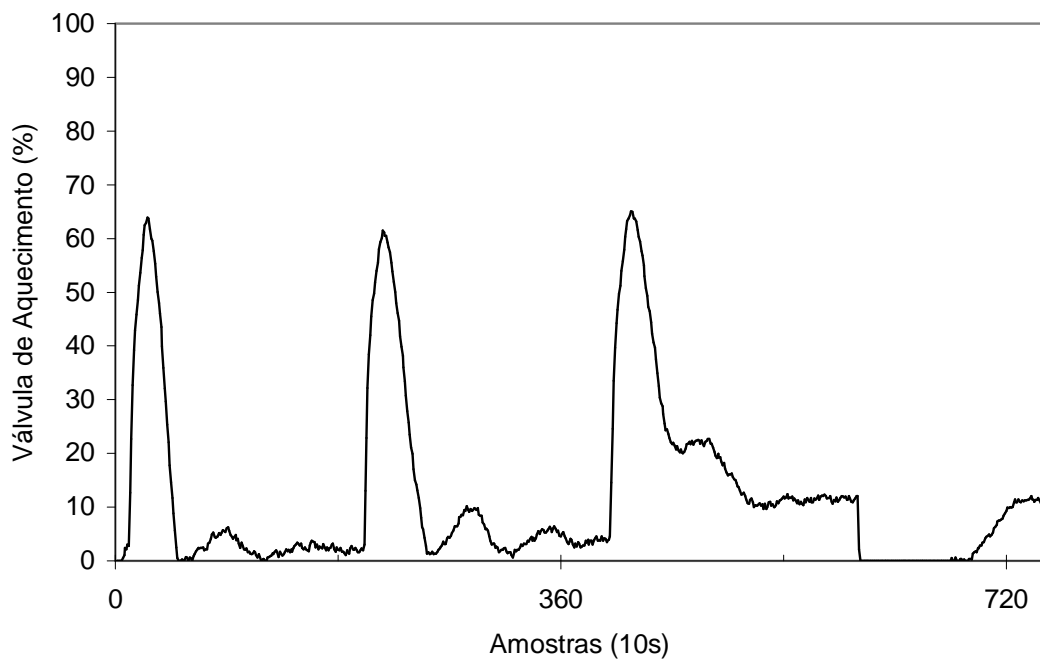


Figura 87 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$.

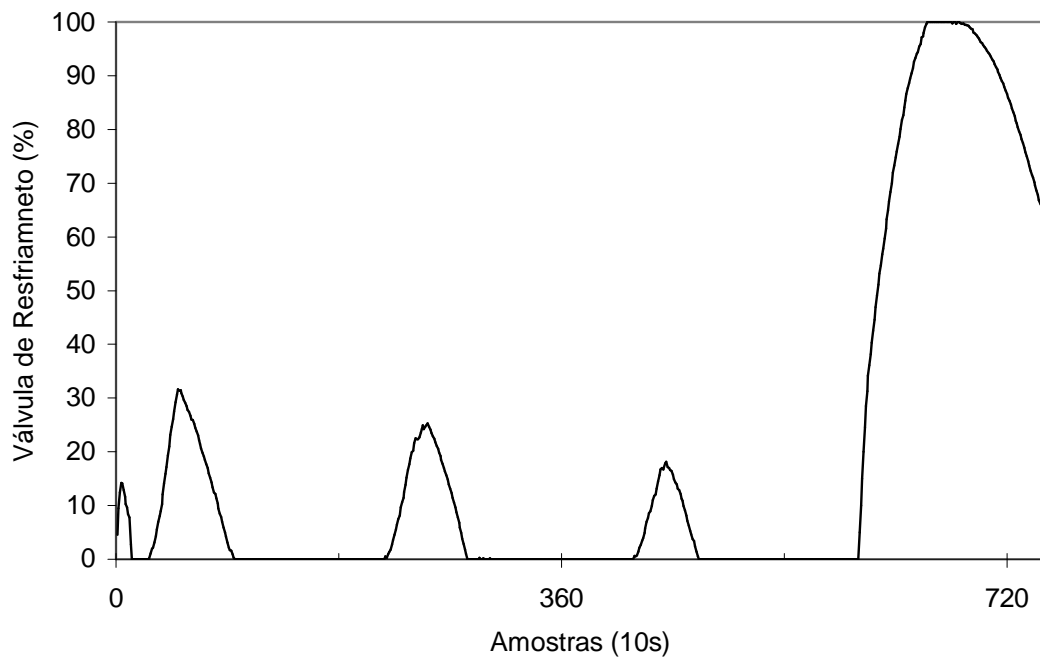


Figura 88 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 17; $\lambda_{\Delta U1}=0,1$ e $\lambda_{\Delta U2}=0,05$.

A partir dos resultados dos experimentos 16 e 17 conclui-se que não é possível remover as sobrelevações ajustando somente os parâmetros de deslocamento para as ações de controle. No experimento 18 (figuras 89, 90 e 91) foram utilizados os parâmetros definidos no experimento 16 ($\lambda_{\Delta U1}=\lambda_{\Delta U2}=0,1$) e foram assumidos:

- I) Entre as amostras 1 e 180: $\lambda_{E1}=\lambda_{E2}=0,8$ e $\lambda_{\Delta Y1}=\lambda_{\Delta Y2}=1$;
- II) Entre as amostras 181 e 360: $\lambda_{E1}=\lambda_{E2}=0,8$ e $\lambda_{\Delta Y1}=\lambda_{\Delta Y2}=1,2$;
- III) A partir da amostra 361: $\lambda_{E1}=\lambda_{E2}=0,8$ e $\lambda_{\Delta Y1}=\lambda_{\Delta Y2}=1,1$.

Para o último grupo de parâmetros foi possível a eliminação da sobrelevação sem alteração na trajetória do sistema, constituindo o grupo de parâmetros que pode ser utilizado.

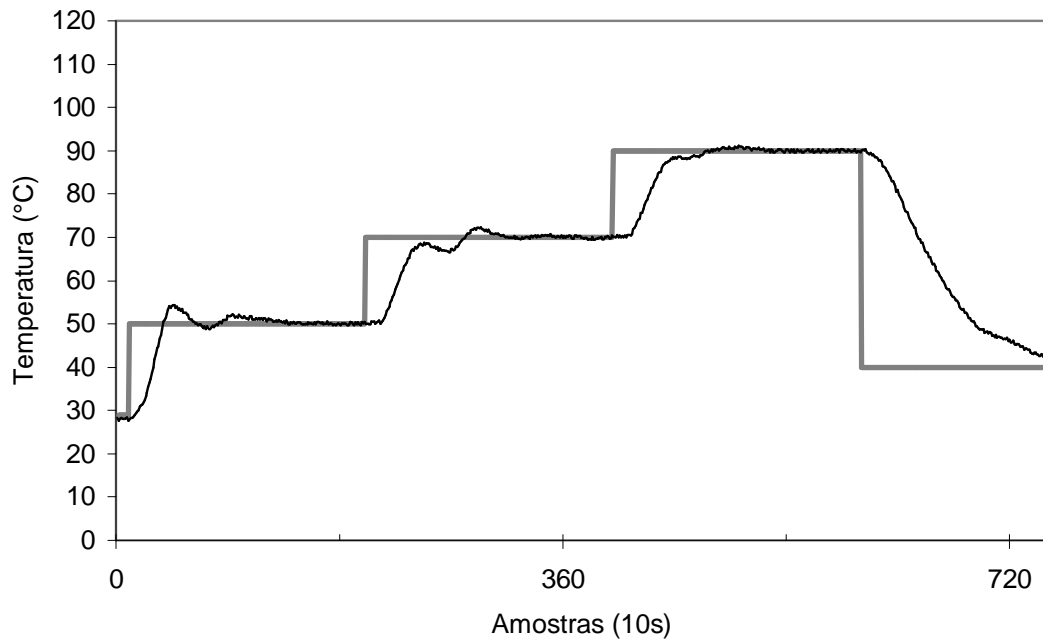


Figura 89 – Temperatura: experimento 18.

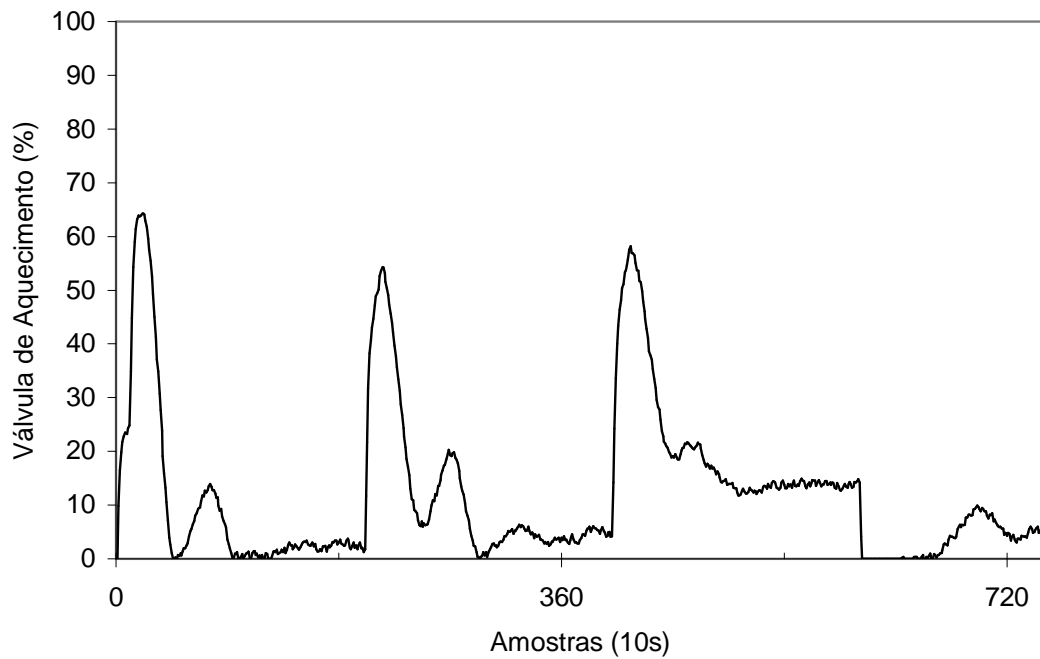


Figura 90 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 18.

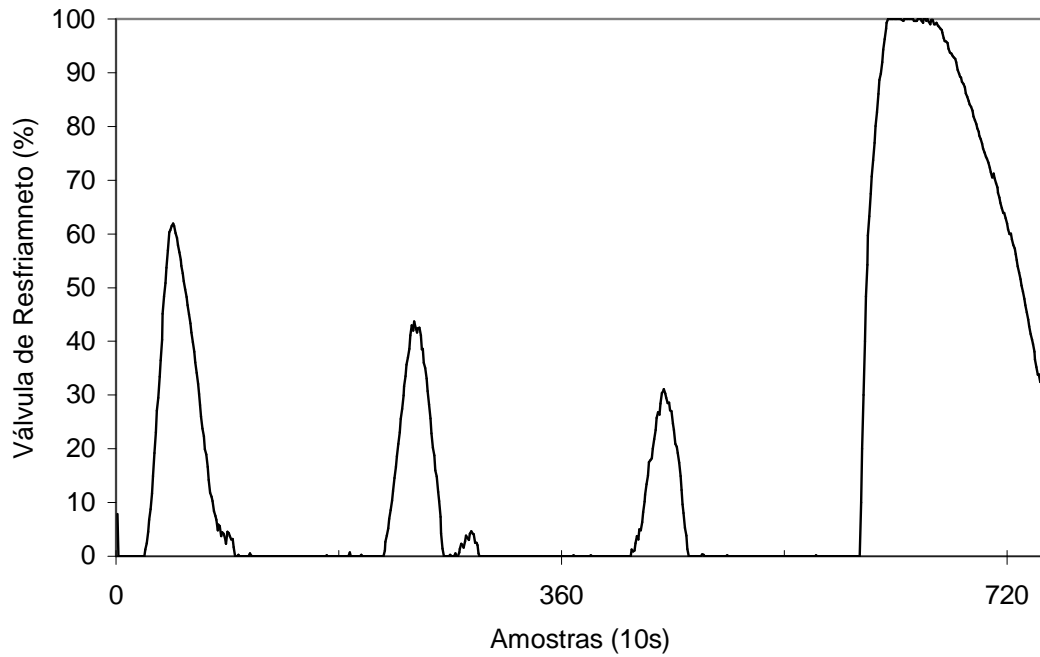


Figura 91 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 18.

No experimento 19, foram aplicados os parâmetros apresentados na tabela 16, exceto as razões de distribuição, as quais foram alteradas para $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2$ (figura 63). As figuras 92 , 93 e 94 apresentam a saída do sistema e as ações de controle obtidas com estes parâmetros. Embora em todas as transições seja observável uma antecipação inadequada das ações de controle que previnem sobrelevação, o valor de referência é mantido de forma estável, com ações de controle moderadas. A válvula de resfriamento é acionada somente para corrigir sobrelevações e para reduzir a velocidade de ascensão da temperatura, características que reduzem os consumos de água de resfriamento e vapor d'água.

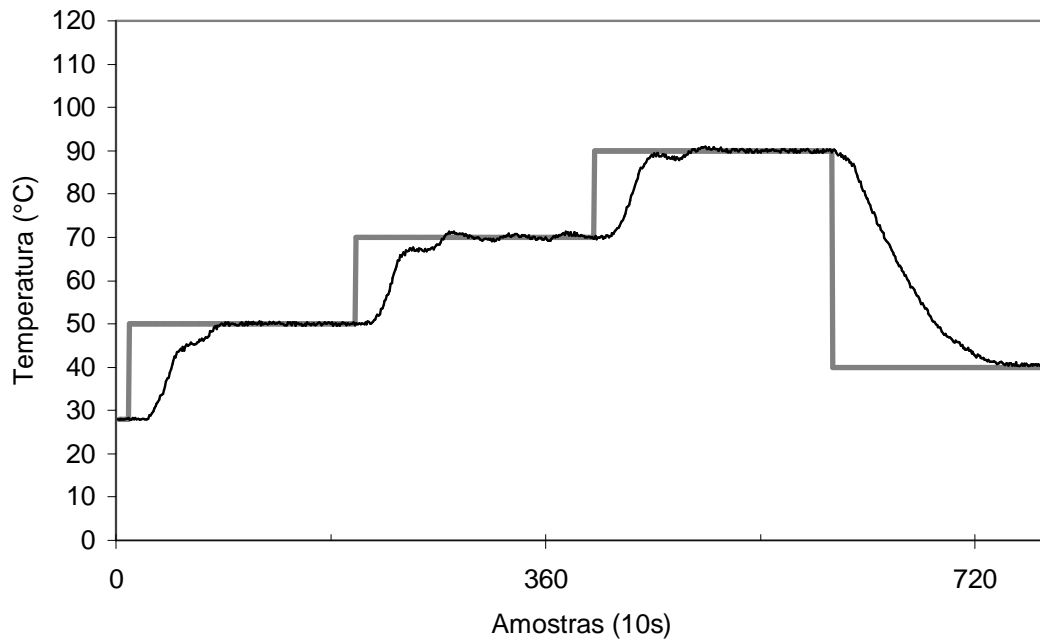


Figura 92 – Temperatura: experimento 19.

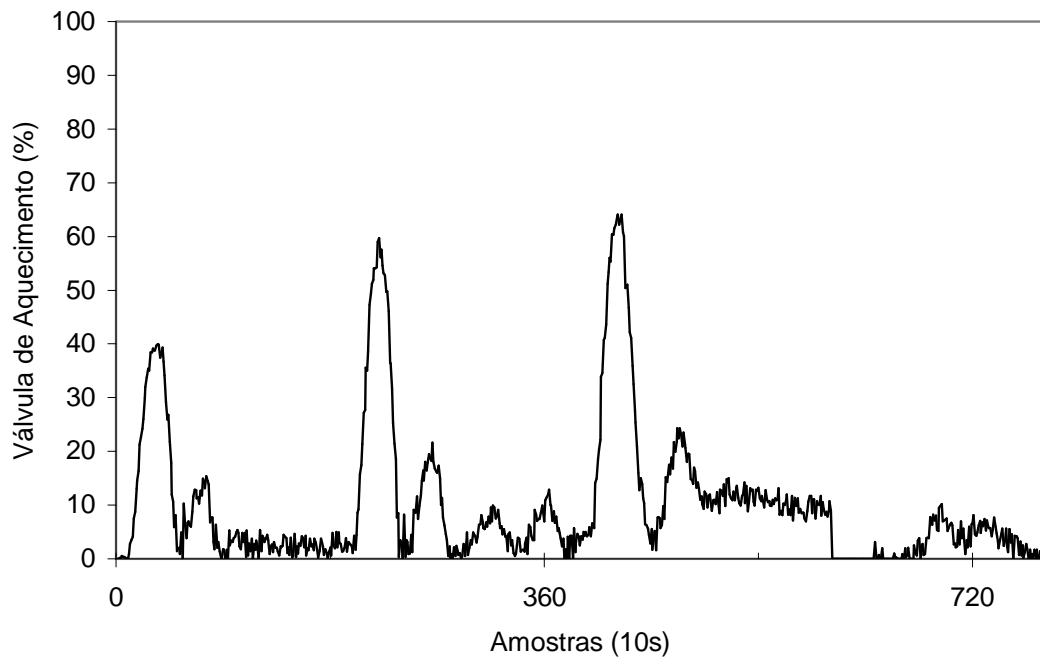


Figura 93 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 19.

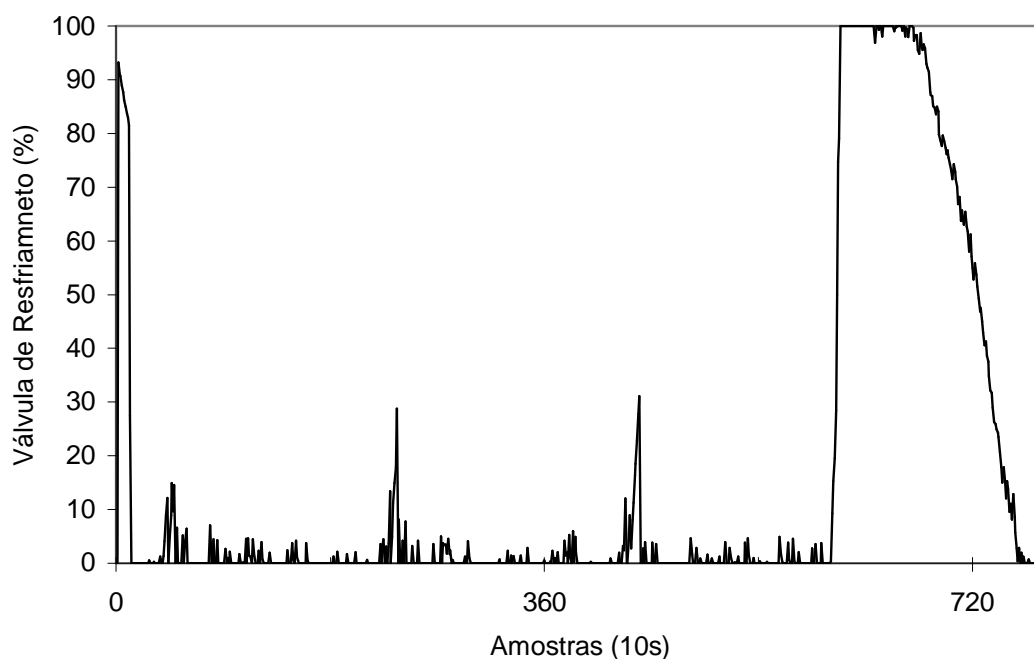


Figura 94 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 19.

Novas experimentações demonstraram que o ajuste fino do sistema de controle, através das razões de distribuição, é tão simples quanto através dos parâmetros de deslocamento. Fica caracterizado portanto que o ajuste global do sistema difuso, através dos parâmetros de deslocamento, é mais indicado que o ajuste em grupo dos conjuntos difusos através das razões de distribuição, quando se objetiva simplicidade de implementação. Além disso podem ser combinadas as duas formas de ajuste para melhorar a sensibilidade do controlador.

No experimento 19, os resultados indicaram um desempenho melhor para o sistema de controle ajustado através das razões de distribuição sem alteração dos parâmetros de deslocamento. Nas figuras 93 e 94, as ações de controle são persistentemente alteradas em função da presença de ruído ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

Para verificar a confiabilidade do sistema de controle diante das variações na pressão de alimentação de vapor, o sistema sem reação química foi estabilizado na temperatura de 100°C e sujeito a alterações de pressão de $6\text{kg}/\text{cm}^2$ para $4\text{kg}/\text{cm}^2$ (figuras 95, 96 e 97). A primeira perturbação foi aplicada e mantida até a estabilização do sistema na referência para, então, ser cancelada gerando uma nova perturbação de mesma magnitude e sinal contrário. A segunda perturbação foi

aplicada e removida antes da estabilização do sistema gerando uma oscilação. Nos dois casos o controlador foi capaz de restaurar o sistema à referência.

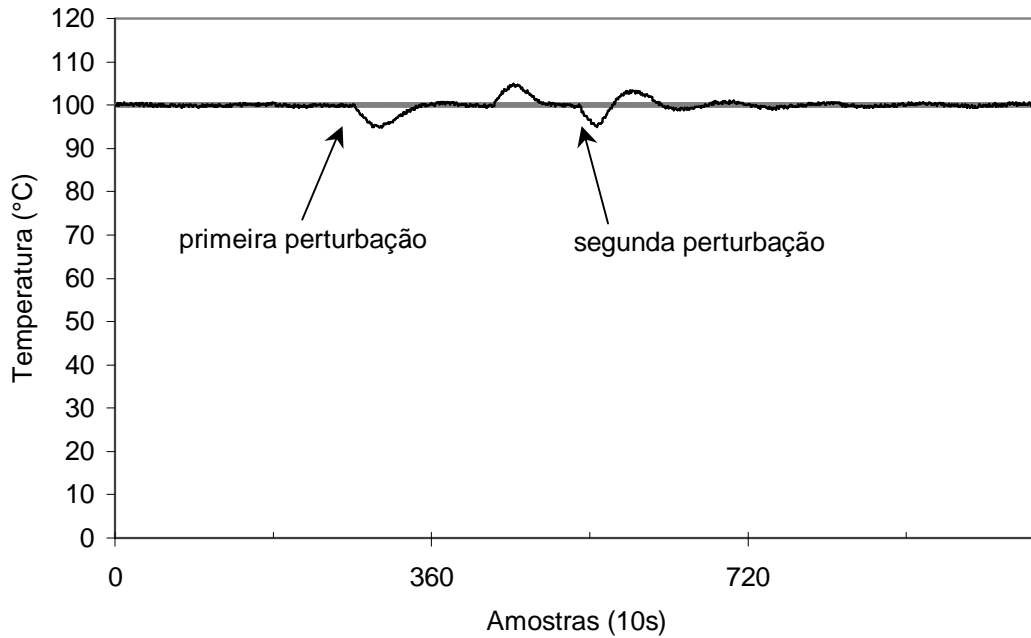


Figura 95 – Temperatura: experimento 20.

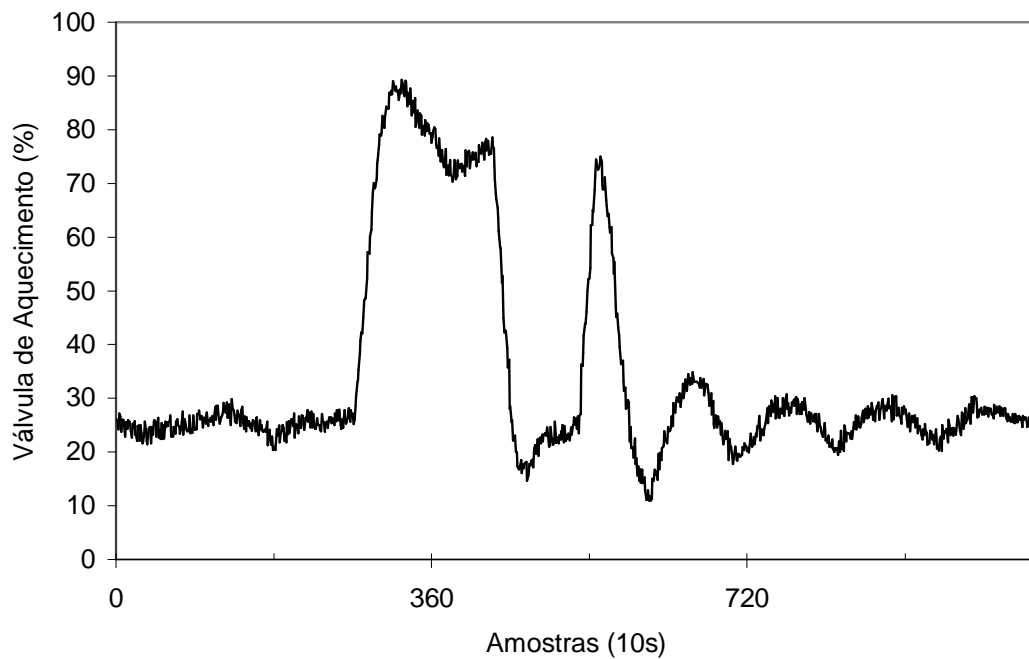


Figura 96 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 20.

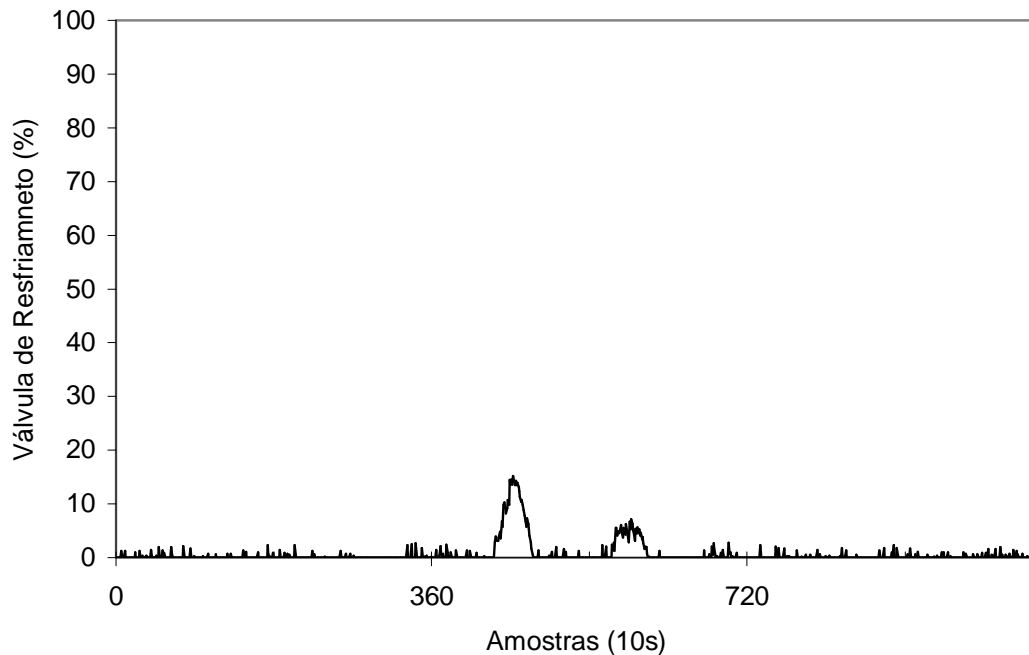


Figura 97 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 20.

6.5 Entrada difusa

A aplicação de entradas difusas triangulares ao invés de unitárias (*singleton*) pode ser utilizada como forma de manusear ruído nos dados ou imprecisões de medida. De fato, entradas difusas, bem como as razões de distribuição, incrementam o grau de dificuldade na implementação de sistemas de controle. O experimento a seguir visa observar a existência de vantagens em aumentar a complexidade do sistema difuso a partir da inclusão de entradas difusas. Na figura 98, a entrada difusa 0,8 com deslocamentos 0,5 indica que para as entradas em $\Delta Y=0,3$ e $\Delta Y=1,3$ os graus de verdade em relação ao valor 0,8 são zero. Gradativamente os graus de verdade aumentam até o grau máximo (1) em $\Delta Y=0,8$. Os parâmetros definidos no experimento 19 foram utilizados no experimentos 21, juntamente com uma entrada difusa com desvio de $\pm 0,5^\circ \text{C}$.

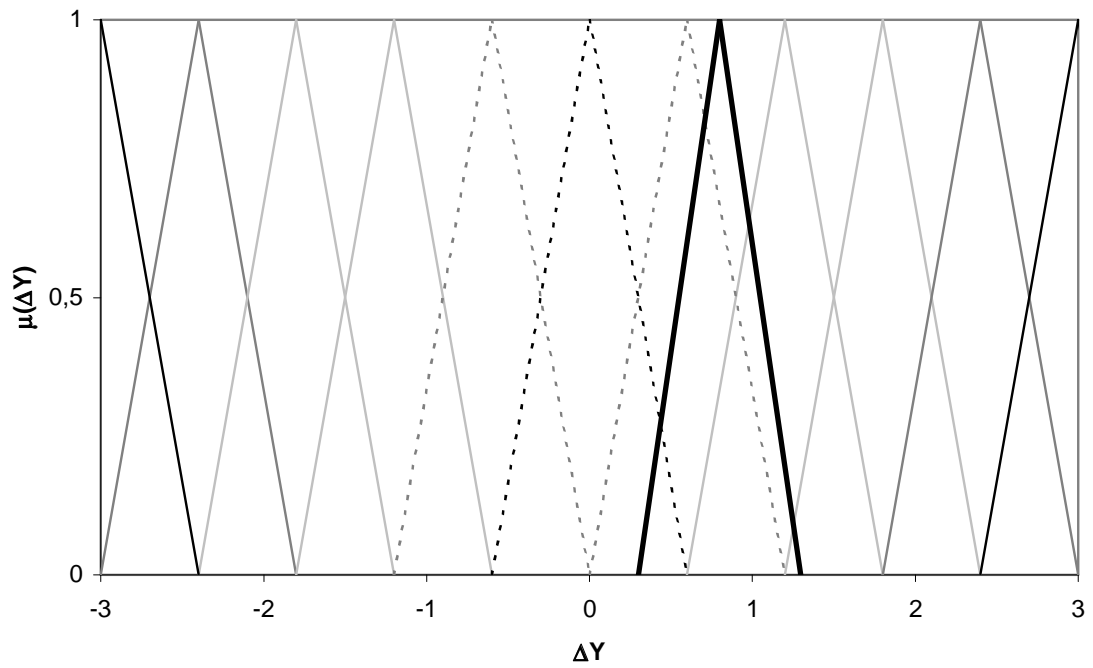
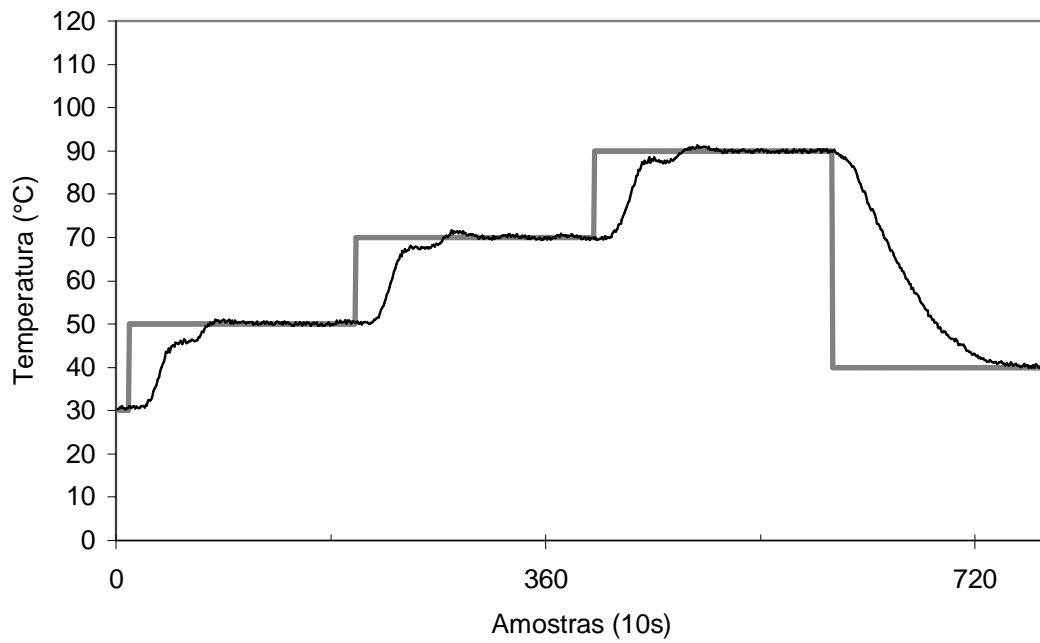
Figura 98 – Entrada difusa triangular $0,8 \pm 0,5$ para ΔY .

Figura 99 – Temperatura: experimento 21.

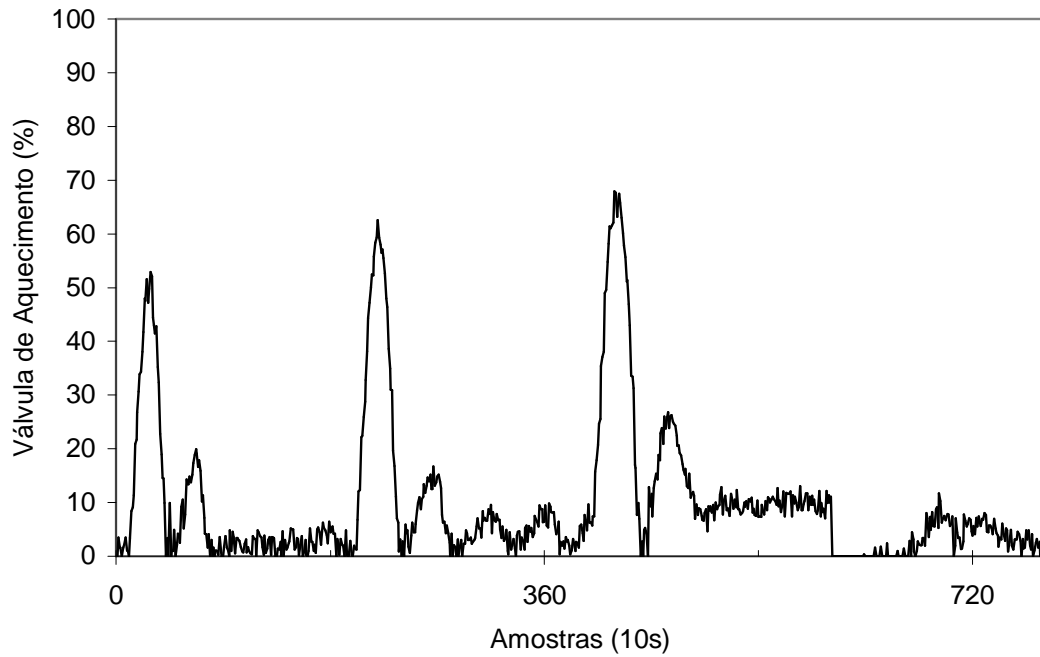


Figura 100 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 21.

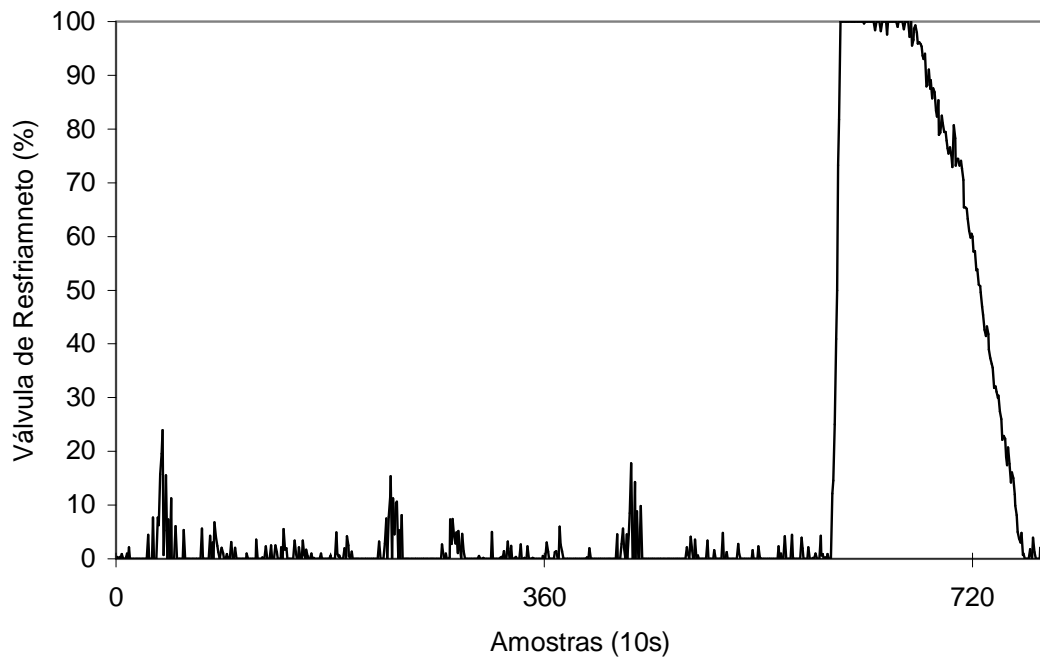


Figura 101 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 21.

Qualitativamente, os experimentos 19 e 21 produziram os mesmos resultados. Cabe enfatizar que, para um desvio de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, a entrada difusa possui a

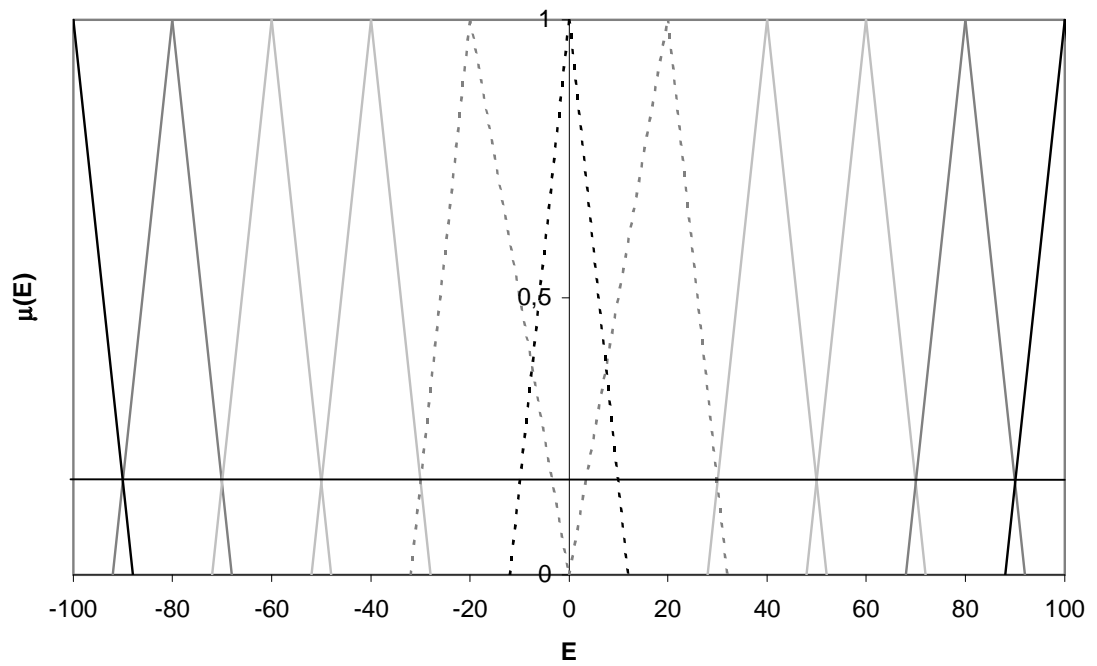
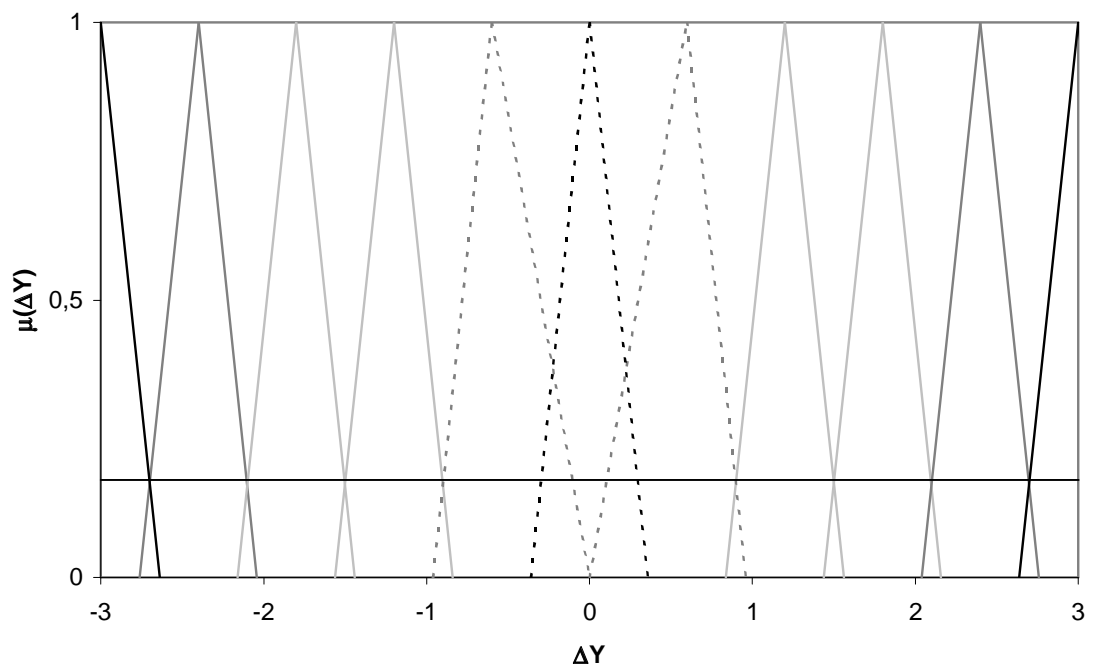
mesma dimensão dos conjuntos difusos do universo ΔY . Como o módulo do ruído nas medidas é, aproximadamente, $0,5^\circ\text{C}$, a partir da aplicação do princípio da extensão, Zadeh (1975), a entrada difusa deveria considerar, aproximadamente, o dobro da magnitude do ruído, resultando em uma informação vaga demais para o contexto dos conjuntos utilizados. O valor $0,5^\circ\text{C}$ é aceitável se for admitido que o valor máximo do módulo do ruído é $0,5^\circ\text{C}$ e sua média é $0,25^\circ\text{C}$. Um experimento com desvio na entrada difusa de $\pm 0,25^\circ\text{C}$ foi realizado com resultados semelhantes aos obtidos na figura 99.

Não foi observado melhora de desempenho na implementação da entrada difusa triangular para controle do processo em batelada testado e, desta forma, a complexidade acrescentada ao sistema não foi justificada.

6.6 Grau de sobreposição

Dois experimentos foram efetuados a partir da alteração dos graus de sobreposição. No primeiro, o grau de sobreposição, cujo valor máximo (normal) é 0,5 foi reduzido para 0,15. No segundo experimento, o grau de sobreposição máximo foi aumentado para 0,65.

Os conjuntos difusos representados pelas figuras 102, 103 e 104 foram utilizados no experimento 22 (figuras 105, 106 e 107).

Figura 102 – Conjunto difuso E : redução do grau de sobreposição.Figura 103 – Conjunto difuso ΔY : redução do grau de sobreposição.

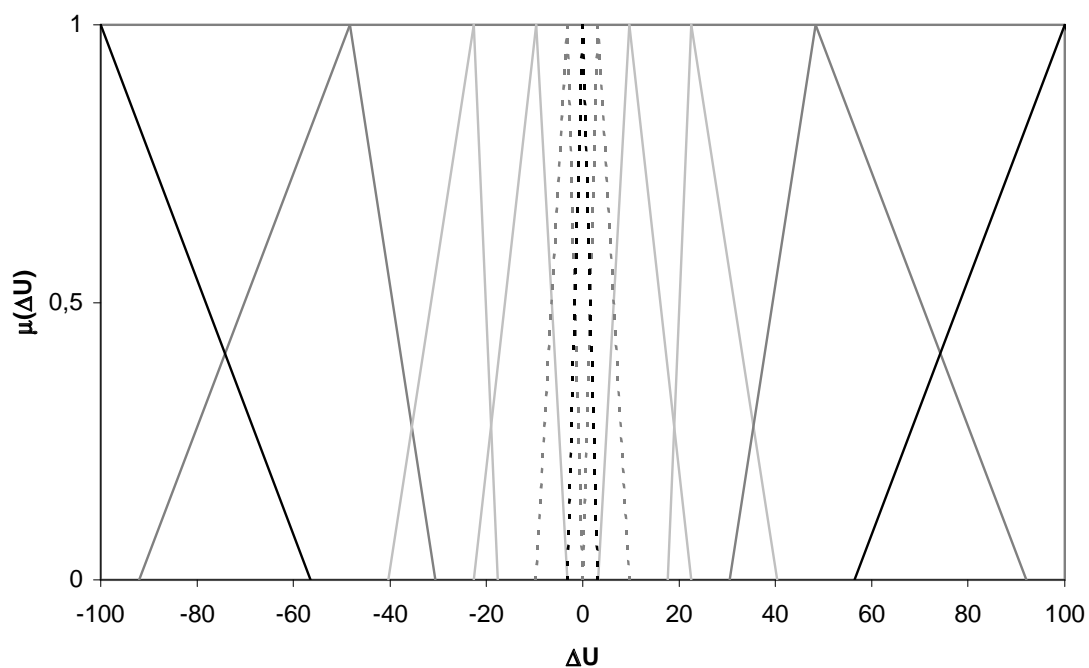
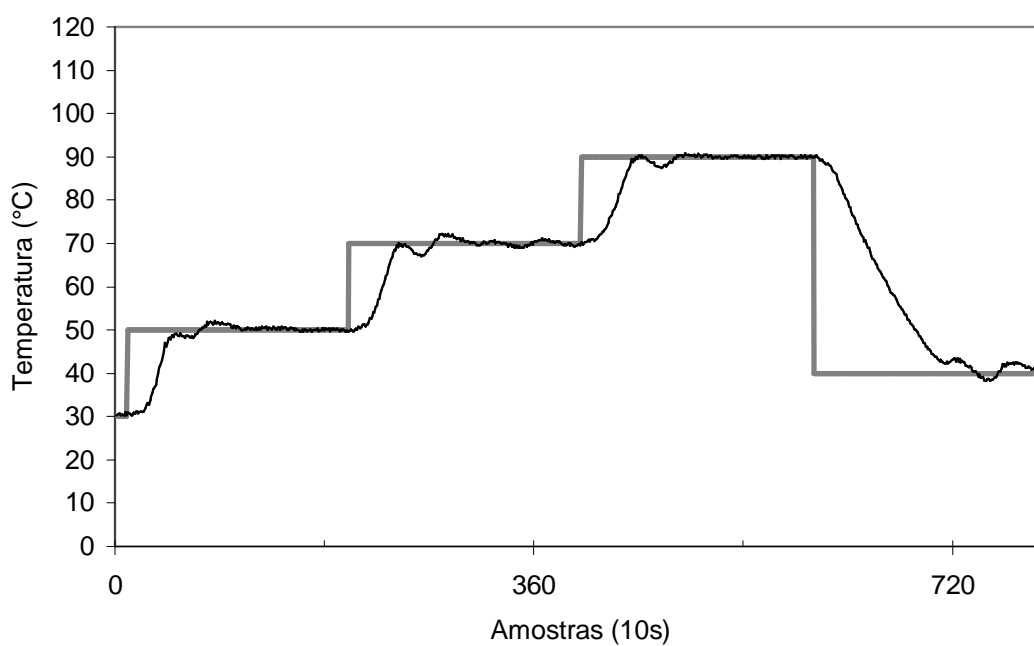
Figura 104 – Conjunto difuso ΔU : redução do grau de sobreposição.

Figura 105 – Temperatura: experimento 22.

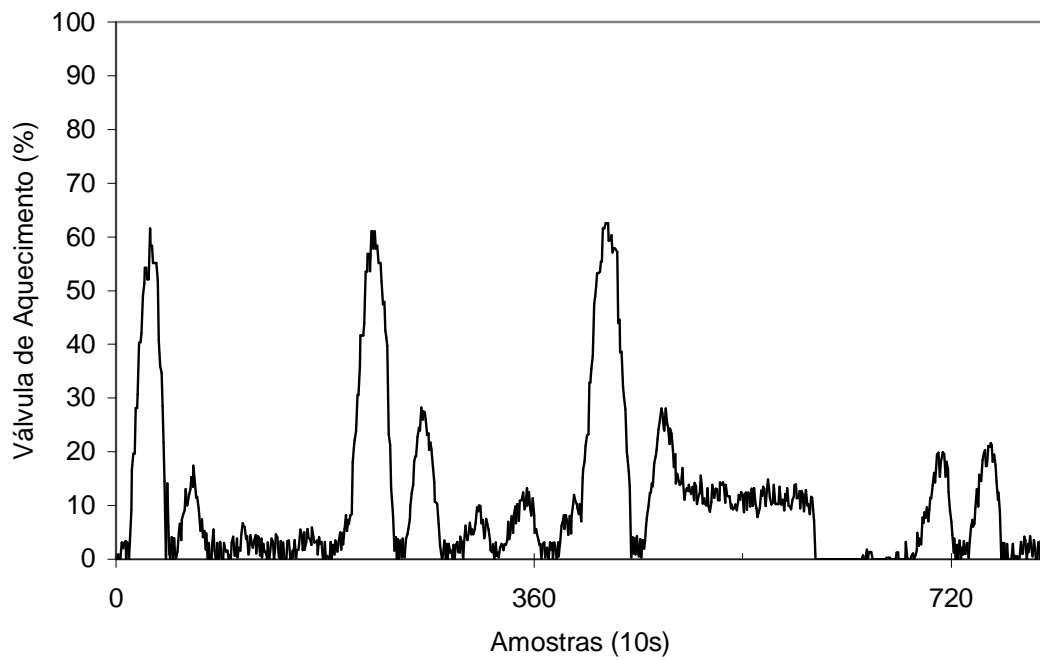


Figura 106 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 22.

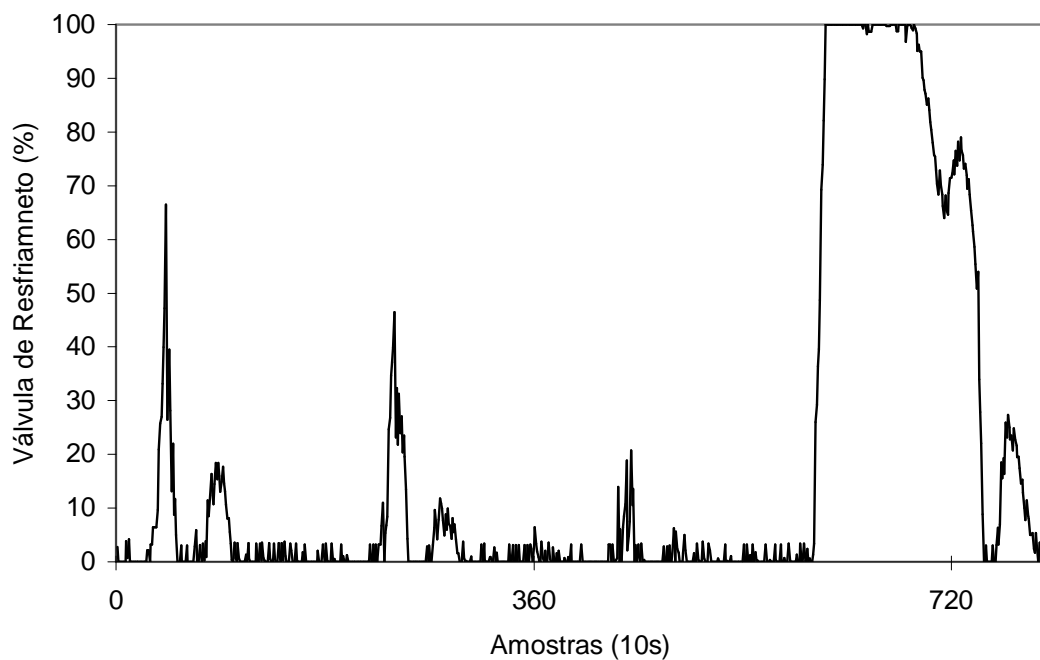


Figura 107 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 22.

Comparando-se os experimentos 22 e 19, onde foi promovida a redução do grau máximo de sobreposição, observa-se, figura 105, uma tendência oscilatória e

um aumento de intensidade das ações de controle para resfriamento. A redução do grau de sobreposição altera o resultado das implicações difusas, constituindo um parâmetro pouco intuitivo para aplicação direta. Aplicações indiretas, como mecanismos de ajuste automático, poderiam dispor desta forma de ajuste associada a outras.

Os conjuntos difusos representados pelas figuras 108, 109 e 110 foram utilizados no experimento 23 (figuras 111, 112 e 113) para observação do comportamento do controlador pelo aumento do grau máximo de sobreposição dos conjuntos difusos.

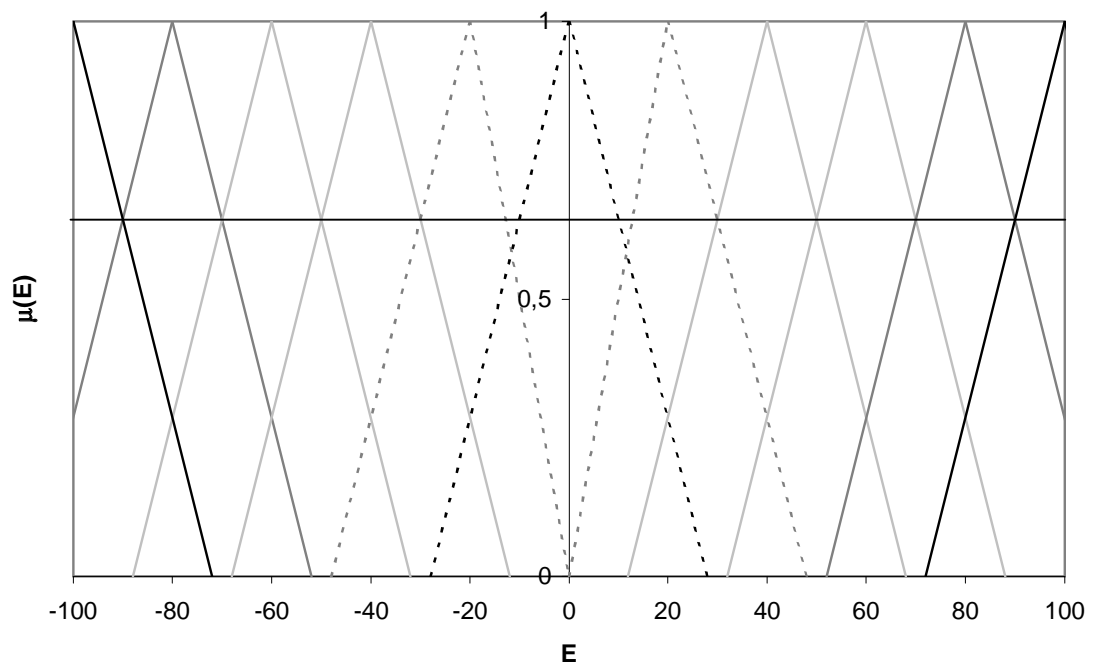
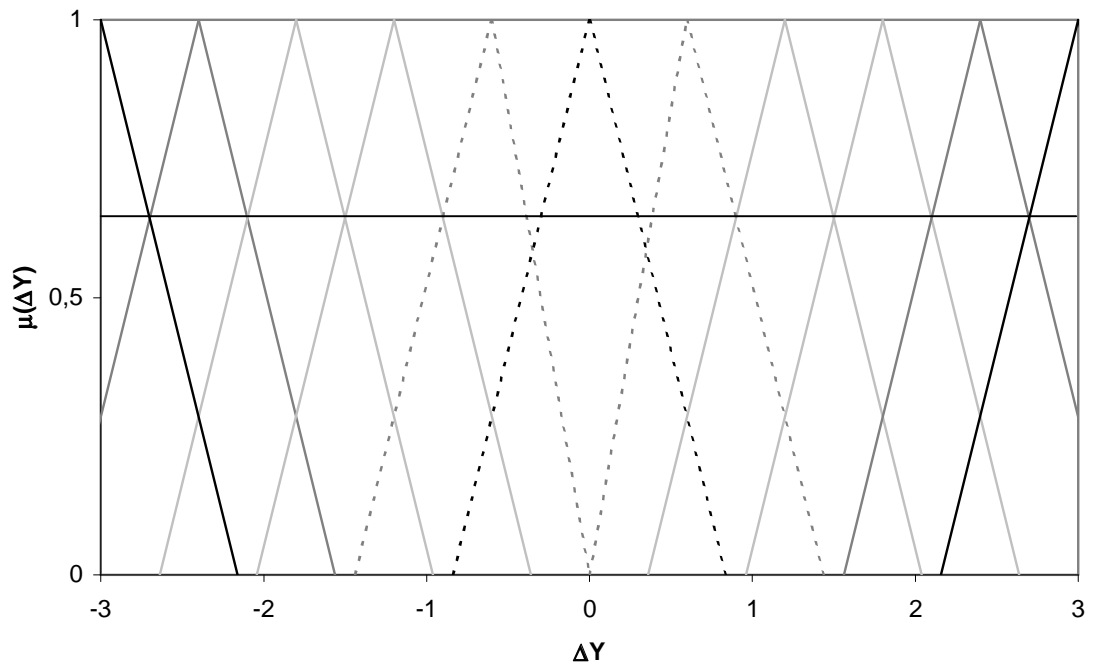
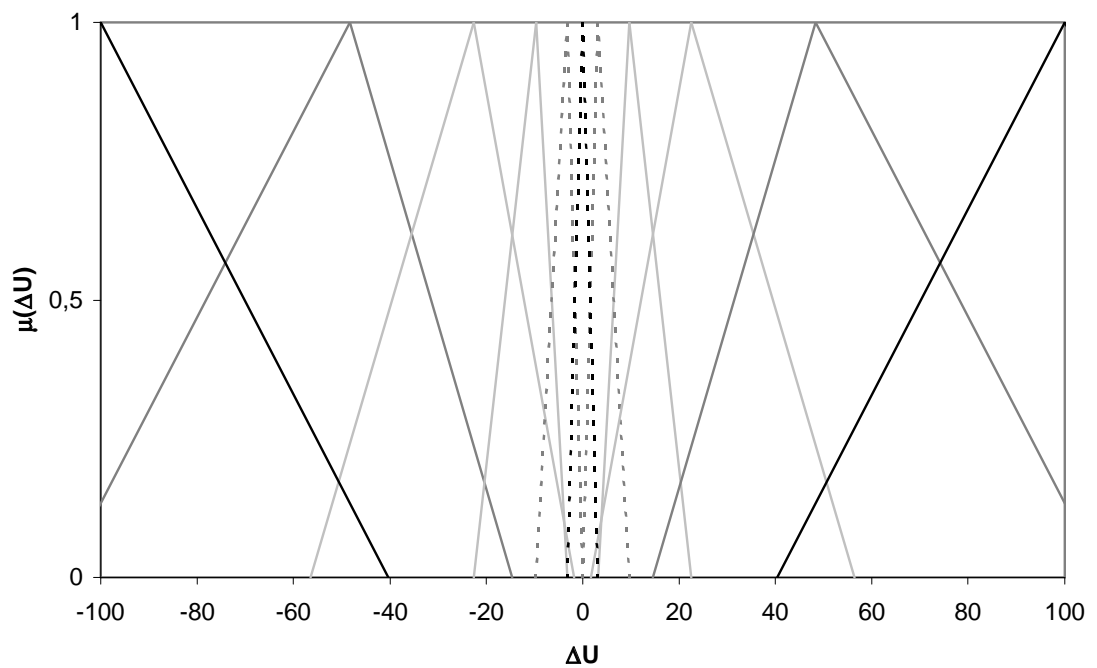


Figura 108 – Conjunto difuso E: aumento do grau de sobreposição.

Figura 109 – Conjunto difuso ΔY : redução do grau de sobreposição.Figura 110 – Conjunto difuso ΔU : aumento do grau de sobreposição.

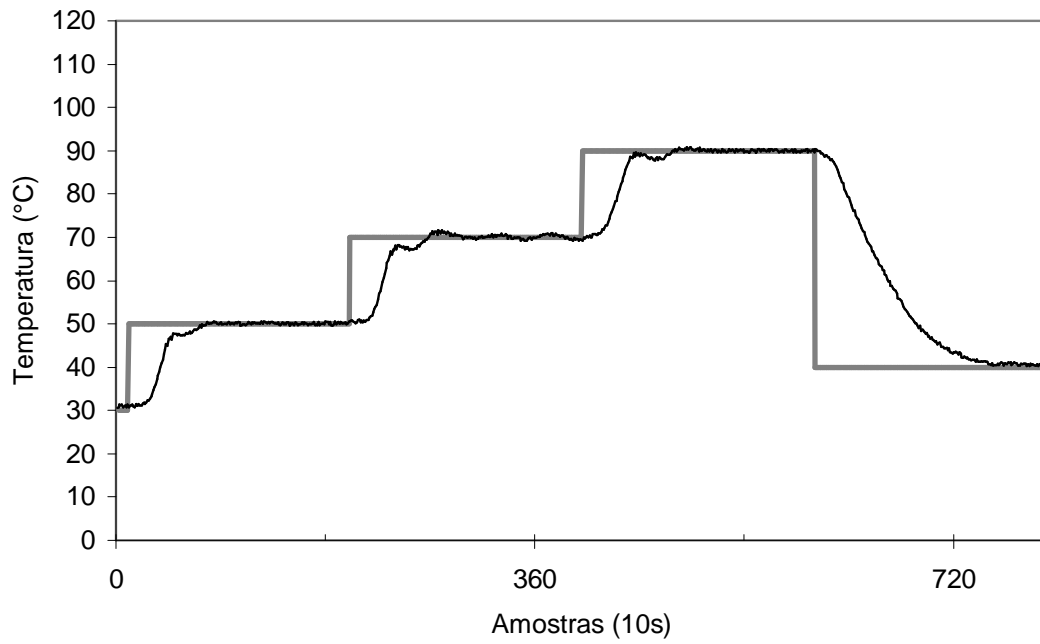


Figura 111 – Temperatura: experimento 23.

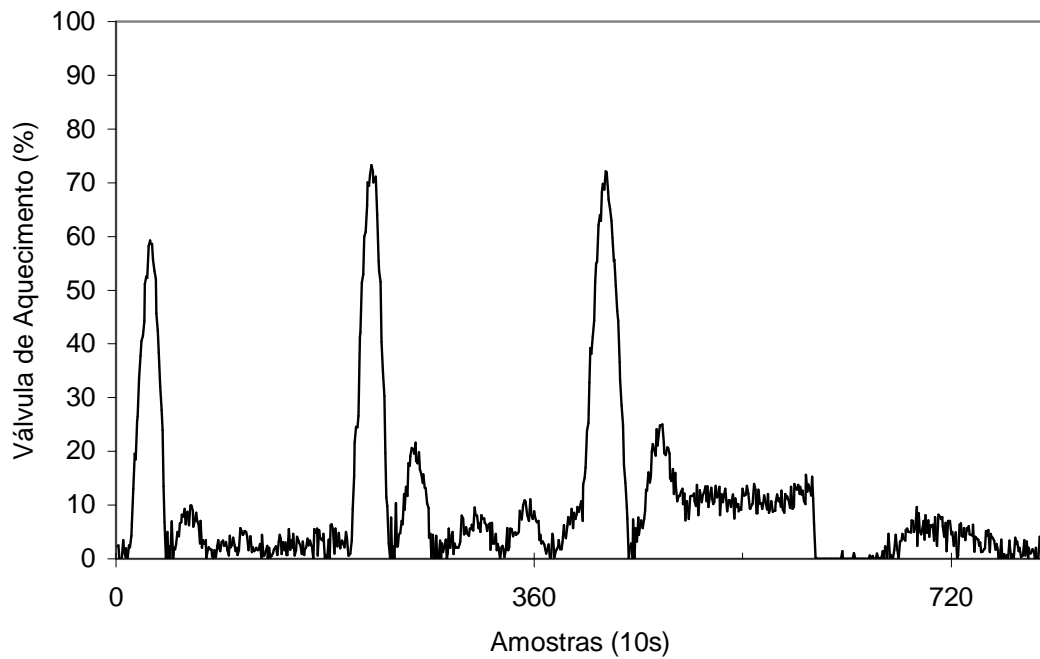


Figura 112 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 23.

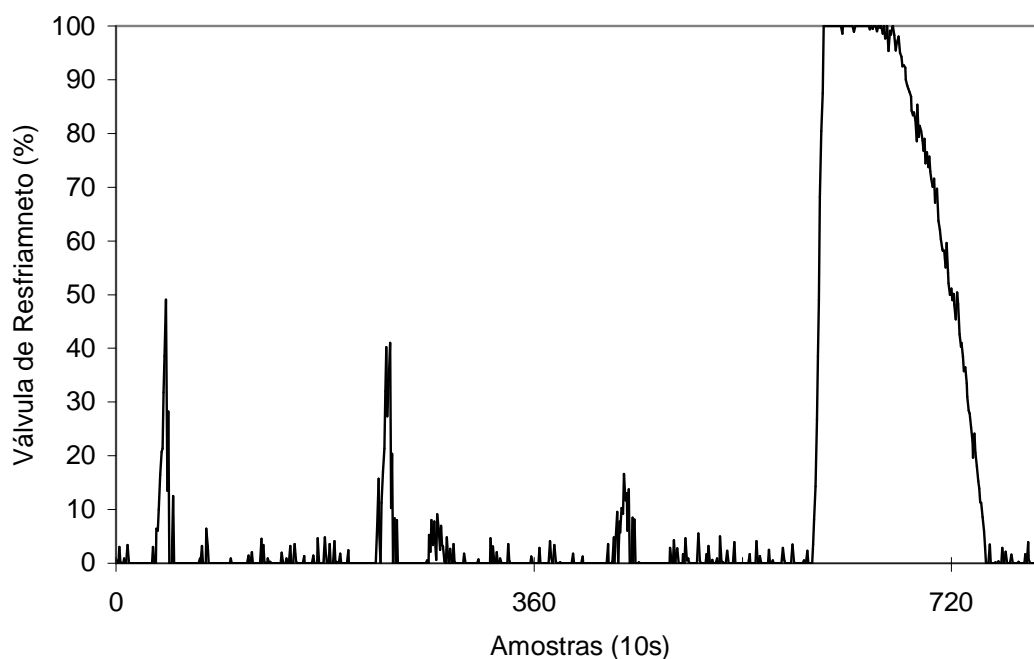


Figura 113 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 23.

A figura 111 (experimento 23) quando comparada com as figuras 105 (experimento 22) e 92 (experimento 19) indica que o comportamento do sistema de controle foi, fracamente, alterado pelas alterações introduzidas.

6.7 Ensaios com reação química

O processo de polimerização em suspensão do Estireno é realizado pode ser reatores do tipo batelada. Condições de temperatura diversas podem ser impostas para caracterizar a aplicação do produto final da reação. Neste caso, foram realizados experimentos considerando a reação com temperatura o fixa e perfil de temperatura predeterminado. Como o Estireno possui capacidade calorífica maior que a água e a reação é exotérmica, as seguintes características são alteradas:

I) O sistema assume uma dinâmica mais lenta;

II) Na temperatura de, aproximadamente, 90° C é mais pronunciada a liberação de energia.

No experimento 24 (figuras 114, 115 e 116), os parâmetros de deslocamento $\lambda_{\Delta U1}=\lambda_{\Delta U2}=0,1$ foram utilizados, de forma semelhante aos experimentos 9 e 18, sem reação química. No experimento 25 (figuras 117, 118 e 119), as razões de distribuição $\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2,0$ foram utilizadas, de forma semelhante ao experimento 19, sem reação química. No caso do ajuste, apenas dos parâmetros de deslocamento, estabeleceu-se um estado oscilatório amortecido que foi amplificado a partir da amostra 1440 por uma variação de pressão no sistema de aquecimento. Não foi observada oscilação para o ajuste através das razões de distribuição, indicando maior robustez para o controlador obtido com este método. No experimento 26 o controlador ajustado através das razões de deslocamento ($\delta_{\Delta U1}=\delta_{\Delta U2}=2,0$) foi utilizado para conduzir a reação de polimerização do Estireno através de um perfil de temperatura.

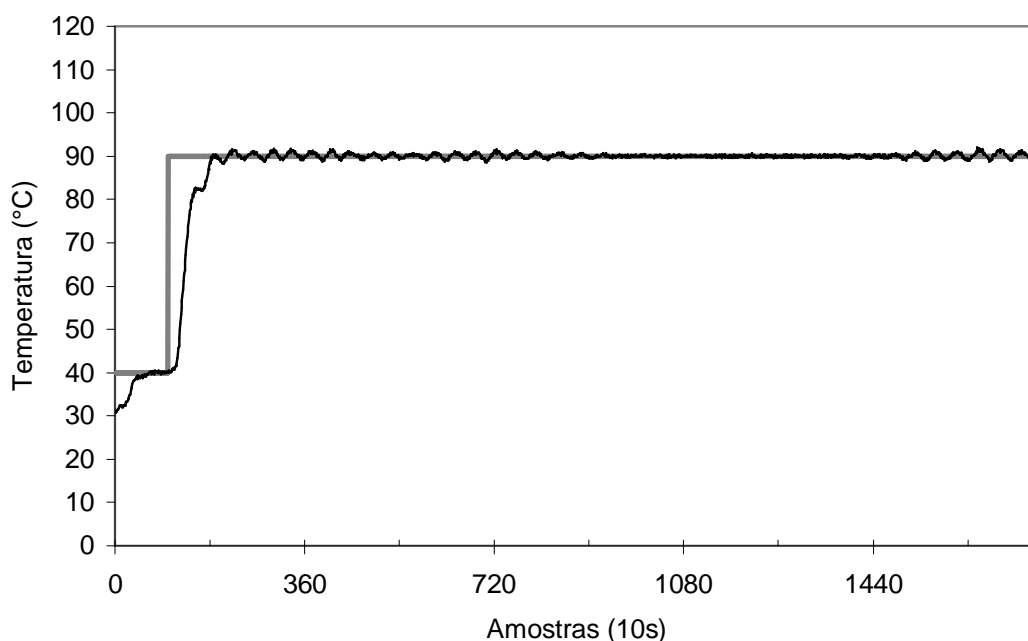


Figura 114 – Temperatura: experimento 24.

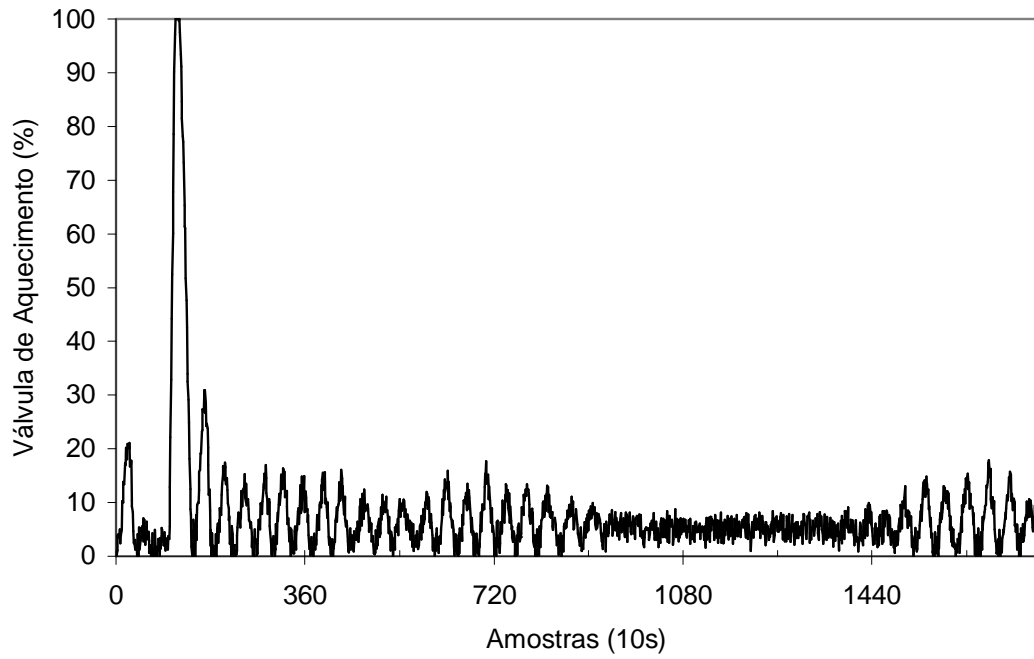


Figura 115 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 24.

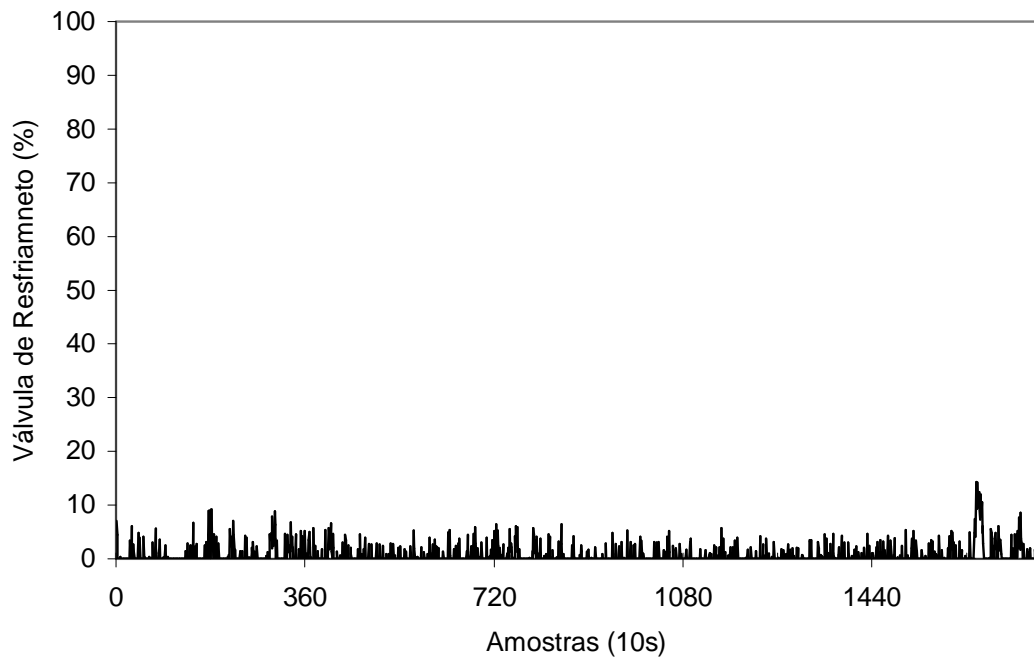


Figura 116 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 24.

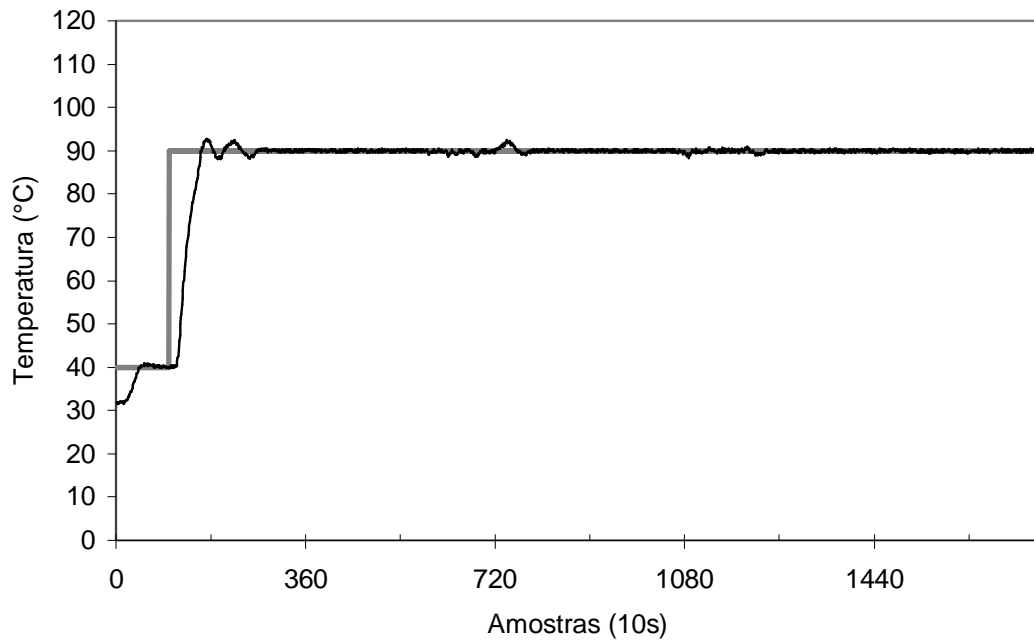


Figura 117 – Temperatura: experimento 25.

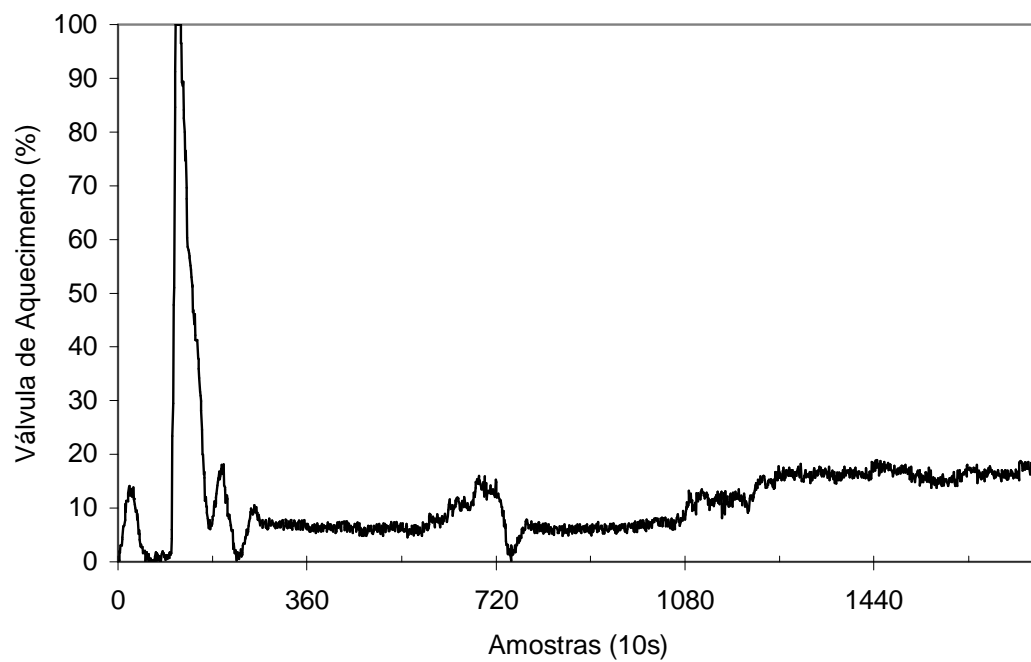


Figura 118 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 25.

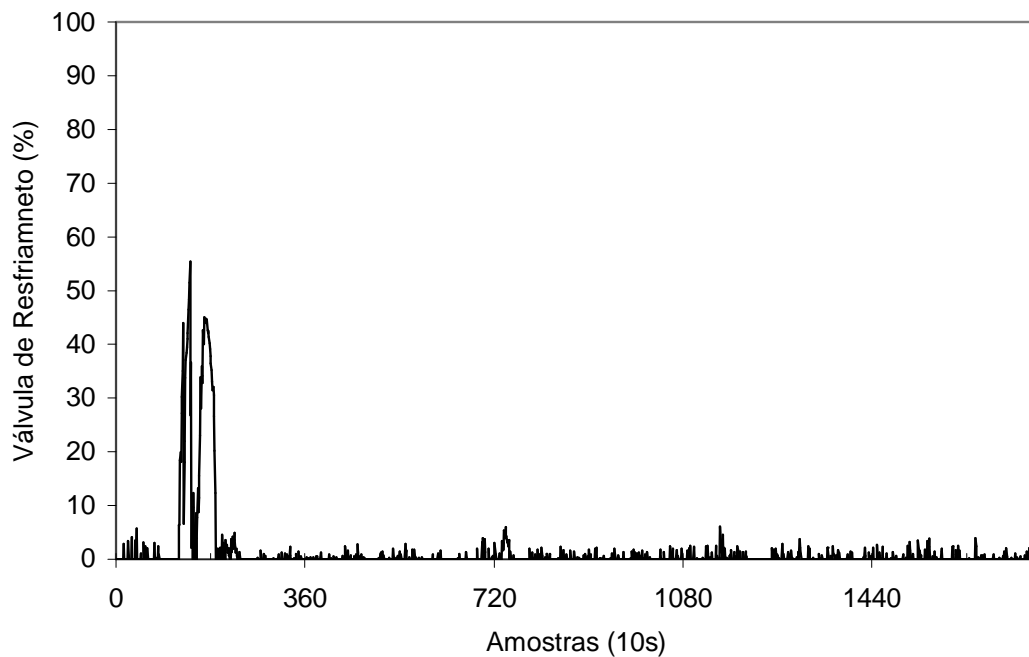


Figura 119 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 25.

No experimento 26 (figuras 120, 121 e 122) foi introduzido um perfil de temperatura para a reação, ensaio final para o controlador, constituindo-se no teste mais exigente aplicado. A figura 120 mostra que o perfil de temperatura foi acompanhado, com pequenas sobrelevações nas temperaturas entre 80° C e 90° C, sendo que a máxima ação de controle requerida manteve-se em 30%.

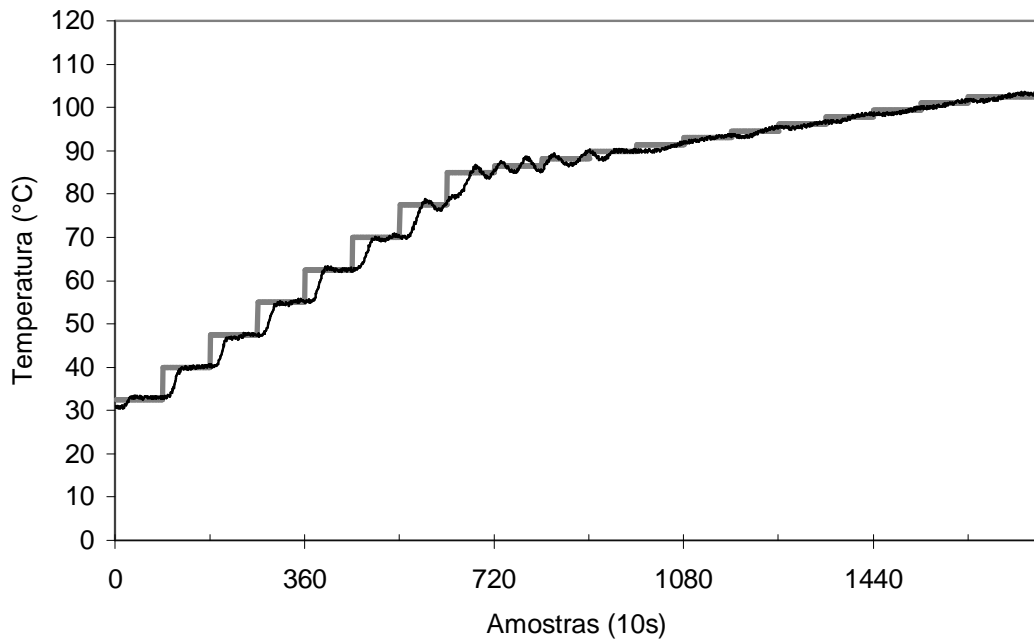


Figura 120 – Temperatura: experimento 26.

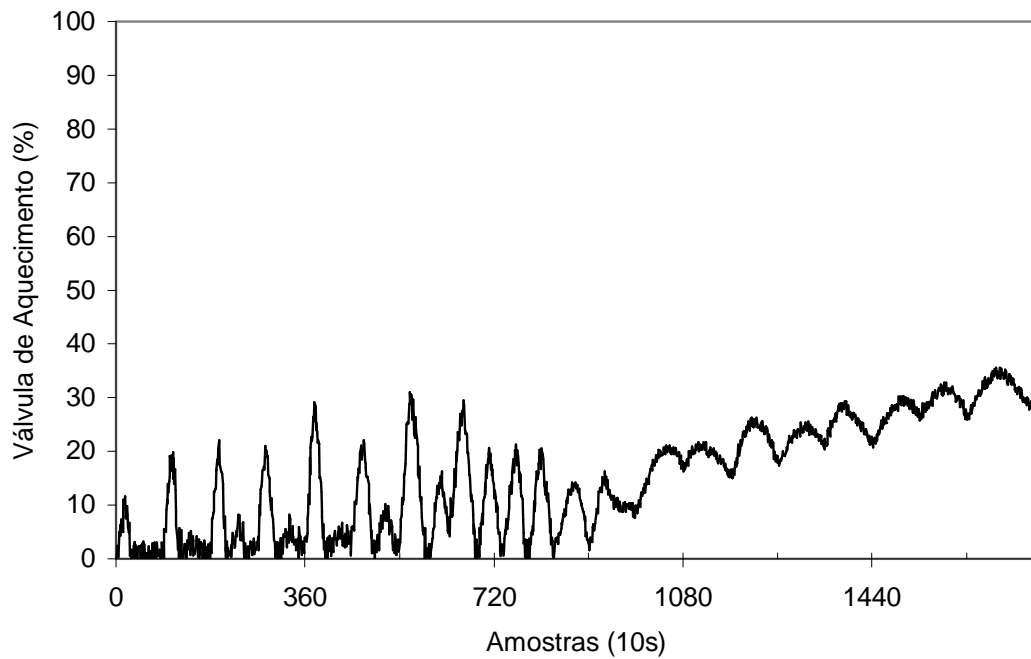


Figura 121 – Abertura da válvula de aquecimento: experimento 26.

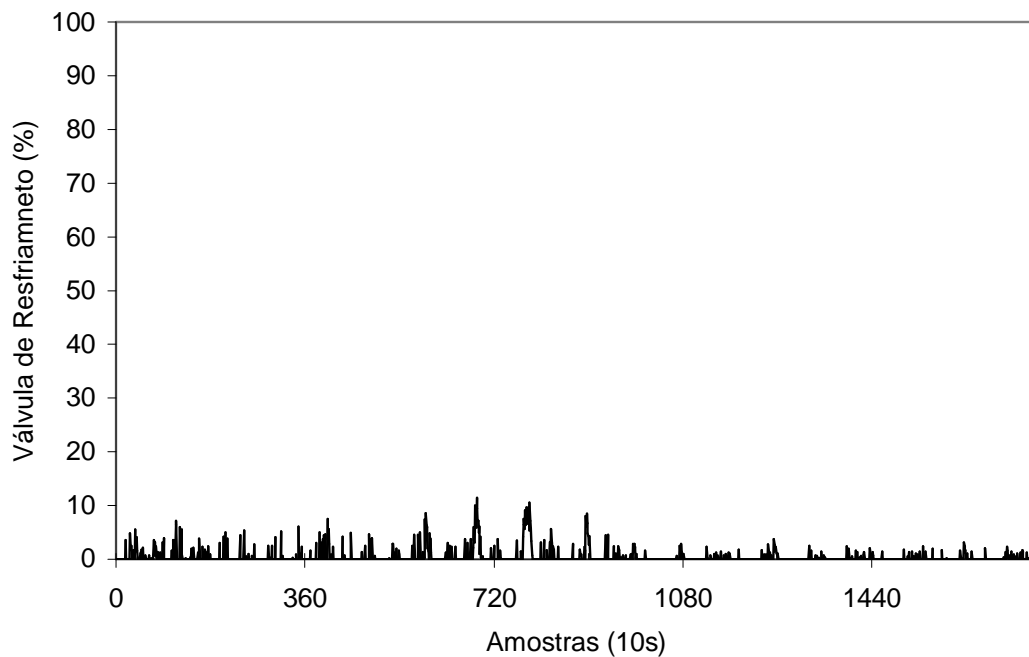


Figura 122 – Abertura da válvula de resfriamento: experimento 26.

6.8 Síntese dos resultados

A base de regras modificada permitiu uma redução efetiva das taxas de aquecimento e resfriamento.

Os experimentos indicam que o ajuste das características do controlador podem simplificados por:

- I) Adotar os limites físicos do sistema para caracterizar os domínios dos universos de discurso para E , ΔY e ΔU ;
- II) Manter os conjuntos qualificadores de E e ΔY igualmente distribuídos no universo de discurso;
- III) Utilizar as razões de distribuição para ajustar a disposição dos conjuntos difusos para os universos de discurso “variação das ações de controle para

aquecimento” e “variação das ações de controle para resfriamento”(ΔU_1 e ΔU_2).

O uso da entrada difusa triangular não introduziu melhora no desempenho do controlador para justificar o aumento de complexidade na implementação do sistema de controle.

O aumento do grau de sobreposição altera, fracamente, o comportamento do controlador. A redução do grau de sobreposição torna o sistema de controle oscilatório.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para aperfeiçoamento deste trabalho.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O desenvolvimento de um sistema de controle baseado em lógica difusa para o controle de temperatura de unidades de processamento em batelada foi descrito neste trabalho. O sistema de controle determina as variações nas aberturas das válvulas das correntes quente (ΔU_1) e fria (ΔU_2) alimentadas à camisa do tanque de mistura, a partir das medidas do desvio da saída do sistema em relação à referência (E) e da variação na saída deste (ΔY). Foram adotados 11 termos lingüísticos para qualificar os domínios E , ΔY , ΔU_1 e ΔU_2 resultando em duas bases de regras com 121 regras cada. O desempenho do sistema de controle foi observado com um conjunto de transições de referência (*set point*), onde foram ajustados os termos lingüísticos para as variáveis difusas ΔY e ΔU e a base de regras.

7.1 Conclusões

A implementação de um controlador difuso considerando uma base de regras adequada à natureza de sistemas de aquecimento/resfriamento apresentou um desempenho superior à base de regras padrão.

A alteração da base de regras através de parâmetros multiplicadores das premissas, permitiu o ajuste rápido dos controladores, mesmo por pessoas com pouca experiência com lógica difusa. O uso dos parâmetros de deslocamento simplifica a alteração da base de regras, porém é dependente do ajuste dos conjuntos difusos, onde o uso da heurística de operação foi utilizado para a definição dos domínios das variáveis do controlador.

Um ajuste generalizado sobre todos os conjuntos do universo difuso foi centralizado em um parâmetro denominado razão de deslocamento. Através deste parâmetro foi possível concentrar os conjuntos em torno do centro do universo de discurso ou nas extremidades deste com bons resultados.

Aplicações para sistemas sem reação química e com a reação de polimerização do Estireno em suspensão foram fornecidas, de forma a generalizar

aplicações de unidades de processamento em batelada. O perfil de temperatura aplicado foi adequadamente rastreado pelo controlador.

Finalmente, a partir das possibilidades de ajuste apontadas e das análises estabelecidas cumpre-se o objetivo geral: implementar um controlador difuso e apresentar formas de ajuste lineares e não-lineares para o controle difuso de temperatura utilizado, contribuindo para a compreensão do comportamento do controlador sobre sistemas de mistura em batelada. A partir das experimentações e desenvolvimentos, os objetivos específicos foram atingidos: executar ensaios sobre sistemas com e sem reação química em condições reais e desenvolver um *software* capaz de realizar a tarefa de controle de processos em batelada.

7.2 Sugestões

Uma configuração interessante para o sistema de controle difuso implementado é incluir uma nova premissa nas regras onde seja considerado, mais diretamente, o acoplamento entre as ações de controle para aquecimento e resfriamento. Assim, regras do tipo Se E é E' e ΔY é $\Delta Y'$ e U_2 é U_2' Então ΔU_1 é $\Delta U_1'$ seriam utilizadas. Esta alteração provocaria um aumento do número de regras das atuais 242 para, ao menos, 2662. À primeira vista, isto permitiria um uso mais racional das correntes de aquecimento e resfriamento. Porém, o ganho real desta alteração deve ser observado pois o esforço computacional é aumentado significativamente com esta alteração. Sistemas hierárquicos, conforme proposta de Lee, Chung e Yu (2003), podem ser uma alternativa interessante para o aumento de número de regras.

Testes com diferentes sistemas de reação podem contribuir muito para a compreensão das técnicas de ajuste utilizadas, permitindo uma migração mais segura para escala industrial.

Estabelecer um modelo fenomenológico ou baseado em conhecimento heurístico para os processos apresentados contribuirá para um ajuste mais preciso do sistema de controle.

Aproveitar os métodos de ajuste testados para compor um mecanismo adaptativo e estudar associações dos métodos para melhorar o desempenho geral do controlador.

A definição de uma metodologia para permitir a aplicação do controlador para sistemas em batelada em maior escala (*scale-up*), baseada em características de sistemas em batelada, é muito importante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZALIAN, A., LINKENS, D. A. Training of Neurofuzzy System Stabilizers using Genetic Algorithms, **Electrical Power and Energy Systems**, n.22, 2000, p.93-102.

AKKIZIDIS, I. S., ROBERTS, G. N., RIDAO, P., BATLLE, J.; Designing a Fuzzy-like PD controller for an underwater robot; **Control Engineering Practice**; n.11; 2003; p.471–480.

ALTINTEN, A., ERDOĞAN, S., KARAGÖZ, A. R., HAPOĞLU, H., ALPBAZ; Control of a polymerization reactor by fuzzy control method with genetic algorithm; **Computers and Chemical Engineering**; n.27; 2003; p.1031- 1040.

ANGELOV, P.; An evolutionary approach to fuzzy rule-based model synthesis using indices for rules; **Fuzzy Sets and Systems**; n.137; 2003; p.325–338.

ARAI, K. SAITO, S. Simulation Model for the Rate of Bulk Polymerization over the Complete Course of Reaction. **Journal of Chemical Engineering Japan**, v.49, n.74, 1976, p. 302-313.

BABUSKA, R., OOSTERHOFF, J., OUDSHOORN, A., BRUIJN, P. M. Fuzzy self-tuning PI control of pH in fermentation; **Engineering Applications of Artificial Intelligence**; n.15; 2002; p.3–15.

BANKS, J. CARSON, J. **Discrete Systems Simulation**, Prentice-Hall, New Jersey-USA, 1984.

BASTIAN, A. Identifying Fuzzy Models Utilizing Genetic Programming, **Fuzzy Sets and Systems**, n.113, 2000, p. 333-350.

BELMAN, R. E., GIERTZ, M. On then Analytic Formalism of the Theory of Fuzzy Sets. **Information Sciences**, n.5, 1973, p.149-156.

BELARBI, K., BETTOU, K., MEZAACHE A. Fuzzy Neural Networks for Estimation and Fuzzy Controller Design: Simulation Study for a Pulp Batch Digester, **Journal of Process Control**, 2000, p.35-41.

BERNARD, O., HADJ-SADOK, Z., DOCHAIN, D., GENOVESI, A., STEYER, J. P. Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment; **Biotechnology and Bioengineering**; n.75; v.4; 2001; p.424–438.

BISHOP, R. B. **Practical Polymerization for Polystyrene**, Cahners Publishing Co., Massachusetts, 1971.

BOUCHON-MEUNIER, B., MESIAR, R., MARSALA, C., RIFQI, M. Compositional rule of inference as an analogical scheme; **Fuzzy Sets and Systems**; n.138; 2003; p;53–65.

CALABRESE, R. V., CHANG, T. P. K., DANG, P. T. Drop Breakup in Turbulent Stirred Tank Contactors – Part I: effect of Dispersed-Phase Viscosity, **AIChE Journal**, v. 32, 1986, p.657-666.

CALABRESE, R. V., CHANG, T. P. K., DANG, P. T. Drop Breakup in Turbulent Stirred Tank Contactors – Part III: Correlationsfor Mean Size and Drop Size Distribution, **AIChE Journal**, v. 32, 1986, p.677-681.

CANCELIER, A., MAZZUCCO, M. M., MACHADO, R. A. F., BOLZAN, A. A. Temperature Control of Reactors Using Neural Networks, **DYCOPS 5 - 5th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems**, Corfu (Greece), 1998, p. 484- 489.

CANCELIER, A., CLAUMANN, C. A., MAZZUCCO, M. M., MACHADO, R. A. F., BOLZAN, A. A. Controle de Temperatura de um tanque encamisado utilizando-se lógica difusa, **II Congresso de Engenharia de Processos de MERCOSUL**, 1999.

CAO, S.G., REES, N.W., FENG, G. Mamdani-type fuzzy controllers are universal fuzzy controllers; **Fuzzy Sets and Systems**; n.123; 2001; p.359–367.

CAPUTO, A. C., PELAGAGGE, P. M. Fuzzy Control of Heat Recovery Systems from Solid Bed Cooling, **Applied Thermal Engineering**, n.20, 2000, p. 49-67.

CARVALHO, M. T., DURÃO, F. Control of a flotation column using fuzzy logic inference; **Fuzzy Sets and Systems**; n.125; 2002; p.121–133.

CHANG, W., PARK, J. B., JOO, Y. H., CHEN, G. Design of robust fuzzy-model-based controller with sliding mode control for SISO nonlinear systems; **Fuzzy Sets and Systems**; n.125; 2002, p.1–22.

CHANG, S., CHANG, C. A fuzzy-logic based fault diagnosis strategy for process control loops; **Chemical Engineering Science**; n. 58; 2003; p. 3395 – 3411.

CHATZI, E. G., KIPARISSIDES, C. Drop Size Distributions in High Holdup Fraction Dispersion Systems: Effect of the Degree of Hydrolysis of PVA Stabilizer, **Chem. Engng. Sci.** v.49, 1994, p.5039-5052.

CHEN, S., YU, F., CHUNG, H. Decoupled fuzzy controller design with single-input fuzzy logic; **Fuzzy Sets and Systems**; n.129; 2002; p.335–342.

CHEN, T.; A fuzzy back propagation network for output time prediction in a wafer fab; **Applied Soft Computing**; n.2; 2003; p.211-222.

CHO, Y., PARK, C., PARK, M. An indirect model reference adaptive fuzzy control for SISO Takagi–Sugeno model; **Fuzzy Sets and Systems**; n.131; 2002; p.197-215.

DOYLE III, F. J., HARRISON, C. A.; CROWLEY, T. J. Hybrid model-based approach to batch-to-batch control of particle size distribution in emulsion polymerization; **Computers and Chemical Engineering**; n.27; 2003; p.1153-1163.

DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H., REIFRANK, M. **An Introduction to Fuzzy Control**. New York - USA: Springer, 1996. 316p.

DUBĚ, M. A., PENDILIS, A., O'DRISCOOL, K. F. A Kinetic Investigation of Styrene/Butyl Acrylate Copolymerization, **Canadian Journal of Chemical Engineering**. V.68, 1990, p.974-987.

DUBOIS, D., PRADE, H., SESSA, S. Recent Literature; **Fuzzy Sets and Systems**; n.138; 2003; p.213–219.

DUCATO, R., GALLUZO, M. Dynamic Simulation of a ND-BEPR Activated Sludge Process, **Computers & Chemical Engineering**, n.19, 1995, p.441-446.

DUBOIS D., PRADE, H. Fuzzy Sets in Approximate Reasoning : Inference with Possibility Distributions, **Fuzzy Sets and Systems**, n.40, 1991, p.143-202.

DURKIN, J. **Expert Systems: Design and Development**, Prentice-Hall, New Jersey-USA, 1994, 800p.

EDGAR, C. R., POSTLETHWAITE, B. E., MIMO Fuzzy Internal Model Control, **Automatica**, n.34, 2000, p.867-877.

FAN, J., MA, Y. Some new fuzzy entropy formulas; **Fuzzy Sets and Systems**; n.128; 2002; p.277–284.

FENG, G., CAO, S.G., REES, N. W. Stable adaptive control of fuzzy dynamic systems; **Fuzzy Sets and Systems**; n.131; 2002; p.217 – 224

FERNÁNDEZ, F., GUTIÉRREZ, J.; A Takagi–Sugeno model with fuzzy inputs viewed from multidimensional interval analysis; **Fuzzy Sets and Systems**; n.135; 2003; p.39–61.

FINOL, J., GUO, Y. K., JING, X. D. A Rule Based Fuzzy Model for the Prediction of Petrofysical Rock Parameters, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, n.29, 2001, p.97-113.

FOGLER, H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. New Jersey- USA, Prentice Hall, 2^a ed. 1996. 838p.

GALLUZZO, M., DUCATO R., BARTOLOZZI, V., PICCIOTTO, A. Expert Control of an Activated Sludge Process, **Computers & Chemical Engineering**, n.25, 2001, p.619-625.

GUERRA, T. M., VERMEIREN, L.; Control laws for Takagi–Sugeno fuzzy models; **Fuzzy Sets and Systems**; n.120; 2001; p.95–108.

GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning**, Addison-Wesley, USA, 1989p.

GOTTSCHALK, K., NAGY, L., FARKAS, I. Improved climate control for potato stores by fuzzy controllers; **Computers and Electronics in Agriculture**; n.40; 2003; p.127-140.

GROUMPS, P. P., STYLIOS, C. D. Modelling Supervisory Control Systems using Fuzzy Cognitive Maps, **Chaos, Solitons & Fractals**, n.11, 2000, p. 329-336.

GUGLIOTA, L. M., SALAZAR, A., VEGA, J. R., MEIRA, G. R. Emulsion Polymerization of Styrene. Use of n-Nonyl Mercaptan for Molecular Weight Control, **Polymer**, n.42, 2001, p.2719-2726.

GUPTA, M. M., QI, J. Theory of t-norms and Fuzzy Inference Methods, **Fuzzy Sets and Systems**, n.40, 1991, p.473-489.

HANAI, T., OHKI, T., HONDA, H., KOBAYASHI, T.; Analysis of initial conditions for polymerization reaction using fuzzy neural network and genetic algorithm; **Computers and Chemical Engineering**; n.27; 2003; p.1011- 1019.

HARRIS, C. J. **Advances in Intelligent Control**, Great Britain, Taylor & Francis, 1994, 373p.

HORIUCHI, J. Fuzzy Modeling and Control of Biological Processes: Review; **Journal of Bioscience and Bioengineering**; v. 94; n. 6; 2002; p.574-578.

HSU, Y., CHEN, G., TONG, S., Li, H. Integrated fuzzy modeling and adaptive control for nonlinear systems; **Information Sciences**; n.153; 2003; p.217–236.

KALFAS, G., RAY, W. H. Modeling and Experimental Studies of Aqueous Suspension Polymerization Processes. Part 1. Modeling and Simulations. **Ind. Eng. Chem. Res.** v.32, n.9, 1993, p.1822-1830.

JAGER, R. **Fuzzy Logic in Control**, Delft-Netherlands, 312p. Thesis (Technische Universiteit Delft), 1995.

JURADO, F., SAENZ, J. R. Neuro-fuzzy control for autonomous wind–diesel systems using biomass; **Renewable Energy**; n.27; 2002; p.39-56.

KARR, C. L. Control of a phosphate processing plant via a synergistic architecture for adaptive,intelligent control; **Engineering Applications of Artificial Intelligence**; n.16; 2003; p.21–30.

KARAGÖZ, A. R., HAPOĞLU, H., ALPBAZ, M. Generalized Minimum Variance Control of Optimal Temperature, **Chemical Engineering and Processing**, n.39, 2000, p.253-262.

KISHIMOTO, M., BELUSO, M., OMASA, T., KATAKURA, Y., FUKUDA, H., Suga, K.; Construction of a fuzzy control system for a bioreactor using biomass support particles; **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**; n.17; 2002; p.207–213.

KIM, K. J., CHOI, K. Y. Steady State Behavior of a Continuous Stirred Tank Reactor for Styrene Polymerization with Bifunctional Free-radical Initiators. **Chemical Engineering Science**, v.43, n.4, 1988, p.965-977.

KIM, K. J., CHOI, K. Y. Modeling of Free-radical Polymerization of Styrene Catalyzed by Unsymmetrical Bifunctional Initiators, **Chemical Engineering Science**, v.44, n.2, 1989, p.297-312.

KLIR, G. J., YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic-** Theory and Applications,. New Jersey- USA: Prentice Hall, 1995, 573p.

KOJIMA. F., KUBOTA, N., HASHIMOTO, S. Identification of Crack Profiles using Genetic Programming and Fuzzy Inference, **Journal of Materials Processing Technology**, n.108, 2001, p.263-267.

KOMMO, M., ARAI, K., SAITO, S. Coalescence of Dispersed Drops in na Agitated Tank, **J. Chem. Engng. Japan**, v.21, 1988, p.335-338.

KOO, K. Stable adaptive fuzzy controller with time-varying dead-zone; **Fuzzy Sets and Systems**; n.121; 2001; p.161–168.

KUKOLJ, D. D., KUZMANOVIC, S. B., LEVI, E. Design of a PID-like compound fuzzy logic controller; **Engineering Applications of Artificial Intelligence**; n.14; 2001; p.785–803.

LEE, M., CHUNG, H., YU, F. Modeling of hierarchical fuzzy systems; **Fuzzy Sets and Systems**; n.138; 2003, p.343–361.

LEE, C. W., SHIN, Y. C. Construction of fuzzy systems using least-squares method and genetic algorithm; **Fuzzy Sets and Systems**; n.137; 2003; p.297-323.

LESKI, J. M. Neuro-fuzzy system with learning tolerant to imprecision; **Fuzzy Sets and Systems**; n.138; 2003; p.427–439.

LIAN, R., HUANG, S. A mixed fuzzy controller for MIMO systems; **Fuzzy Sets and Systems**; n. 120; 2001; p.73–93.

LIN, C. A reinforcement learning adaptive fuzzy controller for robots; **Fuzzy Sets and Systems** n.137; 2003; p.339–352.

LIU, F., PEI, R., GUAM, X. A New Algorithm of fuzzy on-line identification for nonlinear systems; **Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation**; 2002; p. 103-106.

LU, J., CHEH, G., YING, H. Predictive Fuzzy PID Control: theory, design and simulation; **Information Sciences**, n.137; 2001; p.158-187.

MACHADO, R. A. F. **Otimização e Controle de Reatores de Polimerização em Batelada**, Florianópolis - Brasil, 155p. Dissertação (Departamento de Engenharia Química e de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina), 1996.

MACHADO, R. A. F., BOLZAN, A. Control of Batch Polymerization Reactor, **Chemical Engineering Journal**, v.70, 1988, p.1-8.

MACHADO, R. A. **Modelagem e Simulação da Distribuição de Tamanho de Partícula em Sistemas de Polimerização em Suspensão**, Rio de Janeiro - Brasil, 264p. Tese (COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro), 2000.

MAGGIORIS, D., GOULAS, A., ALEXOPOULOS, A. H., CHATZI, E. G., KIPARISSIDES, C. Prediction of Particle Size Distribution in Suspension Polymerization Reactor: Effect of Turbulence Nonhomogeneity, **Chemical Engineering Science**, v.55, 2000, p.4611-4627.

MAHESH, M. M., MADHAVAN, K. P., CHIDAMBARAM, M. Fuzzy control of a semi-batch copolymerization reactor; **Chemical Engineering and Processing**, n.32; 1993; p-327-33.

MAMDANI, E. H. Applications of Fuzzy Algorithm for Simple Dynamic Plant, **Proceedings IEE**, n.121, 1974, p.1585-1588.

MAMDANI, E. H., **Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers In Fuzzy Reasoning and Its Applications**, Academic Press, London, 1981.

MARSEGUERRA, M., ZIO, E. Model-free fuzzy tracking control of a nuclear reactor; **Annals of Nuclear Energy**; n.30; 2003; p.953–981

MASCIOLI, C. M. **Otimização do Processo de Polimerização do Estireno: A Distribuição do Tamanho das Partículas do Poliestireno**. Florianópolis, 79p. Dissertação (Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas - Universidade Federal de Santa Catarina), 2001.

MASTOROCOSTAS, P. A., THEOCHARIS, J. B., S. PETRIDIS, V.S. A constrained orthogonal least-squares method for generating TSK fuzzy models: Application to short-term load forecasting, **Fuzzy Sets and Systems**, n.118, 2001, p.215-233.

MAZZUCCO, M. M., CANCELIER, A., BOLZAN, A., Estratégia de Controle Baseada em Redes Neurais Associada a um Sistema Especialista - **III Congresso Brasileiro de Redes Neurais** - Florianópolis SC, 1997, p.179-184.

MAZZUCCO, M. M., MACHADO, R. A. F., BOLZAN, A., BARCIA, R. M. Aplicação de uma Rede Neural Feedforward para Controle de Sistemas com tempo morto utilizando horizontes de Controle e Predição Mínimos, **EIAIQ'98 Encuentro Latino Americano de Engenharia Química**, Antofagasta (Chile), 1998, p.599-609.

MAZZUCCO, M. M., CLAUMANN, C. A., CARLSON, L. H. C., BOLZAN, A., BARCIA, R. M. Ajuste de um Controlador PID através de algoritmos Genéticos, **EIAIQ'98 Encuentro Latino Americano de Engenharia Química**, Antofagasta (Chile), 1998b, p.488-598.

MAZZUCCO, M. M., MACHADO, R. A. F., BOLZAN, A., BARCIA, R. M. Application of Genetic Algorithms to the Adjustment of the Supports of Fuzzy Sets in a Mamdani Controller, **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.17, n.04-07, 2000, p.627-637.

MOORE, C. G., HARRIS, C. J. Aspects of Fuzzy Control and Estimation. In: HARRIS C. J. **Advances in Intelligent Control**. London - Great Britain: Taylor & Francis, 1994. p.201-241.

MUTHUSAMY, K., SUNG, S. C, VLACH, M., ISHII, H. Scheduling with fuzzy delays and fuzzy precedences; **Fuzzy Sets and Systems**; n.134; 2003; p.387-395.

NEUROTH, M., MACCONNELL, P., STRONACH, F., VAMPLEW P. Improved Modelling and Control of Oil and Gas Transport Facility Operations using Artificial Intelligence, **Knowledge Based Systems**, n.13, 2000, p.81-92.

NISHIKAWA, M., MORI, F., FUJIEDA, S. Average Drop Size in a Liquid-Liquid Phase Mixing Vessel, **J. Chem. Engng. Japan**, v.20, 1987, p.82-88.

MRAD, F., DEEB, G. Experimental Comparative Analysis of Adaptive Fuzzy Logic Controllers; **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 10, n. 2;2002; p.250-155.

ÖZKAN, G., ÖZEN, S., ERDOĞAN, S., HAPOĞLU, H. ALPBAZ, M. Nonlinear Control of Polymerization Reactor, **Computers and Chemical Engineering**, n.25, 2001, p.757-763.

PATEL, A. V. Analytical structures and analysis of fuzzy PD controllers with multifuzzy sets having variable cross-point level; **Fuzzy Sets and Systems**; n.129; 2002; p.311–334.

POLACCO, G., SEMINO, D., PALLA, M. Measurements of Particle-Size Distribution During Suspension Polymerization, **Polym. Int.**, v.48, 1999. p.392-397.

POLIT, M., ESTABEN, M., LABAT, P. A fuzzy model for an anaerobic digester, comparison with experimental results; **Engineering Applications of Artificial Intelligence**; n.15; 2002; p.385-390.

RAJAPAKSE, A., FURUTA, K., KONDO, S.; Evolutionary Learning of Fuzzy Logic Controllers and Their Adaptation Through Perpetual Evolution; **IEE Transactions on Fuzzy Systems**; v.10, n. 3; 2002; p.309-321.

RUMBAUGH, J., BLAHA, M., PREMERLANI, W., EDDY, F., LORENSEN, W. **Modelagem e Projetos Baseados e Objetos**, Rio de Janeiro– Brasil, Editora Campus, 1994. 656p.

SARMA, P., RENGASWAMY, R. Multivariable Gain-Scheduled Fuzzy Logic Control of a Fluidized Catalytic Cracker Unit , **Computers & Chemical Engineering**, n.24, 2000, p.1083-1089.

SARMA, P. Multivariable gain-scheduled fuzzy logic control of na exothermic reactor; **Engineering Applications of Artificial Intelligence**; n.14; 2001; p.457-471.

SEBZALLI, Y. M., LI, R. F., CHEN, F. Z., WANG, X. Z. Knowledge Discovery from Process, Operational Data for Assessment na Monitoring of Operator's Performance, **Computers & Chemical Engineering**, n.24, 2000, p.409-414.

SEBORG, D. E., EDGAR, T. F., MELLICHAMP, D. A., **Process Dynamics and Control**, John Wiley & Sons, Canada, 1989. 717p.

SHIEH, C. Genetic fuzzy control for time-varying delayed uncertain systems with a robust stability safeguard; **Applied Mathematics and Computation**; n.131; 2002; p.39–58.

SILVA, C. M., BISCAIA JR, E. C. Genetic algorithm development for multi-objective optimization of batch free-radical polymerization reactors; **Computers and Chemical Engineering**; n.27; 2003; p.1329- 1344.

SOUSA Jr, R., ALMEIDA, P. I. F.; Design of a fuzzy system for the control of a biochemical reactor in fed-batch culture; **Process Biochemistry**; n.37; 2001; p.461-469.

SPIEGEL, R. J.,TURNER, M. W., MCCORMICK, V. E. Fuzzy-logic-based controllers for efficiency optimization of inverter-fed induction motor drives; **Fuzzy Sets and Systems**; n.137; 2003; p.387–401.

STRENSTROM, M. K. **A Dynamic Model and Computer Compatible Strategies for Wastewater Treatment Plants**, Thesis(Clemson University, Clemson, SC, USA), 1976.

SUGENO, M. Fuzzy Measures and Fuzzy Integrals: A Survey. In: GUPTA, M. M., SARIDIS, G. N., GAINES, B. R. **Fuzzy Automata and Decision Processes**. Amsterdam- Netherlands: North-Holland, 1977. p.89-102.

TANG, B., DA, X., WANG, W. An Adaptative Control Method for Time-Varying Systems. *European Journal of Operational Research*, n.124, 2000, p.342-352.

VAN LITH, P. F., BETLEM, B. H.L., ROFFEL, B. Combining prior knowledge with data driven modeling of a batch distillation column including start-up; **Computers and Chemical Engineering**; n.27; 2003; p.1021- 1030.

VEGA, M. P., LIMA, E. L., PINTO, J. C. In-line Monitoring of Weight Average Molecular Weight in Solution Polymerization using Intrinsic Viscosity Measurements, **Polymer**, n.42, 2001, p.3909-3914.

VENKAT, A. N., VIJAYSAI, P., GUDI, R. D. Identification of complex nonlinear processes based on fuzzy decomposition of the steady state space; **Journal of Process Control**; n.13; 2003; p-473–488.

VIEIRA, R. A. M., EMBIRUÇU, M., SAYER, PINTO, C. J.C., LIMA, E.L. Control strategies for complex chemical processes. Applications in polymerization processes; **Computers and Chemical Engineering**, n.27; 2003; p.1307-1327.

VUKOVIC, P. D. One-step ahead predictive fuzzy controller; **Fuzzy Sets and Systems**; n.122; 2001; p.107–115.

WANG, S., WANG, B., WANG, G.; A triangular norm-based fuzzy predicate logic; **Fuzzy Sets and Systems**; n.138; 2003; p.177-186.

WEBER. S. A General Concept of Fuzzy Connectives, Negations and Implications based on T-norms and T-co-norms. **Fuzzy Sets and Systems**, n.11, 1983, p.115-134.

WONG, C. H., SHAH, S. L., BOURKE, M. M., FISHER, D. G. Adaptative Fuzzy Relational Predictive Control, **Fuzzy Sets and Systems**, n.115, 2000, p.247-260.

YAGER, R. R. On the Measure of Fuzziness and Negation, Part I: Membership in the Unit Interval. **International Journal of General Systems**. V.5, n.4, 1979, p.221-229.

YAGER, R. R., FILEV, D. P. **Essentials of Fuzzy Modeling and Control**, New York – USA: John Wiley & Sons, 1994. 388p.

YUAN, H. G. KALFAS, G. RAY, W. H. Suspension Polymerization- A Review, **JMS-Rev. Macrom Chem Phys**, 1991. p.215-259,

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, n.8, 1965. p.338-353.

ZADEH, L. A. Calculus of Fuzzy Restrictions. In: ZADEH, L. A. et al. **Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes**. New York - USA: Academic Press, 1975. p.1-39.

ZADEH, L. A. A Theory of Approximate Reasoning. In: Hayes, J. et al. **Machine Intelligence**. New York - USA: Halstead Press, v.9. 1979. p.149-194.

ZHANG, Z., CHANG, J. A fuzzy control algorithm with high controlling precision; **Fuzzy Sets and Systems**; 2002; p.

ZHAO, F., TIAN, Y., TADÉ, M., LI, H.; A time-delay compensation strategy for processes with uncertainties; **Computers and Chemical Engineering**; n.26; 2002; p.1437–1447.

APÊNDICE A – TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS

A teoria de conjuntos difusos foi originada na década de 1960 a partir da generalização matemática da teoria dos conjuntos. Advinda em um período de realizações intensas nos sistemas de informação e computação está sendo extensamente aplicada, sobretudo no desenvolvimento de sistemas de controle automático de processos. A simplicidade de sua aplicação oculta, em muitos casos, a devida teoria e desenvolvimento matemáticos. Assim em poucos casos são apresentados os conceitos fundamentais, que em última instância conduzem a solução. Desta forma, as simbologias e nomenclaturas são diversas, o que motivou a reunião dos conceitos fundamentais com uma notação clara e devidamente exemplificada.

Antes de definir um conjunto difuso é conveniente relembrar alguns conceitos dos conjuntos ditos clássicos (*crisp sets*). Um conjunto pode ser definido como uma coleção de entidades que satisfazem uma dada condição, por exemplo, o conjunto dos números pares, o conjunto dos números pares no intervalo $[1, 10]$, o conjunto das temperaturas maiores que 10°C e menores que 100°C . Esta condição representa qualquer indicador que inclua ou exclua um elemento de um conjunto. Quando esta condição é dada por uma função, diz-se que os membros do conjuntos são definidos por sua função característica. Portanto os conjuntos podem compreender um número (cardinalidade) finito ou infinito de elementos.

Todo conjunto está inserido em um dado universo (X) e pode apresentar como elementos outros conjuntos (subconjuntos), ou não possuir nenhum elemento (\emptyset). As principais notações matemáticas para estes conceitos são:

$A \subset X$; o conjunto A está incluído, ou contido, no universo X .

$A \supset A_1$; o conjunto A contém o conjunto A_1 .

$A_1 = \{a_1, a_2, a_3\}$; a_1, a_2 e a_3 são elementos de A_1 .

$A_2 = \{a | P(a)\}$; A_2 é composto pelos elementos que satisfazem a propriedade P .

$3^{|A_1|}$; a cardinalidade do conjunto A_1 é 3.

$A \neq \emptyset$; o conjunto A não é vazio.

A condição (μ) para que a_1 esteja incluído em A_3 é $a > v$. A função característica, ilustrada na figura 123 é: $\mu = 1$, para $a > v$ e $\mu = 0$, para $a \leq v$.

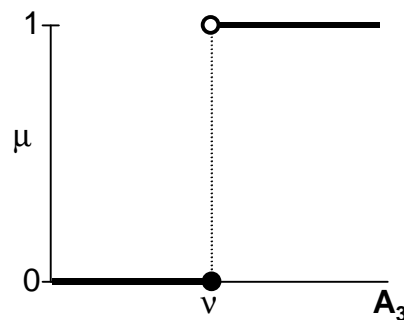


Figura 123 - Função característica para um conjunto clássico

Os operadores básicos para conjuntos são a união (\cup) e a interseção (\cap). A união dos elementos contidos no conjunto A , equação (7), com os elementos contidos no conjunto B resulta em todos os elementos dos conjuntos A e B . A interseção dos elementos contidos no conjunto A , equação (8), com os contidos no conjunto B resulta em todos os elementos comuns aos conjuntos A e B . Assim, escreve-se:

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ OU } x \in B\} \quad (7)$$

$$A \cap B = \{x | x \in A \text{ E } x \in B\} \quad (8)$$

De uma forma generalizada:

$$\bigcup_{i \in I} \mathbf{A}_i = \mathbf{A}_1 \cup \mathbf{A}_2 \cup \mathbf{A}_3 \dots \cup \mathbf{A}_I \quad (9)$$

$$\bigcap_{i \in I} \mathbf{A}_i = \mathbf{A}_1 \cap \mathbf{A}_2 \cap \mathbf{A}_3 \dots \cap \mathbf{A}_I \quad (10)$$

Outros conceitos, propriedades e operações serão revistos na definição dos conjuntos difusos.

A-1. Conjuntos Difusos

A definição de um conjunto difuso, introduzida por Zadeh (1965) estende a função característica de um conjunto clássico para valores diferentes de 0 e 1. Assim, um elemento pode pertencer a um conjunto difuso com grau de pertinência variando entre 0 e 1. A figura 124 ilustra algumas funções características, também denominadas funções de pertinência, que atribuem diferentes graus de pertinência de um elemento A' sobre os conjuntos difusos \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 e \mathbf{A}_3 .

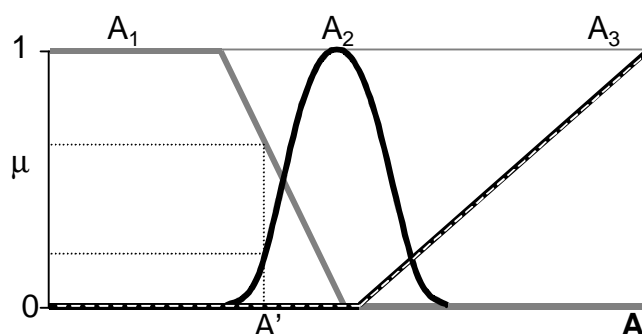


Figura 124 - Funções características para um conjunto difuso.

Para a ilustração da figura 124, pode-se representar as funções de pertinência pela notação: $\mu_{A_1}(A): \mathbf{A} \rightarrow [0, 1]$, ou seja, a função de pertinência do conjunto difuso \mathbf{A}_1 , contido no universo \mathbf{A} , atribui graus variando de 0 a 1 ao elemento A' do universo \mathbf{A} . As funções de pertinência serão discutidas nas próximas seções. A possibilidade de um elemento pertencer a um determinado conjunto pode ser explorada de várias formas. Duas delas, o tratamento de incertezas e variáveis

lingüísticas, talvez sejam as mais importantes. Conceitos vagos, como “a temperatura é alta” ganham uma maneira formal para serem tratados. Assim, pode-se afirmar que uma determinada temperatura, pertence ao conjunto das temperaturas altas com um determinado grau. É necessário observar, que o conceito “temperatura alta” é fortemente dependente do contexto. Assim, a temperatura de 300° C pode ser considerada alta para um forno doméstico, mas é considerada baixa para um forno metalúrgico.

Duas notações para representação de um conjunto difuso são, comumente utilizadas, a contínua e a discreta. Considere-se o seguinte exemplo:

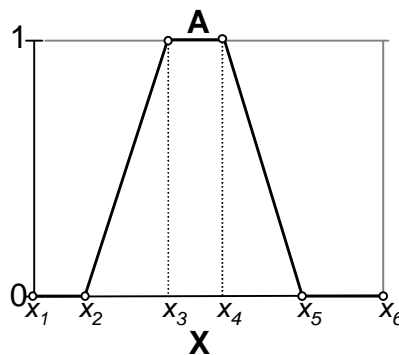


Figura 125 - Representação contínua de um conjunto difuso.

Na figura 125 o conjunto difuso **A**, composto por 5 retas, possui um formato trapezoidal e sua função de pertinência pode ser representada pela equação (11):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq x_2 \\ (x - x_2)/(x_3 - x_2), & \text{se } x_2 < x < x_3 \\ 1, & \text{se } x_3 \leq x \leq x_4 \\ (x_5 - x)/(x_5 - x_4), & \text{se } x_4 < x < x_5 \\ 0, & \text{se } x \geq x_5 \end{cases} \quad (11)$$

O conjunto **A** é composto de todos os infinitos, pares $\{x, \mu(x)\}$ no domínio do universo **X**. Do ponto de vista computacional, a implementação pode requerer uma representação discreta do conjunto difuso. Considerando o conjunto discreto **A** da figura 126, escrevem-se todos os, finitos, pares $\{x, \mu(x)\}$ no domínio do universo **X**, dado um determinado intervalo de discretização.

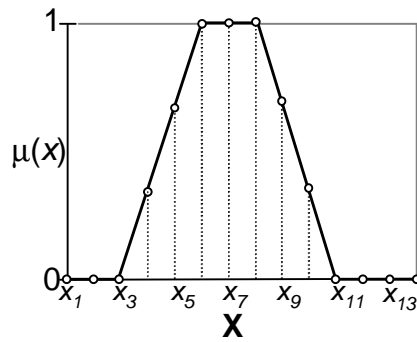


Figura 126 - Representação discreta de um conjunto difuso

Os pares devem ser escritos na forma *grau de pertinência/elemento*, ou seja:

$$\mathbf{A} = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \mu_A(x_3)/x_3 + \dots + \mu_A(x_i)/x_i \tag{12}$$

Ou de forma mais compacta:

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^N \mu_A(x_i)/x_i \tag{13}$$

onde N é o número de pontos discretizados.

Se $N=\infty$, a equação (13) deve ser reescrita na forma da equação (14) que é a sua representação é contínua. Neste trabalho será utilizada a notação discreta, que é mais comum para implementação computacional.

$$\mathbf{A} = \int_X \mu_A(x)/x \tag{14}$$

Devido ao acréscimo de informações incorporadas pelos conjuntos difusos, em relação aos clássicos, algumas propriedades adicionais se fazem necessárias.

A-2. Propriedades dos Conjuntos Difusos

As principais propriedades que caracterizam um conjunto difuso são: corte- α , altura, núcleo, suporte e convexidade.

Um *corte- α* (α -cut) sobre um conjunto \mathbf{A} , ${}^\alpha\mathbf{A}$, incluso em um universo \mathbf{X} é representado por um conjunto clássico que contém todos os elementos do universo \mathbf{X} , com graus de pertinência maiores ou iguais que o parâmetro de corte α . O *corte- α* é denominado *corte- α forte* quando contém, apenas, os elementos do universo \mathbf{X} , com graus de pertinência maiores que o parâmetro de corte. As equações (15) e (16) e a figura 127 representam esta definição.

$${}^\alpha\mathbf{A} = \{x \in \mathbf{X} \mid \mu_{\mathbf{A}}(x) \geq \alpha\} \tag{15}$$

$${}^{\alpha+}\mathbf{A} = \{x \in \mathbf{X} \mid \mu_{\mathbf{A}}(x) > \alpha\} \tag{16}$$

Esta notação foi adotada por Klir e Yuan (1995) e também será neste trabalho.

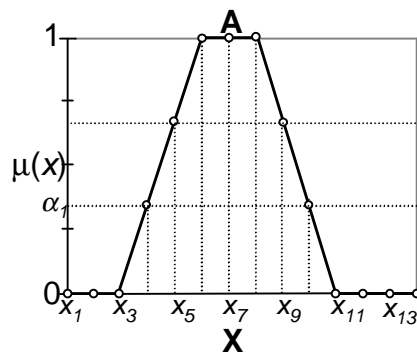


Figura 127 - Um *corte- α* para um conjunto \mathbf{A} no universo \mathbf{X} .

Para o caso discreto apresentado na figura 127 têm-se, os seguintes *corte- α* e *corte- α forte*:

$${}^{\alpha_1}\mathbf{A} = \{x_4 ; x_5 ; x_6 ; x_7 ; x_8 ; x_9 ; x_{10} ; x_{11}\}$$

$${}^{\alpha_1+}\mathbf{A} = \{x_5 ; x_6 ; x_7 ; x_8 ; x_9 ; x_{10}\}$$

$${}^{\alpha_1}\mathbf{A} = \{x_1 ; x_2 ; x_3 ; x_4 ; x_5 ; x_6 ; x_7 ; x_8 ; x_9 ; x_{10} ; x_{11} ; x_{12} ; x_{13} ; x_{14}\}$$

O *conjunto nível* de um conjunto difuso \mathbf{A} , $Nível(\mathbf{A})$, representa o conjunto de todos os *cortes- α* . Para o caso da figura 127, o conjunto nível fica:

$$Nível(\mathbf{A}) = \{0 ; \mu(x_4) ; \mu(x_5) ; 1\}.$$

A *altura* de um conjunto difuso \mathbf{A} , $Altura(\mathbf{A})$, representa o maior grau de pertinência que pode ser atribuído à um elemento do universo \mathbf{X} , no referido conjunto. A equação (17) define esta propriedade. Um conjunto difuso que apresenta altura menor que 1 é dito sub-normal. Se $Altura(\mathbf{A})=1$, o conjunto é dito normal, figura 128.

$$Altura(\mathbf{A}) = \text{Max}(\mu_A(x)) \tag{17}$$

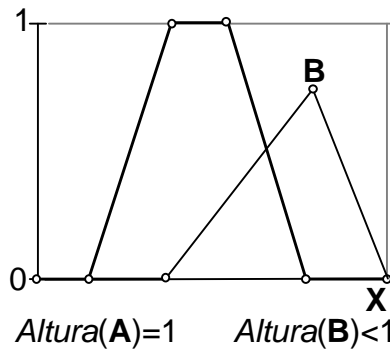


Figura 128 - Altura de um conjunto \mathbf{A} normal e de um conjunto \mathbf{B} subnormal.

O *núcleo* de um conjunto difuso \mathbf{A} , $Núcleo(\mathbf{A})$, é representado pelos elementos do universo \mathbf{X} que pertencem ao referido conjunto com grau 1. Matematicamente, esta definição é apresentada nas equações (18) e (19) . A figura 129 exemplifica o núcleo de um conjunto difuso \mathbf{A} .

$$Núcleo(\mathbf{A}) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \tag{18}$$

$$Núcleo(\mathbf{A}) = {}^1A \tag{19}$$

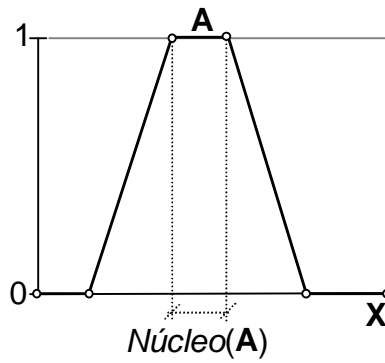


Figura 129 - Núcleo do conjunto difuso **A** no universo **X**

O *suporte* de um conjunto difuso **A**, é representado pelos elementos do universo **X** que possuem graus de pertinência diferentes de zero. Este conceito está formalizado nas equações (20) e (21). A figura 130 exemplifica este conceito.

$$Suporte(\mathbf{A}) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \tag{20}$$

$$Suporte(\mathbf{A}) = {}^{0+}\mathbf{A} \tag{21}$$

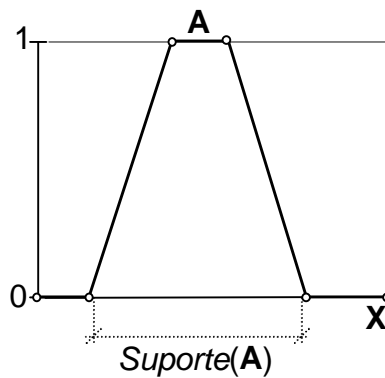


Figura 130 - Suporte de um conjunto difuso **A** no universo **X**.

Um conjunto difuso **A** é dito convexo se é unimodal. As equações (22) e (23), conceituam a convexidade de um conjunto difuso. A figura 131 exemplifica este conceito.

$$\forall x_1, x_2, x_3 \in X \mid x_1 \leq x_2 \leq x_3 : \mu_A(x_2) \geq \text{Min}(\mu_A(x_1), \mu_A(x_3)) \tag{22}$$

$$\forall x_1, x_2 \in X \text{ e } \lambda \in [0, 1] : \mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \text{Min}(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)) \quad (23)$$

Onde λ é um parâmetro de deslocamento.

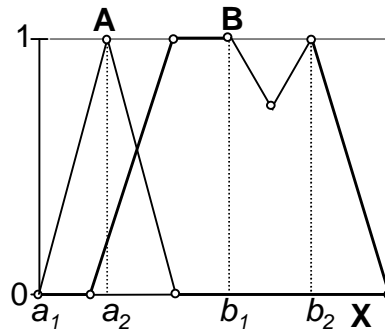


Figura 131 - Um conjunto difuso convexo **A** e um não-convexo **B**.

Aplicando a equação (23):

$$\mu_A(0,5 \cdot a_1 + 0,5 \cdot a_2) \geq \text{Min}(0, 1) : \text{o conjunto } \mathbf{A} \text{ é convexo.}$$

$$\mu_B(0,5 \cdot b_1 + 0,5 \cdot b_2) < \text{Min}(1, 1) : \text{o conjunto } \mathbf{B} \text{ é não-convexo.}$$

Estas propriedades são essenciais para a compreensão das operações com conjuntos difusos, bem como mecanismos de inferência.

A-3. Operações Básicas com Conjuntos Difusos

Para os conjuntos clássicos, os operadores de união (\cup, \vee), interseção (\cap, \wedge) e complemento (\bar{A}, \neg) são definidos e únicos para uma função de transferência bi-valorada, onde um elemento está incluído ou não nos conjuntos que servem de argumento aos operadores. Considere um elemento x_1 , dois conjuntos clássicos **A** e **B**, contidos em um universo **X**, e um conjunto **C** que recebe o resultado da operação:

$$\text{Se } x_1 \in \mathbf{A} \text{ e } x_1 \in \mathbf{B} \text{ então } x_1 \in \mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \mathbf{C} ; \mu_C(x_1) = 1$$

$$\text{Se } x_1 \in \mathbf{A} \text{ e } x_1 \notin \mathbf{B} \text{ então } x_1 \in \mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \mathbf{C} ; \mu_C(x_1) = 1$$

$$\text{Se } x_1 \notin \mathbf{A} \text{ e } x_1 \in \mathbf{B} \text{ então } x_1 \in \mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \mathbf{C} ; \mu_C(x_1) = 1$$

Se $x_1 \notin \mathbf{A}$ e $x_1 \notin \mathbf{B}$ então $x_1 \notin \mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 0$

Se $x_1 \in \mathbf{A}$ e $x_1 \in \mathbf{B}$ então $x_1 \in \mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 1$

Se $x_1 \in \mathbf{A}$ e $x_1 \notin \mathbf{B}$ então $x_1 \notin \mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 0$

Se $x_1 \notin \mathbf{A}$ e $x_1 \in \mathbf{B}$ então $x_1 \notin \mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 0$

Se $x_1 \notin \mathbf{A}$ e $x_1 \notin \mathbf{B}$ então $x_1 \notin \mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 0$

Se $x_1 \in \mathbf{A}$ então $x_1 \notin \neg \mathbf{A} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 0$

Se $x_1 \notin \mathbf{A}$ então $x_1 \in \neg \mathbf{A} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 1$

Se $x_1 \in \mathbf{B}$ então $x_1 \notin \neg \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 0$

Se $x_1 \notin \mathbf{B}$ então $x_1 \in \neg \mathbf{B} = \mathbf{C}$; $\mu_{\mathbf{C}}(x_1) = 1$

A tabela 17 apresenta estas asserções de forma mais compacta:

Tabela 17 - Operações de União, Interseção e Complemento para dois conjuntos clássicos, **A** e **B**.

$\mu_{\mathbf{A}}(x_1)$	$\mu_{\mathbf{B}}(x_1)$	$\mu_{\mathbf{A} \cup \mathbf{B}}$	$\mu_{\mathbf{A} \cap \mathbf{B}}$	$\mu_{\neg \mathbf{A}}$	$\mu_{\neg \mathbf{B}}$
1	1	1	0	0	0
1	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1

A tabela 17 é baseada apenas em graus de pertinência binários, desde que na lógica clássica um elemento pertence ($\mu=1$) ou não pertence ($\mu=0$) a um conjunto. Esta tabela representa a base da álgebra *booleana* e por isso foram utilizadas as conectivas lógicas \vee (OR) , \wedge (AND) e \neg (NOT).

Como para conjuntos difusos um elemento pode pertencer a um determinado conjunto com graus entre 0 e 1, existem várias formas de representar as operações de união, interseção e complemento. Zadeh (1965) definiu estes operadores conforme as equações (24), (25) e (26).

$$\mu_{\mathbf{A} \cup \mathbf{B}}(x) = \text{Máx}(\mu_{\mathbf{A}}(x) , \mu_{\mathbf{B}}(x)) \text{ ou } \mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \text{Máx}(\mathbf{A} , \mathbf{B}) \tag{24}$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \text{ ou } \mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \text{Min}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \quad (25)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ ou } \bar{\mathbf{A}} = 1 - \mathbf{A} \quad (26)$$

Os operadores descritos nas equações (24), (25) e (26) são denominados *operadores difusos padrão*.

As operações *Máx* e *Min* podem ser implementadas, computacionalmente, através de comparações entre os elementos ou através da forma algébrica destas operações, Yager & Filev (1994), apresentadas nas equações (27) e (28).

$$\text{Máx}(a, b) = \frac{a + b + |a - b|}{2} \quad (27)$$

$$\text{Min}(a, b) = \frac{a + b - |a - b|}{2} \quad (28)$$

A-3.1. Interseção entre Conjuntos Difusos

A interseção (conjunção) entre conjuntos difusos é definida por uma família de funções denominadas *T-normas*, simbolizada por *T*. Uma *T-norma* é uma função que opera sobre o intervalo [0, 1] satisfazendo, ao menos, as condições (29), (30), (31) e (32).

$$T(1, \mu_B(x)) = \mu_B(x) \quad (29)$$

$$\mu_B(x) \leq \mu_C(x) \rightarrow T(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq T(\mu_A(x), \mu_C(x)) \quad (30)$$

$$T(\mu_A(x), \mu_B(x)) = T(\mu_B(x), \mu_A(x)) \quad (31)$$

$$T(\mu_A(x), T(\mu_B(x), \mu_C(x))) = T(T(\mu_A(x), \mu_B(x)), \mu_C(x)) \quad (32)$$

A equação (29) representa a requisição de que a interseção entre um elemento de um conjunto **A**, com grau 1 e um elemento de um conjunto B com grau

x, produza o elemento com menor grau de pertinência. A equação (30) expressa a condição de monotonicidade, ou seja, que o aumento do grau de pertinência de um elemento sobre dois conjuntos **A** e **B**, se manifeste como o aumento do grau de pertinência da interseção entre estes conjuntos. As equações (31) e (32) denotam as condições de comutatividade e associatividade, respectivamente, ou seja, que independentemente da ordem dos elementos ou da ordem de aplicação a que uma *T-norma* é submetida, os mesmos resultados serão obtidos. Por exemplo, a aplicação da operação difusa padrão, *Min*, sobre os conjuntos da figura 132:

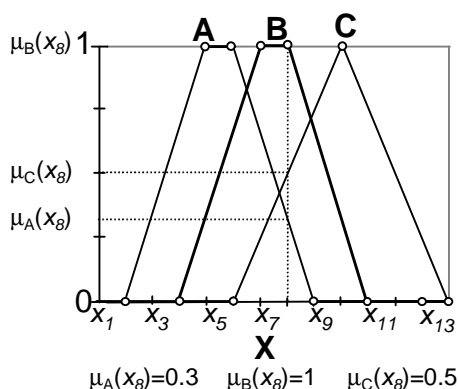


Figura 132 – Demonstração das requisições para caracterização de uma *T-norma*.

Para a condição de interseção limitada:

$$\text{Min}(0,3 , 1)=0,3$$

Para a condição de monotonicidade:

$$1 \geq 0,5 \rightarrow \text{Min}(0,3 , 1) \geq \text{Min}(0,3 , 0,5) \therefore 1 > 0,5 \rightarrow 0,3 = 0,3$$

Para a condição de comutatividade:

$$\text{Min}(0,3 , 1)= \text{Min}(1 , 0,3) \therefore 0,3=0,3$$

Para a condição de associatividade:

$$\text{Min}(0,3 , \text{Min}(1 , 0,5))= \text{Min}(1 , \text{Min}(0,3 , 0,5)) \therefore 0,3=0,3$$

O operador padrão *Min* é o mais utilizado, porém os operadores expressos nas equações (33), (34) e (35) também são muito populares:

$$T(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x); \quad \text{Produto Algébrico} \quad (33)$$

$$T(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \text{Max}(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1); \quad \text{Diferença Limitada} \quad (34)$$

$$T(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \begin{cases} \mu_A(x); & \mu_B(x) = 1 \\ \mu_B(x); & \mu_A(x) = 1 \\ 0 & ; \mu_A(x) \neq 1 \text{ e } \mu_B(x) \neq 1 \end{cases} \quad \text{Interseção drástica (T}_W\text{)} \quad (35)$$

As equações (35) (Weber, 1983), e (25) (Zadeh, 1965), são situações extremas, portanto, o resultado de qualquer *T-norma* deve estar situado entre estas, ou seja:

$$\text{Interseção Drástica}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq \mathbf{T}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (36)$$

Klir e Yuan (1995) e Yager e Filev (1994) apresentam outras *T-normas* e discussões mais aprofundadas sobre este tema.

A-3.2. União entre Conjuntos Difusos

A união (disjunção) entre conjuntos difusos é definida por uma família de funções denominados *T-conormas*, *T-co-normas* ou ainda *S-normas*, aqui simbolizada por *S*. Uma *S-norma* é uma função que opera sobre o intervalo [0, 1] satisfazendo, ao menos, as condições (37), (38), (39) e (40).

$$S(0, \mu_B(x)) = \mu_B(x) \quad (37)$$

$$\mu_B(x) \leq \mu_C(x) \rightarrow S(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq S(\mu_A(x), \mu_C(x)) \quad (38)$$

$$S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = S(\mu_B(x), \mu_A(x)) \quad (39)$$

$$S(\mu_A(x), S(\mu_B(x), \mu_C(x))) = S(T(\mu_A(x), \mu_B(x)), \mu_C(x)) \quad (40)$$

É fácil observar que as condições básicas para caracterização de uma *S-norma* são idênticas às que caracterizam uma *T-norma*.

Os operadores mais utilizados para representar a união difusa estão expressos nas equações (41), (42), (43) e (44):

$$S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x)); \quad \text{União Padrão} \quad (41)$$

$$S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x); \quad \text{Soma Algébrica} \quad (42)$$

$$S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \text{Min}(1, \mu_A(x) + \mu_B(x)); \quad \text{Soma Limitada} \quad (43)$$

$$S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \begin{cases} \mu_A(x); & \mu_B(x) = 0 \\ \mu_B(x); & \mu_A(x) = 0 \\ 1 & ; \mu_A(x) \neq 0 \text{ e } \mu_B(x) \neq 0 \end{cases} \quad \text{União Drástica (S}_W\text{)} \quad (44)$$

Novamente, as equações (44) (Weber, 1983), e (41) (Zadeh, 1965), representam casos extremos, portanto, o resultado de qualquer *S-norma* deve estar situado entre estes, ou seja:

$$\text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq \mathbf{S}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \leq \text{Soma Drástica}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (45)$$

Jager (1995) lista outros operadores de interseção e união mais complexos e indica Bellman e Giertz (1973) e Gupta e Qi (1991) para uma revisão destes operadores. Porém os operadores listados nas equações (29), (30), (31), (32), (41), (42), (43) e (44) são os mais utilizados para controle de processos, com predominância aos operadores padrão, utilizados neste trabalho.

A-3.3. Complemento de Conjuntos Difusos

O complemento de um conjunto difuso **A**, simbolizado por **C**, pode ser definido como o grau, $C(x)$, com que os elementos deste conjunto não pertencem ao conjunto **A**. Ao menos as condições apresentadas nas equações (46), (47) e (48)

devem ser satisfeitas para que uma função caracterize o complemento de um conjunto difuso:

$$C(\mu_A(x))=1; x=0 \quad (46)$$

$$C(\mu_A(x))=0; x=1 \quad (47)$$

$$\mu_A(x_1) \geq \mu_A(x_2) \rightarrow C(\mu_A(x_1)) \leq C(\mu_A(x_2)) \quad (48)$$

Normalmente, para que uma função de pertinência possa ser adotada para representar o complemento de um conjunto difuso, são requeridas propriedades adicionais como a necessidade de continuidade e involução, equação (49).

$$C(C(\mu_A(x)))=x \quad (49)$$

O operador padrão de complemento, Zadeh (1965), é dado pela equação (50):

$$C(\mu_A(x))=1-\mu_A(x) \quad (50)$$

Sugeno (1977) apresentou uma família de operadores de complemento, equação (51), denominada λ - complemento:

$$C_\lambda(\mu_A(x)) = \frac{1-\mu_A(x)}{1+\lambda \cdot \mu_A(x)}; \lambda > 0. \quad (51)$$

Para $\lambda=0$ o λ - complemento se resume ao operador padrão de complemento.

Discussões sobre classes de operadores de complemento, como a de Yager, e sobre equilíbrio ($C(\mu_A(x))=\mu_A(x)$) estão em disponíveis em Klir e Yuan (1995) e Driankov, Hellendoorn e Reinfrank (1996).

A-4. Relações Difusas

Uma relação difusa, constitui uma função que opera sobre conjuntos, expressando o grau com que estes interagem. É representada por uma função de pertinência definida no espaço dos conjuntos expressos na relação, constituindo um conjunto difuso limitado pelo produto cartesiano (\times) entre os conjuntos que servem de argumento à função.

Seja, μ_R , a relação entre os conjuntos **A** e **B** contidos nos universos **X** e **Y**, respectivamente, onde **R** é o conjunto que relaciona **A** e **B**, μ_R é representado por:

$$\forall x \in X, y \in Y : \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \times \mu_B(y) \quad (52)$$

Ou:

$$\begin{aligned} \mu_R(x, y) = & \mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_1))/(x_1, y_1) + \\ & \mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_2))/(x_1, y_2) + \dots + \\ & \mu_R(\mu_A(x_j), \mu_B(y_k))/(x_j, y_k) \end{aligned} \quad (53)$$

Para o caso multi-dimensional:

$$\forall x_i \in X_i ; A_i \subseteq X_i : \mu_R(x_1, \dots, x_i) = \prod_i \mu_{A_i}(x_i) \quad (54)$$

Assim, o conjunto **R** é representado pela equação (55):

$$\mathbf{R} = \sum_{A \times B} \mu_R(\mu_A(x), \mu_B(y))/(x, y) \quad (55)$$

Se **A** e **B** são representados por funções de pertinência contínuas:

$$\mathbf{R} = \int_{A \times B} \mu_R(\mu_A(x), \mu_B(y))/(x, y) \quad (56)$$

Considere o seguinte exemplo: Sejam **A** e **B** conjuntos contidos nos universos **X** e **Y**, e representados pelas funções de pertinência (57) e (58):

$$\mu_A(x) = 0/x_1 + 0,25/x_2 + 1/x_3 + 0,25/x_4 + 0/x_5 \quad (57)$$

$$\mu_B(x) = 0/y_1 + 0,75/y_2 + 1/y_3 + 0,75/y_4 + 0/y_5 \quad (58)$$

A Relação $R_{X \times Y}$ fica:

$$\begin{aligned} \mu_R(x,y) = & [\mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_1))/(x_1,y_1) + \mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_2))/(x_1,y_2) + \\ & \mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_3))/(x_1,y_3) + \mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_4))/(x_1,y_4) + \mu_R(\mu_A(x_1), \mu_B(y_5))/(x_1,y_5)] + \\ & [\mu_R(\mu_A(x_2), \mu_B(y_1))/(x_2,y_1) + \mu_R(\mu_A(x_2), \mu_B(y_2))/(x_2,y_2) + \mu_R(\mu_A(x_2), \mu_B(y_3))/(x_2,y_3) + \\ & \mu_R(\mu_A(x_2), \mu_B(y_4))/(x_2,y_4) + \mu_R(\mu_A(x_2), \mu_B(y_5))/(x_2,y_5)] + [\dots] + [\mu_R(\mu_A(x_5), \mu_B(y_1))/(x_5,y_1) + \\ & \mu_R(\mu_A(x_5), \mu_B(y_2))/(x_5,y_2) + \mu_R(\mu_A(x_5), \mu_B(y_3))/(x_5,y_3) + \mu_R(\mu_A(x_5), \mu_B(y_4))/(x_5,y_4) + \\ & \mu_R(\mu_A(x_5), \mu_B(y_5))/(x_5,y_5)] \end{aligned}$$

Substituindo os graus de pertinência por valores numéricos:

$$\begin{aligned} \mu_R(x,y) = & [\mu_R(0, 0)/(x_1,y_1) + \mu_R(0, 0,75)/(x_1,y_2) + \mu_R(0, 1)/(x_1,y_3) + \mu_R(0, 0,75)/(x_1,y_4) + \\ & \mu_R(0, 0)/(x_1,y_5)] + [\mu_R(0,25, 0)/(x_2,y_1) + \mu_R(0,25, 0,75)/(x_2,y_2) + \mu_R(0,25, 1)/(x_2,y_3) + \\ & \mu_R(0,25, 0,75)/(x_2,y_4) + \mu_R(0,25, 0)/(x_2,y_5)] + [\mu_R(1, 0)/(x_3,y_1) + \mu_R(1, 0,75)/(x_3,y_2) + \\ & \mu_R(1, 1)/(x_3,y_3) + \mu_R(1, 0,75)/(x_3,y_4) + \mu_R(1, 0)/(x_3,y_5)] + [\mu_R(0,25, 0)/(x_4,y_1) + \\ & \mu_R(0,25, 0,75)/(x_4,y_2) + \mu_R(0,25, 1)/(x_4,y_3) + \mu_R(0,25, 0,75)/(x_4,y_4) + \\ & \mu_R(0,25, 0)/(x_4,y_5)] + [\mu_R(0, 0)/(x_5,y_1) + \mu_R(0, 0,75)/(x_5,y_2) + \mu_R(0, 1)/(x_5,y_3) + \\ & \mu_R(0, 0,75)/(x_5,y_4) + \mu_R(0, 0)/(x_5,y_5)] \end{aligned}$$

Se a função $\mu_R(x, y)$ é representada pela *T-norma, Min*:

$$\begin{aligned} \mu_R(x,y) = & [0/(x_1,y_1) + 0/(x_1,y_2) + 0/(x_1,y_3) + 0/(x_1,y_4) + 0/(x_1,y_5)] + [0/(x_2,y_1) + 0,75/(x_2,y_2) + \\ & 0,25/(x_2,y_3) + 0,75/(x_2,y_4) + 0/(x_2,y_5)] + [0/(x_3,y_1) + 0,75/(x_3,y_2) + 1/(x_3,y_3) + 0,75/(x_3,y_4) + \\ & 0/(x_3,y_5)] + [0/(x_4,y_1) + 0,75/(x_4,y_2) + 0,25/(x_4,y_3) + 0,75/(x_4,y_4) + 0/(x_4,y_5)] + [0/(x_5,y_1) + \\ & 0/(x_5,y_2) + 0/(x_5,y_3) + 0/(x_5,y_4) + 0/(x_5,y_5)] \end{aligned}$$

A tabela 18 apresenta a relação difusa para este exemplo de forma mais compacta.

Tabela 18 - Representação tabular para uma relação difusa.

		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
		0	0,25	1	0,25	0
y_1	0	0	0	0	0	0
y_2	0,75	0	0,25	0,75	0,25	0
y_3	1	0	0,25	1	0,25	0
y_4	0,75	0	0,25	0,75	0,25	0
y_5	0	0	0	0	0	0

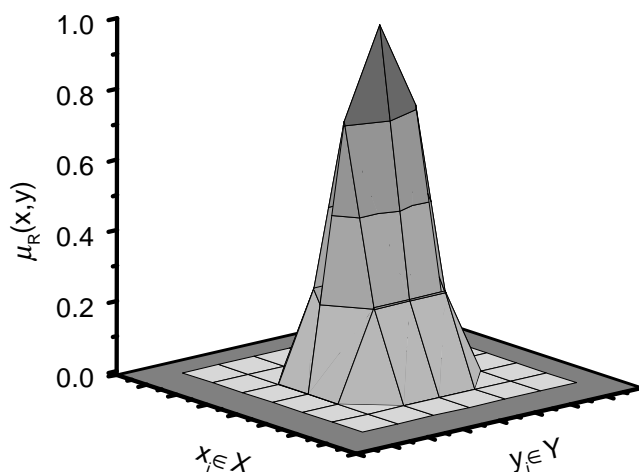
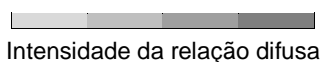


Figura 133 - Representação gráfica de uma relação difusa

A representação tabular, além de mais compacta, facilita a visualização das relações, porém está restrita à relações binárias, desde que para uma relação ternária a representação seria cúbica e para ordens maiores que três não seria possível a representação no plano cartesiano. A figura 133 apresenta, graficamente, a relação difusa da tabela 18.

Como uma relação difusa é um conjunto difuso n -dimensional, são necessárias formas de operar conjuntos sobre relações e vice-versa, ou seja,

operadores para redução e aumento de dimensionalidade. Para isso, foram definidas as operações de projeção e extensão cilíndrica.

A-4.1. Projeção

A projeção, Zadeh (1975), de \mathbf{R} sobre \mathbf{Y} , $\mathbf{P}_{\mathbf{R},\mathbf{Y}}$, é uma operação de redução de dimensionalidade aplicada entre relações difusas ou entre conjuntos difusos. Considere-se a projeção de uma relação $\mathbf{R} \subseteq \mathbf{X} \mid \mathbf{X} = \mathbf{X}_1 \times \mathbf{X}_2 \times \dots \times \mathbf{X}_n$ ($\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$, são conjuntos discretos) sobre $\mathbf{Y} = \mathbf{X}_{i_1} \times \mathbf{X}_{i_2} \times \dots \times \mathbf{X}_{i_k}$, com $\mathbf{Z} = \mathbf{X}_{j_1} \times \mathbf{X}_{j_2} \times \dots \times \mathbf{X}_{j_m}$, onde \mathbf{Y} e \mathbf{Z} são subespaços complementares de \mathbf{X} , ou seja, $\mathbf{X} = \mathbf{Y} \times \mathbf{Z}$. A projeção, $\mathbf{P}_{\mathbf{R},\mathbf{Y}}$, equações (59) e (60), possui a dimensionalidade de \mathbf{Y} .

$$\mathbf{P}_{\mathbf{R},\mathbf{Y}} = \sum_{\forall [x_{i_1}, \dots, x_{i_k}] \in \mathbf{Y}} \left(\text{Max}_{[x_{j_1}, \dots, x_{j_m}] \in \mathbf{Z}} (\mu_{\mathbf{R}}(x_{i_1}, \dots, x_{i_k}, x_{j_1}, \dots, x_{j_m})) / (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) \right) \quad (59)$$

$$\mathbf{P}_{\mathbf{R},\mathbf{Y}} = \sum_{\forall [x_{i_1}, \dots, x_{i_k}] \in \mathbf{Y}} \left(\text{Max}_{[x_{j_1}, \dots, x_{j_m}] \in \mathbf{Z}} (\mu_{\mathbf{R}}(x_1, \dots, x_n)) / (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) \right) \quad (60)$$

A idéia básica da projeção consiste em reduzir a dimensionalidade de uma relação \mathbf{R} para a de \mathbf{Y} , sendo, portanto o espaço de \mathbf{Y} menor que o espaço de \mathbf{R} . Deve-se, assim, eliminar o espaço complementar de \mathbf{Y} em relação a \mathbf{X} , ou seja \mathbf{Z} . Isto é realizado a partir da combinação (*Max*) dos elementos de \mathbf{R} que possuem as mesmas coordenadas em todas as dimensões, exceto as de \mathbf{Z} .

A projeção é uma operação exata que quando aplicada sobre os universos que formaram a relação, restaura os conjuntos originais desta. A operação *Máx*, pode ser substituída por qualquer *S-norma*, porém algumas características podem não serem mantidas se a *T-norma* e a *S-norma* aplicadas não forem conjugadas, ou seja, não estiverem correlacionadas pela equação (61).

$$T(x_1, x_2) = 1 - S((1 - x_1), (1 - x_2)) \quad (61)$$

Para a relação binária apresentada na tabela 18, as projeções sobre **Y** e **X**, equações (62) e (64), restauram os conjuntos **A** e **B**, equações (63) e (65), que originaram a relação.

$$P_{R,Y} = \sum_{[y_1, \dots, y_j] \in Y} \left(\text{Max}_{[x_1, \dots, x_i] \in X} (\mu_R(x_i, y_j)) / y_i \right) \quad (62)$$

$$P_{R,X} = \text{Max}(0/(x_1, y_1), 0/(x_2, y_1), 0/(x_3, y_1), 0/(x_4, y_1), 0/(x_5, y_1)) / y_1 + \text{Max}(0/(x_1, y_2), 0,25/(x_2, y_2), 0,75/(x_3, y_2), 0,25/(x_4, y_2), 0/(x_5, y_2)) / y_2 + \text{Max}(0/(x_1, y_3), 0,25/(x_2, y_3), 1/(x_3, y_3), 0,25/(x_4, y_3), 0/(x_5, y_3)) / y_3 + \text{Max}(0/(x_1, y_4), 0,25/(x_2, y_4), 0,75/(x_3, y_4), 0,25/(x_4, y_4), 0/(x_5, y_4)) / y_4 + \text{Max}(0/(x_1, y_5), 0/(x_2, y_5), 0/(x_3, y_5), 0/(x_4, y_5), 0/(x_5, y_5)) / y_5$$

$$P_{R,X} = 0/y_1 + 0,75/x_2 + 1/x_3 + 0,75/x_4 + 0/x_5 \quad (63)$$

$$P_{R,X} = \sum_{x \in X} \left(\text{Max}_{y \in Y} (\mu_R(x_1, y_1), \mu_R(x_1, y_2), \dots, \mu_R(x_1, y_i)) / x_1 \right) \quad (64)$$

$$P_{R,X} = \text{Max}(0/(x_1, y_1), 0/(x_1, y_2), 0/(x_1, y_3), 0/(x_1, y_4), 0/(x_1, y_5)) / x_1 + \text{Max}(0/(x_2, y_1), 0,25/(x_2, y_2), 0,25/(x_2, y_3), 0,25/(x_2, y_4), 0/(x_2, y_5)) / x_2 + \text{Max}(0/(x_3, y_1), 0,75/(x_3, y_2), 1/(x_3, y_3), 0,75/(x_3, y_4), 0/(x_3, y_5)) / x_3 + \text{Max}(0/(x_4, y_1), 0,25/(x_4, y_2), 0,25/(x_4, y_3), 0,25/(x_4, y_4), 0/(x_4, y_5)) / x_4 + \text{Max}(0/(x_5, y_1), 0/(x_5, y_2), 0/(x_5, y_3), 0/(x_5, y_4), 0/(x_5, y_5)) / x_5$$

$$P_{R,X} = 0/x_1 + 0,25/x_2 + 1/x_3 + 0,25/x_4 + 0/x_5 \quad (65)$$

A figura 134 mostra as projeções da relação **R**, tabela 18, sobre **X** e **Y**.

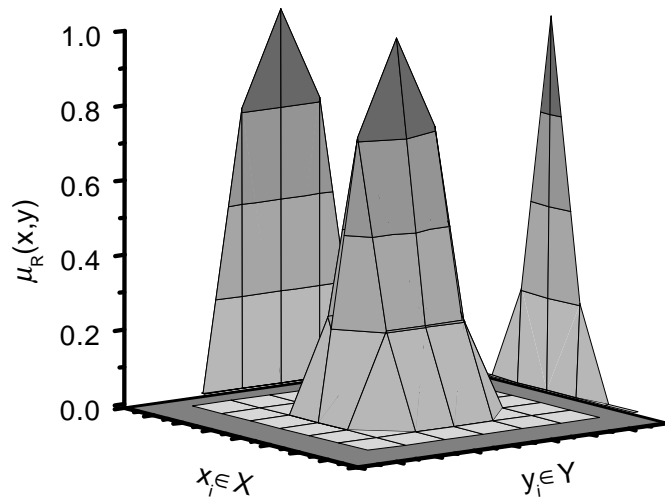


Figura 134 - Representação gráfica da projeção de uma relação difusa **R** sobre **X** e **Y**.

Para um caso mais complexo, a utilização da *S-norma* "Máx" para determinar a projeção da relação ternária, $R \subseteq X | X = X_1 \times X_2 \times X_3$, projetada sobre $Y = X_1 \times X_2$ dados, $X_1 = \{x_{11}, x_{12}\}$, $X_2 = \{x_{21}, x_{22}, x_{23}\}$ e $X_3 = \{x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}\}$, com:

$$\mu_{x_1} = 0,5/x_{11}, 1/x_{22} \text{ (i elementos),}$$

$$\mu_{x_2} = 0,3/x_{21}, 0,7/x_{22}, 0,7/x_{23} \text{ (j elementos) e,}$$

$$\mu_{x_3} = 0,3/x_{31}, 0,7/x_{32}, 0,7/x_{33}, 0,7/x_{34} \text{ (k elementos).}$$

As equações (66) e (67) são as formas detalhada e expandida da equação (59).

$$P_{R,Y} = \sum_{\substack{[x_{1i}, x_{2j}] \in Y \\ = X_1 \times X_2 = \\ \left[\begin{matrix} [x_{11}, x_{21}] \\ [x_{11}, x_{22}] \\ [x_{11}, x_{23}] \\ [x_{12}, x_{21}] \\ [x_{12}, x_{22}] \\ [x_{12}, x_{23}] \end{matrix} \right] \in Y}} \left(\begin{matrix} \text{Max}_{[x_{31} \dots x_{3k}] \in X_3} (\mu_R(x_{1i}, x_{2j}, x_{3k})) / (x_{1i}, x_{2j}) \\ = \\ \left[\begin{matrix} [x_{31}] \\ [x_{32}] \\ [x_{33}] \\ [x_{34}] \end{matrix} \right] \in X_3 \end{matrix} \right) \quad (66)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_{R,Y} = \{ & \text{Max}(\mu_R(0,5, 0,3, 0,1))/(x_{11}, x_{21}, x_{31}), \mu_R(0,5, 0,3, 0,4)/(x_{11}, x_{21}, x_{32}), \\
 & \mu_R(0,5, 0,3, 0,6)/(x_{11}, x_{21}, x_{33}), \mu_R(0,5, 0,3, 0)/(x_{11}, x_{21}, x_{34})/(x_{11}, x_{21}) + \\
 & \text{Max}(\mu_R(0,5, 0,7, 0,1))/(x_{11}, x_{22}, x_{31}), \mu_R(0,5, 0,7, 0,4)/(x_{11}, x_{22}, x_{32}), \\
 & \mu_R(0,5, 0,7, 0,6)/(x_{11}, x_{22}, x_{33}), \mu_R(0,5, 0,7, 0)/(x_{11}, x_{22}, x_{34})/(x_{11}, x_{22}) + \\
 & \text{Max}(\mu_R(0,5, 0,2, 0,1))/(x_{11}, x_{23}, x_{31}), \mu_R(0,5, 0,2, 0,4)/(x_{11}, x_{23}, x_{32}), \\
 & \mu_R(0,5, 0,2, 0,6)/(x_{11}, x_{23}, x_{33}), \mu_R(0,5, 0,2, 0)/(x_{11}, x_{23}, x_{34})/(x_{11}, x_{23}) + \\
 & \text{Max}(\mu_R(1, 0,3, 0,1))/(x_{21}, x_{21}, x_{31}), \mu_R(1, 0,3, 0,4)/(x_{21}, x_{21}, x_{32}), \\
 & \mu_R(1, 0,3, 0,6)/(x_{21}, x_{21}, x_{33}), \mu_R(1, 0,3, 0)/(x_{21}, x_{21}, x_{34})/(x_{21}, x_{21}) + \\
 & \text{Max}(\mu_R(1, 0,7, 0,1))/(x_{21}, x_{22}, x_{31}), \mu_R(1, 0,7, 0,4)/(x_{21}, x_{22}, x_{32}), \\
 & \mu_R(1, 0,7, 0,6)/(x_{21}, x_{22}, x_{33}), \mu_R(1, 0,7, 0)/(x_{21}, x_{22}, x_{34})/(x_{21}, x_{22}) + \\
 & \text{Max}(\mu_R(1, 0,2, 0,1))/(x_{21}, x_{23}, x_{31}), \mu_R(1, 0,2, 0,4)/(x_{21}, x_{23}, x_{32}), \\
 & \mu_R(1, 0,2, 0,6)/(x_{21}, x_{23}, x_{33}), \mu_R(1, 0,2, 0)/(x_{21}, x_{23}, x_{34})/(x_{21}, x_{23}) \}
 \end{aligned} \tag{67}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_{R,Y} = & 0,3/(x_{11}, x_{21}) + 0,5/(x_{11}, x_{22}) + 0,2/(x_{11}, x_{23}) + 0,3/(x_{12}, x_{21}) + \\
 & 0,6/(x_{12}, x_{22}) + 0,2/(x_{12}, x_{23})
 \end{aligned} \tag{68}$$

O produto cartesiano dos conjuntos discretos \mathbf{X}_1 e \mathbf{X}_2 com i e j elementos, respectivamente possui $i \cdot j$ elementos, portanto a operação *Max* será aplicada $i \cdot j$ vezes sobre todos os $i \cdot j \cdot k$ elementos, (x_{1i}, x_{2j}, x_{3k}) , que compõem o espaço de \mathbf{R} . O resultado desta operação será um conjunto com as dimensões de Y , (x_{1i}, x_{2j}) contendo $i \cdot j$ elementos. Para o caso ternário, a representação gráfica da relação \mathbf{R} não é possível desde que requer quatro eixos, μ_R, x_{1i}, x_{2j} e x_{3k} porém, a representação da projeção é tridimensional μ_R, x_{1i} e x_{2j} . A equação (67) pode estar apresentada na forma da tabela 19 ou omitindo-se as referências de μ_R na equação (67) como na equação (69)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_{R,Y} = \{ & \text{Max}(\mu_R(0,5, 0,3, 0,1), \mu_R(0,5, 0,3, 0,4), \mu_R(0,5, 0,3, 0,6), \\
 & \mu_R(0,5, 0,3, 0,0))/(x_{11}, x_{21}) + \text{Max}(\mu_R(0,5, 0,7, 0,1), \mu_R(0,5, 0,7, 0,4), \\
 & \mu_R(0,5, 0,7, 0,6), \mu_R(0,5, 0,7, 0,0))/(x_{11}, x_{22}) + \text{Max}(\mu_R(0,5, 0,2, 0,1), \\
 & \mu_R(0,5, 0,2, 0,4), \mu_R(0,5, 0,2, 0,6), \mu_R(0,5, 0,2, 0,0))/(x_{11}, x_{23}) + \\
 & \text{Max}(\mu_R(1, 0,3, 0,1), \mu_R(1, 0,3, 0,4), \mu_R(1, 0,3, 0,6), \\
 & \mu_R(1, 0,3, 0,0))/(x_{21}, x_{21}) + \text{Max}(\mu_R(1, 0,7, 0,1), \mu_R(1, 0,7, 0,4), \\
 & \mu_R(1, 0,7, 0,6), \mu_R(1, 0,7, 0,0))/(x_{21}, x_{22}) + \text{Max}(\mu_R(1, 0,2, 0,1), \\
 & \mu_R(1, 0,2, 0,4), \mu_R(1, 0,2, 0,6), \mu_R(1, 0,2, 0,0))/(x_{21}, x_{23}) \}
 \end{aligned} \tag{69}$$

A omissão das referências de μ_R não altera o significado da equação (67), desde que \mathbf{R} é o resultado de um produto cartesiano, ou seja, cada elemento deste é composto por um elemento de cada um dos conjuntos o compõem. Assim, cada elemento de \mathbf{R} é único e, portanto, a referência pode ser omitida.

Tabela 19 - Representação tabular da projeção de uma relação ternária sobre um conjunto bidimensional.

x_{1i} ($i=1...2$)	x_{2j} ($j=1...3$)	x_{3k} ($k=1...4$)	$\mu_R(x_{1i}, x_{2j}, x_{3k}) / (x_{1i}, x_{2j}, x_{3k})$ <i>T- morna = Min</i>	$P_{R,Y}$
0,5	0,3	0,1	0,1	Max(0,1, 0,3, 0,3, 0) $/ (x_{11}, x_{21})$ = 0,3
0,5	0,3	0,4	0,3	
0,5	0,3	0,6	0,3	
0,5	0,3	0,0	0,0	
0,5	0,7	0,1	0,1	Max(0,1, 0,4, 0,5, 0) $/ (x_{11}, x_{22})$ = 0,5
0,5	0,7	0,4	0,4	
0,5	0,7	0,6	0,5	
0,5	0,7	0,0	0,0	
0,5	0,2	0,1	0,1	Max(0,1, 0,2, 0,2, 0) $/ (x_{11}, x_{23})$ = 0,2
0,5	0,2	0,4	0,2	
0,5	0,2	0,6	0,2	
0,5	0,2	0,0	0,0	
1	0,3	0,1	0,1	Max(0,1, 0,3, 0,3, 0) $/ (x_{12}, x_{21})$ = 0,3
1	0,3	0,4	0,3	
1	0,3	0,6	0,3	
1	0,3	0,0	0,0	
1	0,7	0,1	0,1	Max(0,1, 0,4, 0,6, 0) $/ (x_{12}, x_{22})$ = 0,6
1	0,7	0,4	0,4	
1	0,7	0,6	0,6	
1	0,7	0,0	0,0	
1	0,2	0,1	0,1	Max(0,1, 0,2, 0,2, 0) $/ (x_{12}, x_{23})$ = 0,2
1	0,2	0,4	0,2	
1	0,2	0,6	0,2	
1	0,2	0,0	0,0	

$$P_{R,Y} = 0,3 / (x_{11}, x_{21}) + 0,5 / (x_{11}, x_{22}) + 0,2 / (x_{11}, x_{23}) + 0,3 / (x_{12}, x_{21}) + 0,6 / (x_{12}, x_{22}) + 0,2 / (x_{12}, x_{23})$$

A-4.2. Extensão Cilíndrica

A extensão cilíndrica de uma relação ou conjunto Y sobre um conjunto X , $E_{Y,X}$, é uma operação de aumento de dimensionalidade, que estende Y sobre o espaço de X . Desta forma, operações que exigem igualdade de dimensões, como a interseção, tornam-se possíveis. Sejam os conjuntos, $Y = X_{i1} \times X_{i2} \times \dots \times X_{ik}$, e $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, onde $Y \subset X$, a equação (70) representa $E_{Y,X}$.

$$E_{Y,X} = \sum_X \mu_Y(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (70)$$

Uma forma mais clara de escrever a equação (70) é a (71), que expressa: para todos os elementos $([x_1, x_2, \dots, x_n]$ é um elemento) de X , o grau de pertinência é dado pela extensão do grau existente em Y nas dimensões de X .

$$E_{Y,X} = \sum_{\forall [x_1, x_2, \dots, x_n] \in X} \mu_Y(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (71)$$

Para o caso binário com $Y = X_2$, e $X = X_1 \times X_2$:

$$E_{Y,X} = \sum_{\forall [x_1, x_2] \in X_1 \times X_2} \mu_{X_2}(x_2) / (x_1, x_2) \quad (72)$$

Considerando os conjuntos $A \in X$ e $B \in Y$ apresentados nas equações (57) e (58). A extensão cilíndrica de B sobre $X \times Y$ pode ser escrita conforme as equações (73), (74) e (75):

$$E_{B, X \times Y} = \sum_{\forall [x, y] \in X \times Y} \mu_B(y)/(x, y) \text{ ou } E_{B, X \times Y} = \sum \mu_B(y)/(x, y) \quad (73)$$

[x₁, y₁]
[x₁, y₂]
[x₁, y₃]
[x₁, y₄]
[x₁, y₅]
[x₂, y₁]
[x₂, y₂]
[x₂, y₃]
[x₂, y₄]
[x₂, y₅]
⋮
[x₅, y₁]
[x₅, y₂]
[x₅, y₃]
[x₅, y₄]
[x₅, y₅]

} = X × Y

$$E_{B, X \times Y} = \{ \mu_B(y_1)/(x_1, y_1) + \mu_B(y_2)/(x_1, y_2) + \mu_B(y_3)/(x_1, y_3) + \mu_B(y_4)/(x_1, y_4) + \mu_B(y_5)/(x_1, y_5) + \mu_B(y_1)/(x_2, y_1) + \mu_B(y_2)/(x_2, y_2) + \mu_B(y_3)/(x_2, y_3) + \mu_B(y_4)/(x_2, y_4) + \mu_B(y_5)/(x_2, y_5) + \mu_B(y_1)/(x_3, y_1) + \mu_B(y_2)/(x_3, y_2) + \mu_B(y_3)/(x_3, y_3) + \mu_B(y_4)/(x_3, y_4) + \mu_B(y_5)/(x_3, y_5) + \mu_B(y_1)/(x_4, y_1) + \mu_B(y_2)/(x_4, y_2) + \mu_B(y_3)/(x_4, y_3) + \mu_B(y_4)/(x_4, y_4) + \mu_B(y_5)/(x_4, y_5) + \mu_B(y_1)/(x_5, y_1) + \mu_B(y_2)/(x_5, y_2) + \mu_B(y_3)/(x_5, y_3) + \mu_B(y_4)/(x_5, y_4) + \mu_B(y_5)/(x_5, y_5) \} \quad (74)$$

$$E_{B, X \times Y} = \{ 0/(x_1, y_1) + 0,75/(x_1, y_2) + 1/(x_1, y_3) + 0,75/(x_1, y_4) + 0/(x_1, y_5) + 0/(x_2, y_1) + 0,75/(x_2, y_2) + 1/(x_2, y_3) + 0,75/(x_2, y_4) + 0/(x_2, y_5) + 0/(x_3, y_1) + 0,75/(x_3, y_2) + 1/(x_3, y_3) + 0,75/(x_3, y_4) + 0/(x_3, y_5) + 0/(x_4, y_1) + 0,75/(x_4, y_2) + 1/(x_4, y_3) + 0,75/(x_4, y_4) + 0/(x_4, y_5) + 0/(x_5, y_1) + 0,75/(x_5, y_2) + 1/(x_5, y_3) + 0,75/(x_5, y_4) + 0/(x_5, y_5) \} \quad (75)$$

Para um espaço de extensão binário é possível apresentar a equação (75) nas formas da tabela 20 e da figura 135. A extensão cilíndrica de **A** sobre **X**×**Y** está apresentada nas equações (76) e (77), tabelas 5 e 136.

$$E_{A, X \times Y} = \sum_{\forall [x, y] \in X \times Y} \mu_A(x)/(x, y) \quad (76)$$

$$E_{A, X \times Y} = \{ \mu_A(x_1)/(x_1, y_1) + \mu_A(x_2)/(x_1, y_2) + \mu_A(x_3)/(x_1, y_3) + \mu_A(x_4)/(x_1, y_4) + \mu_A(x_5)/(x_1, y_5) + \mu_A(x_1)/(x_2, y_1) + \mu_A(x_2)/(x_2, y_2) + \mu_A(x_3)/(x_2, y_3) + \mu_A(x_4)/(x_2, y_4) + \mu_A(x_5)/(x_2, y_5) + \mu_A(x_1)/(x_3, y_1) + \mu_A(x_2)/(x_3, y_2) + \mu_A(x_3)/(x_3, y_3) + \mu_A(x_4)/(x_3, y_4) + \mu_A(x_5)/(x_3, y_5) + \mu_A(x_1)/(x_4, y_1) + \mu_A(x_2)/(x_4, y_2) + \mu_A(x_3)/(x_4, y_3) + \mu_A(x_4)/(x_4, y_4) + \mu_A(x_5)/(x_4, y_5) + \mu_A(x_1)/(x_5, y_1) + \mu_A(x_2)/(x_5, y_2) + \mu_A(x_3)/(x_5, y_3) + \mu_A(x_4)/(x_5, y_4) + \mu_A(x_5)/(x_5, y_5) \} \quad (77)$$

Tabela 20 - Representação tabular para a extensão cilíndrica de $B \in X$ sobre $X \times Y$.

		X_1	X_2	x_3	x_4	x_5
		0	0,25	1	0,25	0
y_1	0	0	0	0	0	0
y_2	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
y_3	1	1	1	1	1	1
y_4	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
y_5	0	0	0	0	0	0

Tabela 21 - Representação tabular para a extensão cilíndrica de $A \in X$ sobre $X \times Y$.

		X_1	X_2	x_3	x_4	x_5
		0	0,25	1	0,25	0
y_1	0	0	0,25	1	0,25	0
y_2	0,75	0	0,25	1	0,25	0
y_3	1	0	0,25	1	0,25	0
y_4	0,75	0	0,25	1	0,25	0
y_5	0	0	0,25	1	0,25	0

Novamente, as representações tabular e gráfica, somente são possíveis para extensões binárias.

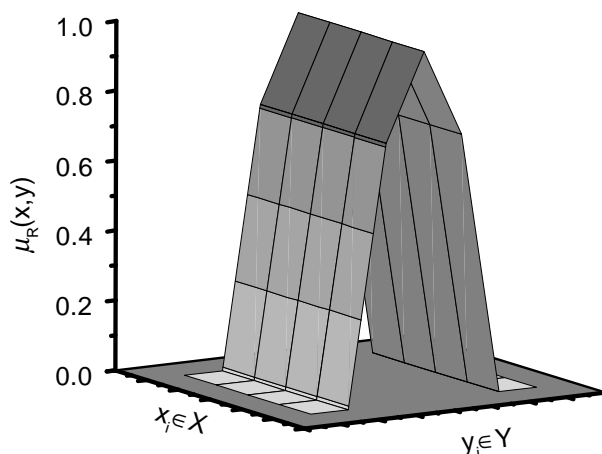


Figura 135 - Representação gráfica da extensão cilíndrica de $B \in Y$ sobre $X \times Y$.

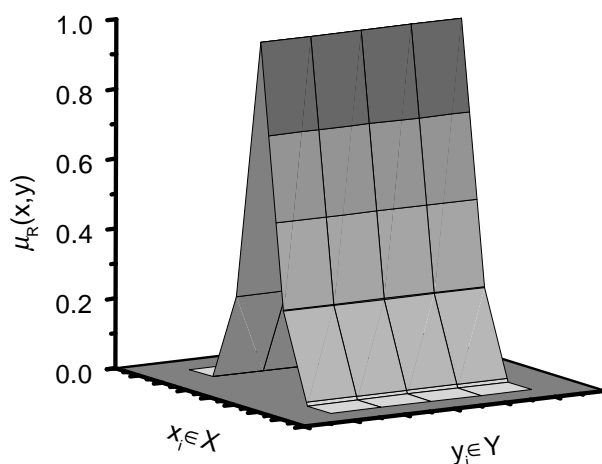


Figura 136 - Representação gráfica da extensão cilíndrica de $A \in X$ sobre $X \times Y$.

A projeção pode atuar como a operação inversa da extensão cilíndrica, ou seja, $Y = P_{(E_{Y,X}),Y}$. Juntas, elas constituem a base para formação de regras em sistemas difusos. De fato, a interseção das figuras 135 e 136 corresponde à relação mostrada na figura 133.

A-4.3. Composição

A composição é a espécie de relação difusa que permite a combinação de relações ou conjuntos difusos para a inferência de novos conjuntos.

Para um conjunto $A \subset X$ e uma relação difusa $R \subset X \times Y$, a composição, \circ , é definida pela equação (78).

$$B \in Y = A \circ R = P(E_{(A, X \times Y)} \cap R), Y \tag{78}$$

Para evitar a confusão do uso dos subscritos na equação (78), pode-se escrever a forma funcional desta, conforme (78.1):

$$B \in Y = A \circ R = P(E(A, X \times Y) \cap R, Y) \tag{78.1}$$

Ou seja, a composição de $A \subset X$ e $R \subset X \times Y$, resultando em $B \subset Y$, é descrita pela projeção da interseção entre A e R sobre o universo Y . Como A está na dimensão X e R está em $X \times Y$, é necessário estender A para $X \times Y$, para que possa ser aplicada a interseção. Se a interseção for representada pela *T-norma* "Min" e a projeção pela *S-norma* "Máx" a equação (78) pode ser rescrita nas formas das equações (79) ou (80).

$$\mu_B(y) = \sum_{\forall y \in Y} \left[\text{Max}_{\forall x \in X} \left(\text{Min}_{[x,y] \in X \times Y} (\mu_A(x)/(x,y), \mu_R(x,y)/(x,y)) \right) \right] / y \tag{79}$$

$$\mu_B(y) = \sum_{\substack{\forall y \in Y \\ [y_1] \\ [y_2] \\ [y_3] \\ [y]}} \left[\text{Max}_{\substack{\forall x \in X \\ [x_1] \\ [x_2] \\ [x_3] \\ [x]}} \left(\text{Min}_{[x,y] \in X \times Y} (\mu_A(x)/(x,y), \mu_R(x,y)/(x,y)) \right) \right] / y \tag{80}$$

Considerando, como exemplo, a relação estabelecida na tabela 18. A composição entre $A \subset X$ e $R \subseteq X \times Y$, é dada pela extensão de A sobre $X \times Y$, onde a

interseção entre **A** e **R** permite inferir **B**, através da projeção da interseção sobre **Y**. As equações (81) a (84) apresentam a solução este exemplo, a partir da aplicação de (80).

$$\begin{aligned}
\mu_B(y) = & \text{Max}_{y_1} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1, y_1]}(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, y_1)), \text{Min}_{[x_2, y_1]}(\mu_A(x_2), \mu_R(x_2, y_1)), \\ \text{Min}_{[x_3, y_1]}(\mu_A(x_3), \mu_R(x_3, y_1)), \text{Min}_{[x_4, y_1]}(\mu_A(x_4), \mu_R(x_4, y_1)), \\ \text{Min}_{[x_5, y_1]}(\mu_A(x_5), \mu_R(x_5, y_1)) \end{array} \right) / (y_1) + \\
& + \text{Max}_{y_2} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1, y_2]}(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, y_2)), \text{Min}_{[x_2, y_2]}(\mu_A(x_2), \mu_R(x_2, y_2)), \\ \text{Min}_{[x_3, y_2]}(\mu_A(x_3), \mu_R(x_3, y_2)), \text{Min}_{[x_4, y_2]}(\mu_A(x_4), \mu_R(x_4, y_2)), \\ \text{Min}_{[x_5, y_2]}(\mu_A(x_5), \mu_R(x_5, y_2)) \end{array} \right) / (y_2) + \\
& + \text{Max}_{y_3} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1, y_3]}(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, y_3)), \text{Min}_{[x_2, y_3]}(\mu_A(x_2), \mu_R(x_2, y_3)), \\ \text{Min}_{[x_3, y_3]}(\mu_A(x_3), \mu_R(x_3, y_3)), \text{Min}_{[x_4, y_3]}(\mu_A(x_4), \mu_R(x_4, y_3)), \\ \text{Min}_{[x_5, y_3]}(\mu_A(x_5), \mu_R(x_5, y_3)) \end{array} \right) / (y_3) + \quad (81) \\
& + \text{Max}_{y_4} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1, y_4]}(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, y_4)), \text{Min}_{[x_2, y_4]}(\mu_A(x_2), \mu_R(x_2, y_4)), \\ \text{Min}_{[x_3, y_4]}(\mu_A(x_3), \mu_R(x_3, y_4)), \text{Min}_{[x_4, y_4]}(\mu_A(x_4), \mu_R(x_4, y_4)), \\ \text{Min}_{[x_5, y_4]}(\mu_A(x_5), \mu_R(x_5, y_4)) \end{array} \right) / (y_4) + \\
& + \text{Max}_{y_5} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1, y_5]}(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, y_5)), \text{Min}_{[x_2, y_5]}(\mu_A(x_2), \mu_R(x_2, y_5)), \\ \text{Min}_{[x_3, y_5]}(\mu_A(x_3), \mu_R(x_3, y_5)), \text{Min}_{[x_4, y_5]}(\mu_A(x_4), \mu_R(x_4, y_5)), \\ \text{Min}_{[x_5, y_5]}(\mu_A(x_5), \mu_R(x_5, y_5)) \end{array} \right) / (y_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y) = & \text{Max}_{y_1} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1,y_1]}(0,0), \text{Min}_{[x_2,y_1]}(0,25,0), \text{Min}_{[x_3,y_1]}(1,0), \\ \text{Min}_{[x_4,y_1]}(0,25,0), \text{Min}_{[x_5,y_1]}(0,0) \end{array} \right) / (y_1) + \\ & + \text{Max}_{y_2} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1,y_2]}(0,0), \text{Min}_{[x_2,y_2]}(0,25,0,25), \text{Min}_{[x_3,y_2]}(1,0,75), \\ \text{Min}_{[x_4,y_2]}(0,25,0,25), \text{Min}_{[x_5,y_2]}(0,0) \end{array} \right) / (y_2) + \\ & + \text{Max}_{y_3} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1,y_3]}(0,0), \text{Min}_{[x_2,y_3]}(0,25,0,25), \text{Min}_{[x_3,y_3]}(1,1), \\ \text{Min}_{[x_4,y_3]}(0,25,0,25), \text{Min}_{[x_5,y_3]}(0,0) \end{array} \right) / (y_3) + \\ & + \text{Max}_{y_4} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1,y_4]}(0,0), \text{Min}_{[x_2,y_4]}(0,25,0,25), \text{Min}_{[x_3,y_4]}(1,0,75), \\ \text{Min}_{[x_4,y_4]}(0,25,0,25), \text{Min}_{[x_5,y_4]}(0,0) \end{array} \right) / (y_4) + \\ & + \text{Max}_{y_5} \left(\begin{array}{l} \text{Min}_{[x_1,y_5]}(0,0), \text{Min}_{[x_2,y_5]}(0,25,0), \text{Min}_{[x_3,y_5]}(1,0), \\ \text{Min}_{[x_4,y_5]}(0,25,0), \text{Min}_{[x_5,y_5]}(0,0) \end{array} \right) / (y_5) \end{aligned} \quad (82)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y) = & \text{Max}_{y_1}(0,0,0,0,0) / (y_1) + \text{Max}_{y_2}(0,0,25,0,75,0,25,0) / (y_2) + \\ & \text{Max}_{y_3}(0,0,25,1,0,25,0) / (y_3) + \text{Max}_{y_4}(0,0,25,0,75,0,25,0) / (y_4) + \\ & \text{Max}_{y_5}(0,0,0,0,0,0,0) / (y_5) \end{aligned} \quad (83)$$

$$\mu_B(y) = 0 / (y_1) + 0,75 / (y_2) + 1 / (y_3) + 0,75 / (y_4) + 0 / (y_5) \quad (84)$$

A equação (79) é conhecida como *composição padrão* ou *composição máxima*.

O *princípio da extensão*, Zadeh (1975), permite a aplicação de operações matemáticas definidas para números reais sobre o domínio dos conjuntos ou números difusos. Considerando os conjuntos $A_1 \subset X_1$, $A_2 \subset X_2, \dots, A_n \subset X_n$ e uma função matemática f que opera sobre X_1, X_2, \dots, X_n , obtém-se o conjunto difuso $B \subset Y = f(X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n)$ a partir da composição *max-min*. Assim a função de pertinência de B pode ser descrita, no caso dos domínios discreto e contínuo, pelas equações (86) e (87).

$$\mu_B(y) = \sum_{\forall y, [x_1, x_2, \dots, x_n] \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n | y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \text{Max}(\text{Min}(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n))) / f(x_1, \dots, x_n) \quad (85)$$

$$\mu_B(y) = \sum_{\forall y, [x_1, x_2, \dots, x_n] \in X_1, X_2, \dots, X_n | y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \text{Max}(\text{Min}(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n))) / (y) \tag{86}$$

$$\mu_B(y) = \int \text{Max}(\text{Min}(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n))) / (y) \tag{87}$$

Um exemplo típico é a adição de números difusos. Por exemplo a aplicação da equação (86) sobre a operação “2”+“3”, com as seguintes considerações: “2” \subset X₁; “3” \subset X₂; **B** \subset **Y**=f(**X**₁ \times **X**₂); f= “+”; $\mu_{"2"}(x_1) = 0/1+1/2+0/3$; $\mu_{"3"}(x_2) = 0/1+0,5/2+1/3+0,5/4+0/5$, é dada pela equação (88) e resulta na figura 137.

$$\mu_B(y) = \sum_{\forall y, "2"=[0/1+1/2+0/3]; "3"=[0/1+0,5/2+1/3+0,5/4+0/5]} \text{Max}(\text{Min}(\mu_{"2"}(x_1), \mu_{"3"}(x_2))) / (x_1 + x_2)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y) = & [\text{Max}(\text{Min}(0, 0)) / (1+1)] + [\text{Max}(\text{Min}(0, 0,5), \text{Min}(1, 0)) / (1+2 \text{ ou } 2+1)] + \\ & \text{Max}(\text{Min}(0, 1), \text{Min}(1, 0,5), \text{Min}(0, 0)) / (1+3 \text{ ou } 2+2)] + \\ & [\text{Max}(\text{Min}(1, 0,5), \text{Min}(1, 1), \text{Min}(0, 0,5)) / (2+3 \text{ ou } 4+1)] + \\ & [\text{Max}(\text{Min}(0, 0), \text{Min}(1, 0,5), \text{Min}(0, 1)) / (3+3 \text{ ou } 4+2 \text{ ou } 5+1)] + \\ & [\text{Max}(\text{Min}(1, 0), \text{Min}(0, 0,5)) / (4+1 \text{ ou } 5+2) + \text{Max}(\text{Min}(0, 0)) / (5+3)] \end{aligned} \tag{88}$$

$$\mu_B(y) = 0/2 + 0/3 + 0,5/4 + 1/5 + 0,5/6 + 0/7 + 0/8 \tag{89}$$

A figura 137 representa a operação de adição apresentada neste exemplo.

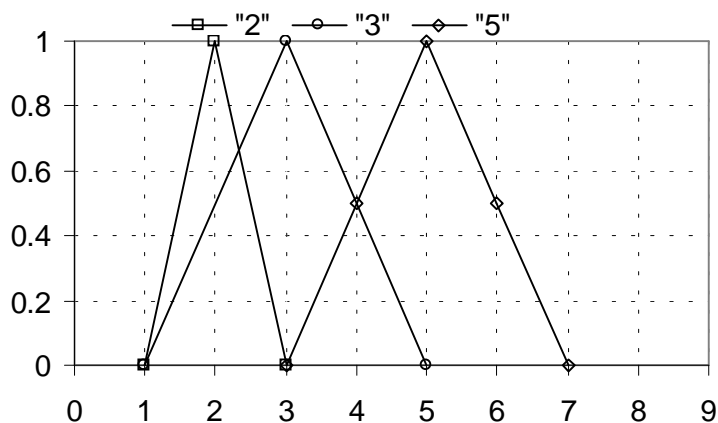


Figura 137 - Adição de dois números difusos

Um cuidado especial deve ser tomado na aplicação do princípio da extensão sobre conjuntos difusos discretos, desde que o grau de discretização pode alterar a solução da extensão. Considerando as seguintes funções de pertinência para os conjuntos do exemplo anterior:

$$\mu_{A_2}(x_1) = 0/1 + 0,5/1,5 + 1/2 + 0,5/2,5 + 0/3; \mu_{A_3}(x_2) = 0/1 + 0,5/2 + 1/3 + 0,5/4 + 0/5$$

$$\mu_B(y) = 0/2 + 0/2,5 + 0/3 + 0,5/3,5 + 0,5/4 + 0,5/4,5 + 1/5 + 0,5/5,5 + 0,5/6 + 0,5/6,5 + 0/7 + 0/7,5 + 0/8 \quad (90)$$

Para conjuntos triangulares, figura 138, as equações (91) e (92) podem ser utilizadas para representar conjuntos triangulares simétricos e não-simétricos, respectivamente na forma funcional. Yager e Filev (1994) apresentam soluções analíticas para operações de adição, subtração, multiplicação e divisão para funções de pertinência simples como triangulares e trapezoidais. A figura 139 apresenta as soluções das equações (89) e (90) comparadas com a solução obtida a partir de conjuntos contínuos, equação (91).

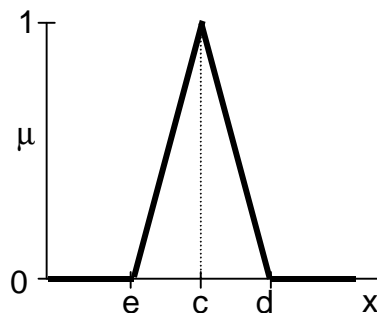


Figura 138 - Representação de um conjunto triangular.

$$\mu_T(x) = \text{Máx}\left(0, 1 - \frac{|x-c|}{c-e}\right) \quad (91)$$

$$\mu_T(x) = \begin{cases} \text{Máx}\left(0, 1 - \frac{|x-c|}{c-e}\right); & x \leq c \\ \text{Máx}\left(0, 1 - \frac{|x-c|}{c-d}\right); & x \geq c \end{cases} \quad (92)$$

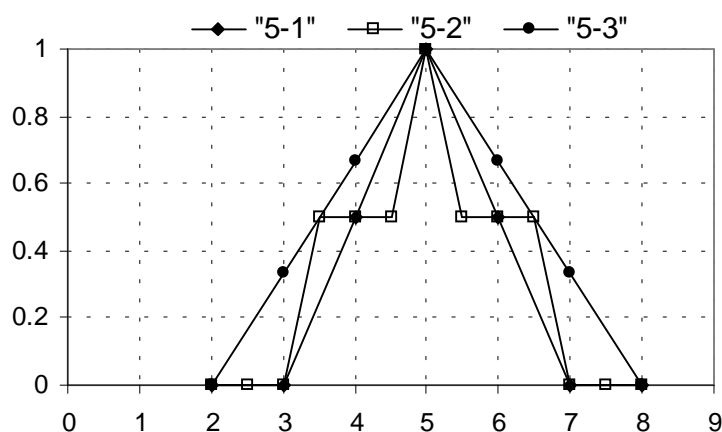


Figura 139 - Adições sobre conjuntos discretos com diferentes intervalos de discretização. "5-1": equação (89); "5-2": equação (90); "5-3": Conjuntos contínuos

A-5. Considerações Finais sobre Conjuntos Difusos

Os conceitos apresentados representam, apenas, uma pequena introdução à teoria dos conjuntos difusos, porém são suficientes para o desenvolvimento das equações básicas para formação de sistemas de controle baseados em lógica difusa. Outros conceitos e abordagens podem ser obtidas em Klir e Yuan (1995), Driankov, Hellendoorn e Reifrank (1996) e Yager e Filev (1994), o primeiro apresenta maior formalismo matemático, enquanto os demais tratam os conceitos com maior variedade exemplos.

A-6. Lógica Difusa

A lógica difusa estende os conceitos de conjuntos difusos para formação de cadeias lógicas, com variados graus de verdade. De forma semelhante ao que ocorre com a lógica clássica existe equivalência entre a teoria dos conjuntos difusos e a lógica difusa, ou seja, para cada teorema de uma existe um equivalente na outra, Klir e Yuan (1995). Por exemplo, as relações entre operações lógicas e operações sobre conjuntos como AND/Interseção, OR/União e NOT/Complemento.

A lógica difusa concentra-se, basicamente, na representação de proposições sobre universos difusos, soluções e mecanismos para resolver agrupamentos destas. Proposições podem ser agrupadas em regras do tipo “*Se Proposição_1 E/OU Proposição_2 ... Então Proposição_n*” que requerem mecanismos de implicação. Regras podem ser agrupadas para formar blocos de conhecimento, os quais requerem mecanismos de agregação. Finalmente, pode ser requerido algum método para transformação de resultados difusos em números reais. Estes mecanismos serão discutidos, brevemente, nesta seção.

A-6.1. Formação de Regras Difusas e Mecanismos de Implicação

Uma regra representa um pequeno bloco de conhecimento, explícito ou não, constituída de uma ou mais proposições devidamente relacionadas por “Conectivas” cujos resultados são obtidos através de “Implicações”. Existem várias formas de representar conectivas e implicações, ou ainda de expressar regras, porém a forma geral de uma regra é dada pela figura 140, onde são apresentadas as seções e denominações destas. As proposições que precedem o implicador *Então* são denominadas *antecedentes* ou *premissas*, as que sucedem este são chamadas *conseqüentes* ou *conclusões*. Zadeh, (1979) apresenta comentários sobre proposições, manipulações destas e representação de conceitos lingüísticos.

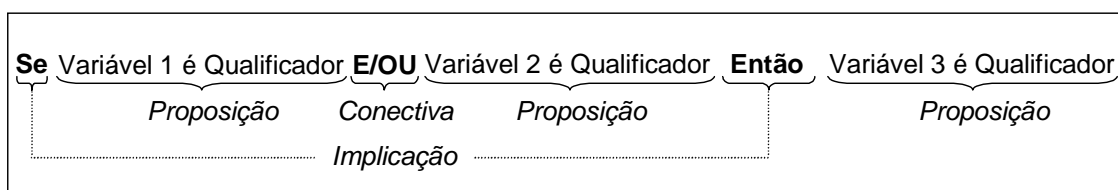


Figura 140 - Uma regra simples.

Para regras difusas, os qualificadores representam conjuntos difusos definidos sobre o universo das variáveis que representam a proposição e, portanto, a solução da proposição é dada pelo grau de pertinência das entradas das variáveis

da regra sobre os qualificadores desta. A figura 141 ilustra duas possíveis entradas para um sistema de ventilação.

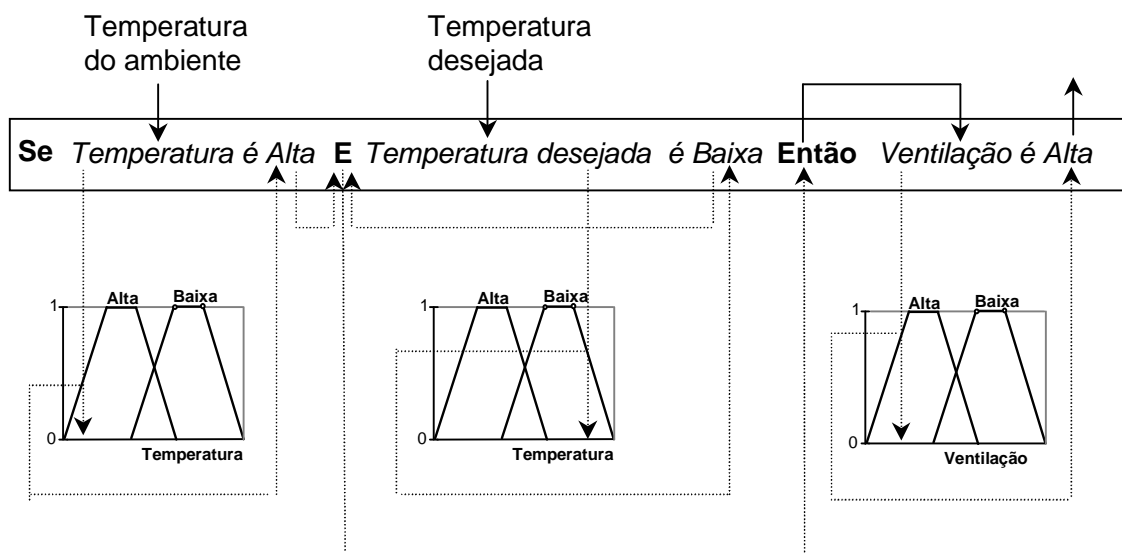


Figura 141 - Uma possível regra para um sistema de ventilação.

A variável difusa “Temperatura”, com os qualificadores (conceitos lingüísticos) “Alta” e “Baixa” recebe duas entradas; as temperaturas do ambiente e desejada. É conveniente ressaltar que as entradas devem ser representadas por valores difusos ou reais (*Crisp*) transformados em difusos.

As proposições, em uma regra, são ligadas por conectivas lógicas (**E** e **OU**, por exemplo). Na lógica clássica, existe apenas uma representação para as conectivas porém em lógica difusa quaisquer *T-norma* podem representar a operação lógica **E** e quaisquer *S-norma* podem representar a operação **OU**. Para sistemas de controle os operadores padrão, equações (24) e (25), definidos por Zadeh (1965) são mais utilizados porém, é interessante assumir formas menos restritivas como as equações (33), (34), (42) e (43) para problemas de modelagem, pois ponderam melhor as informações entre as proposições. Normalmente a seleção das *T-norma* e *S-norma* depende do projetista e sua experiência sobre a natureza do problema. Jager (1995) aponta uma grande vantagem dos operadores padrão, a

imunidade sobre informações redundantes. Por exemplo, se uma regra possui duas proposições idênticas, como:

“**Se A é A’ E A é A’ Então ...**” que é equivalente a “**Se A é A’ Então ...**”; Esta regra pode ser escrita como:

$$\mathbf{E}(\mu_{A'}(x), \mu_{A'}(x)) = T(\mu_{A'}(x), \mu_{A'}(x))$$

Para o operador padrão:

$$\text{Min}(\mu_{A'}(x), \mu_{A'}(x)) = \mu_{A'}(x) \text{ (redundância ignorada)}$$

Para o produto Algébrico:

$$\text{ProdAlg}(\mu_{A'}(x), \mu_{A'}(x)) = \mu_{A'}(x) \cdot \mu_{A'}(x) = \mu_{A'}(x)^2 \text{ (redundância mantida)}$$

Segundo Jager (1995) as conectivas lógicas mais utilizadas são apresentadas na tabela 22.

Tabela 22 - Conectivas mais utilizadas.

Conectiva E	Conectiva OU	Nome
$\text{Min}(x_1, x_2)$	$\text{Max}(x_1, x_2)$	Zadeh
$\text{Max}(x_1+x_2-1, 0)$	$\text{Min}(x_1+x_2, 1)$	Lukasiewicz
x_1x_2	$x_1+x_2-x_1x_2$	Probabilidade

Fonte: Jager (1995), p.46

Proposições ligadas por conectivas requerem algum mecanismo de implicação para que constituam uma regra. A implicação permite que, através do conhecimento existente entre as premissas de uma regra, seja obtida uma conclusão. As Implicações possuem várias representações, Dubois e Prade (1991). Mamdani (1974), em seu trabalho pioneiro sobre sistemas de controle, interpretou a implicação como a intercessão (conjunção) entre as partes antecedente e conseqüente de uma regra. Quando uma implicação é representada por uma conjunção, qualquer *T-norma* pode ser utilizada para representá-la. Em sistemas de controle a *T-norma* padrão, Zadeh (1965), é a mais utilizada. Para uma revisão

completa sobre formas de implicação são indicados, Dubois e Prade (1991), Driankov, Hellendoorn e Reifrank (1996), Jager (1995), e Yager e Filev (1994). Nestas publicações são abordadas desde as implicações clássicas e *Modus Ponens* até as implicações de Kleene-Dienes-Rescher, Lukasiewicz, Zadeh, Goguen, Gödel, Sharp, Mamdani, etc..

Neste trabalho o interesse está concentrado sobre a implicação de Mamdani, ou seja:

$((X \text{ é } A) \text{ é } x) \rightarrow ((Y \text{ é } B) \text{ é } y)$: “**Se** $X=x$ **é** **A** **Então** $Y=y$ **é** **B**”.

$$\text{Implicação}(X, Y) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (93)$$

Enquanto na lógica clássica bi-valorada y se adequaria a **B** com grau 0 ou 1, na lógica difusa y pertence ao conjunto $\mathbf{B} \subset \mathbf{X}$ com graus $[0, 1]$.

A formação de uma base de conhecimentos a partir de regras requer, também, um mecanismo de agregação, para a obtenção de um conjunto, ou conjuntos, que relacione todas as regras. Quando a implicação que representa uma regra é baseada em uma conjunção, a agregação de um conjunto de regras é realizada através de uma disjunção (União), conforme a equação (94).

$$R = \bigcup_j R_j \quad (94)$$

Na equação (94), **R** é o conjunto resultante da união de todos os R_j conjuntos resultantes das implicações das J regras. A equação (95) expressa a agregação na forma de funções de pertinência:

$$\mu_R = \text{MAX}_j(\mu_{R_j}) = \text{MAX}_j \left(\sum_j \left[\text{Min}(\mu_{\hat{A}_j}(x), \mu_{\hat{C}_j}(y)) / (R_j) \right] \right) \quad (95)$$

A equação (95) apresenta a agregação e a implicação de Mamdani para a solução de um conjunto de J regras, onde $\mu_{\hat{A}_j}$ e $\mu_{\hat{C}_j}$ são os graus de pertinência das partes antecedente e conseqüente da regra j . Para este caso a *S-norma* MAX foi

utilizada para representar a União entre conjuntos. De forma semelhante à notação utilizada anteriormente, o símbolo de somatório denota um agrupamento e não a soma algébrica. A forma expandida da equação (95) é apresentada na equação 146, onde os índices $1, 2, \dots, J$ referem-se às regras e não aos conjuntos (Qualificadores) nos Universos \mathbf{X} e \mathbf{Y} .

$$\mu_R = \underset{J}{\text{MAX}}(\mu_{R_j}) = \underset{J}{\text{MAX}} \left(\begin{array}{c} \text{Min}(\mu_{\hat{A}_1}(x), \mu_{\hat{C}_1}(y)) / (R_1) \\ \text{Min}(\mu_{\hat{A}_2}(x), \mu_{\hat{C}_2}(y)) / (R_2) \\ \vdots \\ \text{Min}(\mu_{\hat{A}_J}(x), \mu_{\hat{C}_J}(y)) / (R_J) \end{array} \right) \quad (96)$$

As propriedades mais importantes de uma base de regras são: consistência, continuidade, interação e complementação.

Uma base de regras é dita consistente quando não possui regras contraditórias.

Uma base de regras é dita contínua quando consiste apenas de regras onde premissas vizinhas implicam em conclusões vizinhas ou quando existe interseção entre as conclusões de duas regras com premissas vizinhas.

Regras em uma base são denominadas interativas quando existe sobreposição entre seus resultados.

Quando existem regras suficientes para cobrir todo espaço entre os conjuntos que compõem os universos dos antecedentes que formam as regras, a base de regras é dita completa.

Existem várias formas para representar a inferência de uma base de regras, porém a forma de Mamdani é típica para sistemas de controle e foi adotada neste trabalho.

A-6.2. Domínio dos Números Reais \times Domínio dos Números Difusos.

Os números reais podem ser considerados um caso particular dos números difusos onde cada número corresponde a um número difuso cujo suporte é dado por

um único ponto, ou seja um conjunto difuso unitário (*singleton*), o qual não deve ser confundido com um conjunto clássico unitário (que contém apenas um elemento). Considerando o caso de um dado recebido de um sensor, que contém ruído, figura 142, intuitivamente, sabe-se que o sinal é y , pela observação da magnitude do ruído. Neste caso, a conversão Domínio Real - Domínio Difuso, aqui representada como $\mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{S}$, (*fuzzyfication*) poderia ser representada pelo número difuso Y . Na figura 143 um número real x_1 é convertido em difuso através de três funções de pertinência, unitária (a), triangular (b) e trapezoidal (c).

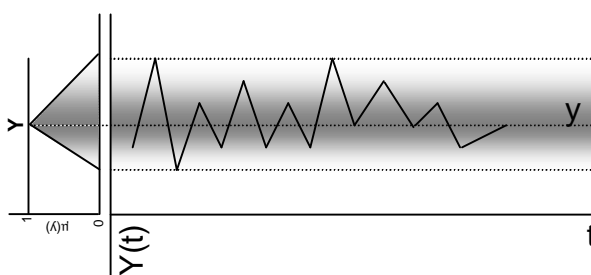


Figura 142 - Um número difuso Y .

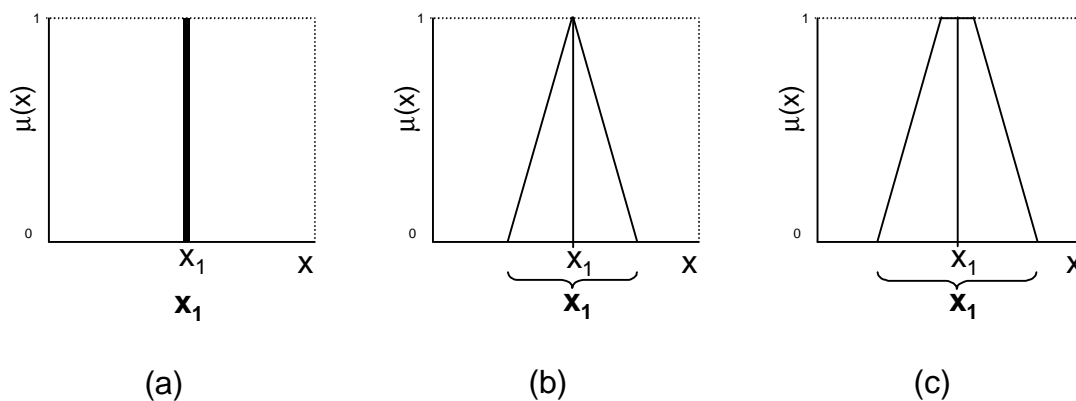


Figura 143 - Três formas de converter um número real x_1 em um número difuso x_1 .
 a) Unitário (singleton), b) Triangular, c) Trapezoidal.

Os resultados de sistemas difusos são conjuntos difusos com funções de pertinência variadas, normalmente, formas irregulares. Quando o valor esperado é numérico, ao invés de lingüístico, estes conjuntos devem ser convertidos em números reais para aplicação final. É necessário, portanto, realizar uma conversão Domínio Difuso – Domínio Real, $\mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{R}$, (*Defuzzyfication*). A operação $\mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{R}$ pode ser

realizada de várias formas. Um dos métodos mais utilizados é o método de centro de gravidade (COG), Harris (1994). O centro de gravidade, equação (97), é dado pela razão entre soma dos produtos dos elementos x_k por seus respectivos graus de pertinência e a soma dos graus de pertinência dos elementos x_k . O método do centro de gravidade é denominado Centro de Área (COA) por alguns autores (Jager (1995)).

$$x = \frac{\sum_{k=0}^m x_k \mu_C(x_k)}{\sum_{k=0}^m \mu_C(x_k)} \tag{97}$$

Neste caso, tomando o conjunto da figura 144 devidamente discretizado o resultado da operação $\mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{X}$ está entre x_4 e x_5 .

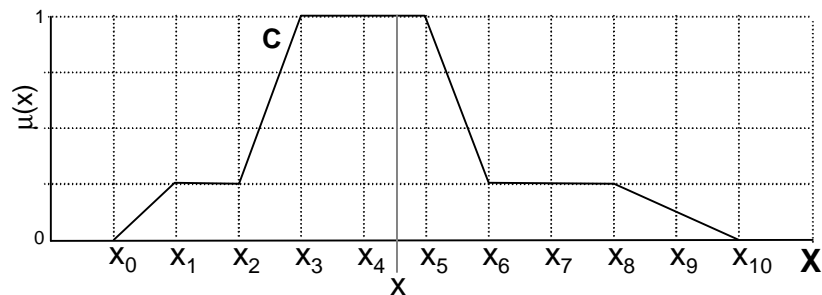


Figura 144 - Um conjunto difuso discreto

Outros métodos $\mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{X}$ estão descritos em Klir e Yuan (1995), Driankov, Hellendoorn e Reifrank (1996) e Yager e Filev (1994) e Harris (1994).

O número de intervalos de discretização deve ser o maior possível para evitar a perda de informações no processo $\mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{X}$. A figura 145 mostra as alterações provocadas quando é reduzido pela metade o número pontos de discretização do conjunto na figura 144.

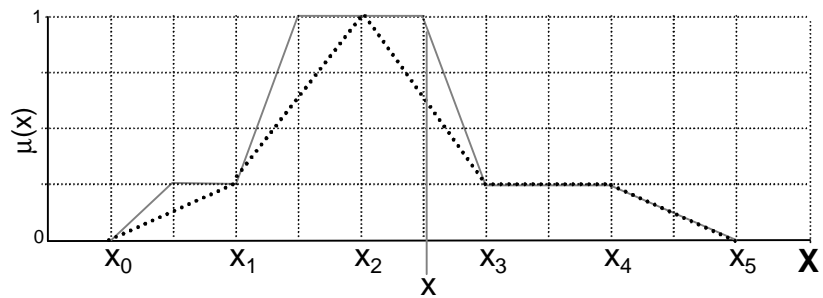


Figura 145 - Redução do grau de discretização da figura 144.

As definições matemáticas apresentadas são suficientes para compreender o comportamento de sistemas difusos e estabelecer controladores como os de Mamdani (Mamdani, 1974).

APÊNDICE B- ESPECIFICAÇÕES DO EQUIPAMENTOS

Reator:

Fabricante: Suprilab Ltda.

Características:

Reator encamisado, agitado

Material: Aço Inox 316L,

Capacidade: 5L,

Pressão máxima: 15 kgf/cm²

Trocador de calor:

Fabricante: Alfa Laval

Características:

Tipo: Placas

Correntes cruzadas

Válvulas pneumáticas:

Fabricante: Hiter.

Características :

Atuador DN0021-AC.

Igual percentagem ar abre, falha fecha;

Sinal de entrada 3 a 15 psi;

Parte interna em aço inox 316, corpo em aço carbono;

Conexões tipo rosca ¾ in.

Fabricante: Badge Meter Inc..

Características :

Igual percentagem ar abre, falha fecha;

Sinal de entrada 3 a 15 psi ;

Parte interna em aço inox 316, corpo em aço carbono;

Conexões tipo rosca ½ in.

Válvulas solenóide:

Fabricante:

Características:

Sinal abre, falha fecha;

Sinal de entrada 220V ;

Parte interna em aço inox 316, corpo em aço carbono;

Conexões tipo rosca ¾ in.

Conversores Eletropneumáticos:

Fabricante: Hélix

Características:

Sinal de entrada: 4 a 20 mA;

Sinal de saída: 3 a 15 psi;

Alimentação: 20 psi.

Fabricante: Conoflow (ITT Fluid Technology Corporation);

Características:

Sinal de entrada: 4 a 20 mA;

Sinal de saída: 3 a 15 psi;

Alimentação: 20 psi.

Filtros Reguladores de Pressão:

Fabricante: Hélix - tipo F11-11;

Características:

Pressão máxima de Alimentação: 250 psi;

Saída: 20 psi.

Fabricante: Conoflow (ITT Fluid technology Corporation)

Características:

Pressão máxima de Alimentação: 300 psi;

Saída: 20 psi.

Termopares:

Fabricante: Ecil

Características:

tipo J (liga Cobre-Constantan);

Sinal de saída: 0 a 10 mV.

Faixa de temperatura: -20 - 400° C

Compensador para termopar:

Fabricante: ICI Instrumentação e Controle Industriais Ltda.

Características:

Entrada: termopar tipo J

Saída: 1-5VDC

Tacômetro:

Fabricante: Takotron

Características:

Freqüência medida: 0-6600rpm

Sinal de saída: 1-5VDC

Tubulações:

Fabricante: Tupy

Características:

Material: Ferro galvanizado

Diâmetro: ½ in, ¾ in.

Conexões: ½ in, ¾ in.

Bombas Centrífugas:

Fabricante: Schneider, modelo 02.01;

Características:

Potência: ¼ CV, 3400 RPM;

Alimentação: 220 V.

Selo: Buna-n

Rotor: alumínio

Fabricante: Schneider, modelo 02.01;

Características:

Potência: ¼ CV, 3400 RPM;

Alimentação: 220 V.

Selo: Viton

Rotor: Bronze

Agitador:**Motor:**

Fabricante: Eberle

Características:

Trifásico 220VAC

Velocidade: 0-700 rpm

Potência:

Redutor:

Fabricante:

Características:

Relação de redução: 1:5

Microcomputadores:

Características:

Processador: Pentium MMX 160MHz

Placa de Rede: compatível com NE2000

Unidade de disco rígido: 3 GBytes;

Unidade de disco flexível: 3 ¼ in, 1,44 MB;

Monitor: SVGA color;

Sistema operacional MS Windows™ 98;

Características:

Processador: Pentium III 500MHz

Placa de Rede: : compatível com NE2000

Unidade de disco rígido: 10 GB;

Unidade de disco flexível: 3 ¼ in, 1.44 MB;

Monitor: SVGA color;

Sistema operacional MS Windows™ 98;

Placas Analógica-Digital/Digital-Analógicas.

Fabricante: DataTranslation

Características:

Modelo: DT2812.

Aplicação: microcomputador tipo PC/XT/AT

Barramento ISA/EISA, com capacidade de transferência via DMA.

16 canais de entrada analógicos em modo comum ou 8 canais em modo diferencial;

Resolução 12 bits;

Taxa de amostragem de 60 KHz;

Faixa de entrada de 0 a 1,25 V, 2,5 V, 5V, 10 V, +/- 1,25 V, +/- 2,5 V. +/- 5 V, +/-10 V,

2 Canais de saída analógica;

Conversão na faixa 10 microsegundos a 3 min.;

2 contadores/temporizadores de 16 bits dedicados a contagem de eventos e medidas de frequências;

1 contador/temporizador de 16 bits programável;

16 canais de saída digital;

16 canais de entrada digital;

3 canais compartilhados com contadores/temporizadores.

Fabricante: Computer Boards

Características:

Modelo: MDA12.

Aplicação: microcomputador tipo PC/XT/AT

Barramento PCI

8 canais de saída analógicos

Resolução 12 bits;

Taxa de amostragem de 60 KHz;

Faixa de entrada de saída +/-10 V,

2 Canais de saída analógica;

Fabricante: Computer Boards

Características:

Modelo: P8R8DIO.

Aplicação: microcomputador tipo PC/XT/AT

Barramento PCI

8 entradas TTL

8 saídas a relê

Tensão máxima entre os terminais do relê: 110V

Corrente máxima entre os terminais do relê: 1A por relê.

Conversor de sinal Tensão - Corrente.

Fabricante: ICI Instrumentação e Controle Industriais Ltda.

Características:

Configuração para termo-resistências, termopares e sinais padronizados;

Sinal de saída: 0 a 20mA, 4 a 20 mA ou 0 a 10 Volts (optoisolado), configuráveis;

2 níveis de alarme configuráveis;

Fonte auxiliar para transmissor: 5, 10, 12, 24 Vcc;

Alimentação: 110 ou 220 VAC.

Sensor de pressão:

Fabricante: Contrisul;

Características:

Entrada: 0 a 400 mBar;

Saída: 4 a 20 mA;

Alimentação 20 Vcc;

Corpo em aço carbono, parte interna em aço inox 316;

APÊNDICE C- A POLIMERIZAÇÃO DO ESTIRENO EM SUSPENSÃO

O estudo da polimerização do Estireno deve ser dividido em duas partes, a reação e o processo. Enquanto na reação existe a preocupação com os mecanismos e agentes iniciadores, no processo o problema se estende desde agentes para estabilizar físico-quimicamente a reação, até o projeto de equipamentos e sistemas adequados para conferir ao produto as características desejadas. Como existem processos variados, de acordo com o produto final desejado, a aplicação, aqui, estará concentrada na polimerização em suspensão para a produção de Poliestireno expansível (EPS – *Expandable polystyrene*).

C-1. O processo de polimerização

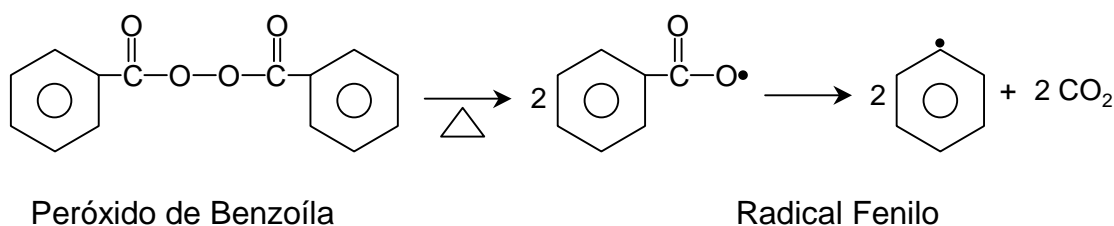
Polímeros são macromoléculas formadas a partir de unidades denominadas monômeros. Quanto à composição/estrutura do polímero a reação de polimerização pode ser classificada como:

•**Polimerização por condensação:** reação onde ocorre a liberação de alguma substância simples, como na formação do Nylon onde é liberado Ácido Clorídrico.

•**Polimerização por adição:** reação onde ocorre adição de unidades monoméricas à uma cadeia principal. Esta reação é característica de monômeros insaturados como Estireno ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$).

Um dos mecanismos típicos para reações de polimerização envolve a formação de radicais livres, ou seja substâncias intermediárias instáveis com alta reatividade. A polimerização do Estireno pode ser conduzida através de radicais livres, envolvendo os seguintes passos:

Iniciação: é o passo onde ocorre a formação do radical livre (intermediário ativo). Esta fase é essencial pois é onde é iniciado o crescimento da cadeia. Geralmente, a iniciação é obtida a partir da introdução de uma substância iniciadora, denominada **iniciador**, que se decompõe para a formação dos primeiros radicais livres. Os iniciadores podem ser monofuncionais ou multifuncionais. Fogler (1992) indica que a concentração de radicais livres está, normalmente, entre 10^{-6} e 10^{-8} gmol/L. Um iniciador monofuncional típico é o Peróxido de Benzoíla que se decompõe termicamente para formação do radical Fenilo.

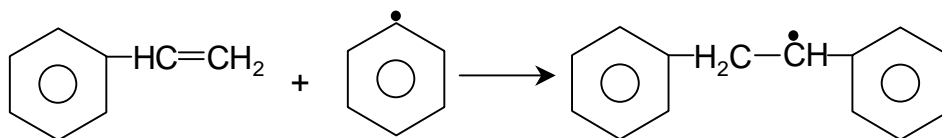


A reação de decomposição do peróxido de Bezoíla pode ser escrita de forma simbólica conforme a equação (98)



Outro iniciador típico é o 2,2-azo-bis-isobutironitrila (AIBN) e um iniciador multifuncional típico é o 2,5 dimetil-2,5-bis (Peróxido de Benzoil) hexano.

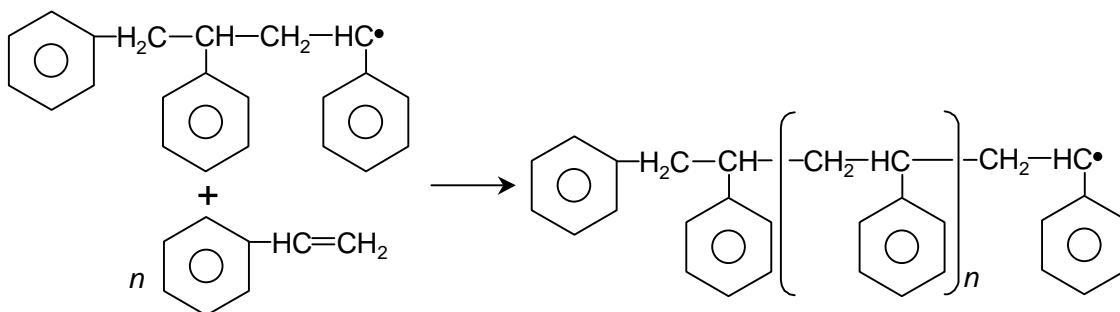
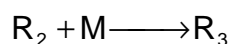
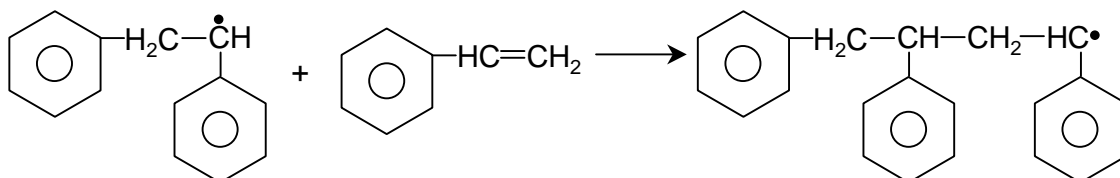
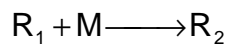
Após a formação do radical livre, a partir de um iniciador monofuncional, inicia-se a reação com o monômero:



Ou de forma simbólica:



Propagação: ocorre a reação entre um radical livre e um monômero ou entre um radical livre e um produto para formação de um novo intermediário ativo. Assim, o radical R_1 formado no passo de iniciação reage com uma nova molécula de monômero, conforme a equação (100):



De uma forma genérica:



Apesar de, após adição de cada unidade monomérica, o radical livre possuir um peso molecular progressivamente maior, é comum admitir que a velocidade da reação seja a mesma para todas as adições.

Transferência de cadeia: O radical livre presente em uma cadeia em crescimento é transferido para outras espécies químicas como o monômero e o solvente, por exemplo. Na transferência do radical ao monômero, uma cadeia de polímero vivo transfere seu radical para uma unidade monomérica. A equação (101) mostra a formação de um radical livre através da transferência do radical existente

em uma cadeia ativa R de tamanho j para um monômero M , resultando na extinção da cadeia ativa e formação de um polímero P_j . Assim, P_j é dito um polímero morto.



Na transferência do radical ao solvente, obtém-se a equação (102), cuja interpretação é semelhante à dada na equação (101).



É possível adicionar agentes de transferência de cadeia, ou seja, espécies como Tetracloreto de Carbono, Benzeno e Tolueno que possuem a capacidade de aumentar a taxa de transferência de cadeia da reação e podem ser utilizados para controlar o peso molecular do polímero.

Terminação: reação que ocorre entre os radicais livres para a formação de um produto estável. Ocorre, principalmente, através de dois mecanismos:

•Adição ou combinação:



•Desproporcionamento:



Ou seja, dois radicais livres de tamanho j e k podem combinar-se para formar um polímero morto de tamanho $j+k$ ou ocorrer a troca do par eletrônico entre os radicais para a formação de dois polímeros mortos de tamanhos j e k .

Estudos sobre o comportamento cinético da reação de polimerização do Estireno em diversas condições podem ser obtidos em Arai e Saito (1976), Dubé *et al.* (1990), Kalfas e Ray (1993), Kim e Choi (1988, 1989). Estes trabalhos destacam também o efeito gel onde ocorre a transição de fases no meio reativo e a

exotermicidade da reação, características importantes do processo de polimerização do Estireno em suspensão.

C-2. O processo de polimerização do Estireno em suspensão

A polimerização do Estireno em suspensão consiste, essencialmente, na formação de um sistema heterogêneo onde o Estireno está disperso em algum meio contínuo, normalmente a água. A suspensão é formada a partir de mecanismos de agitação onde se formam gotículas de Estireno, de forma que cada uma destas se comporta como um reator sujeito às condições (temperatura, pressão, etc.) do meio contínuo.

A polimerização do Estireno em suspensão é atribuída, tipicamente, a reatores do tipo batelada. Isto é devido, principalmente, às dificuldades hidrodinâmicas apresentadas pela suspensão, desde que as gotas sofrem alteração de viscosidade ao longo da reação, apresentando-se, ao final desta, em fase sólida.

De forma resumida, o processo de produção do Poliestireno Expansível (EPS) atravessa 4 etapas: preparatória, reação, impregnação e beneficiamento.

Na etapa preparatória o reator é alimentado com água e agentes estabilizantes. É iniciada a agitação, o Estireno e o iniciador são alimentados. Inicia-se o aquecimento através de um perfil de temperatura predeterminado.

Na etapa de reação, a temperatura do reator é, progressivamente elevada até a temperatura de 90-95° C, à pressão atmosférica. Novamente um perfil de temperatura adequado é imposto ao sistema.

Na etapa de impregnação, a pressão no reator é elevada à 6 kg/cm² sendo alimentado Pentano ao sistema. A temperatura é elevada à 120° C e mantida por um período preestabelecido. Nesta fase as gotículas se apresentam em forma de pérolas gelatinosas e o Pentano se difunde para o interior destas, conferindo-lhes a propriedade de expansibilidade. Encerrado o período de impregnação o reator é resfriado.

Na etapa de beneficiamento as pérolas já estão completamente sólidas e o reator é descarregado. As pérolas são centrifugadas, lavadas, recebem os aditivos necessários e são armazenadas.

As principais aplicações do EPS são as fabricações de isolantes térmicos e acústicos e protetores contra impacto para a indústria eletro-eletrônica, entre outras. Assim, tanto as propriedades físicas como a distribuição do tamanho da partículas, obtidas após a reação, são essenciais para o destino final do produto. As variáveis principais que devem ser mantidas ao longo da fase de reação para caracterizar a aplicação final do EPS são a frequência de agitação e a temperatura no reator.

A taxa de agitação é facilmente medida e manipulada porém, normalmente, é mantida constante durante todo o processo. Apesar disso possui uma grande influência sobre a distribuição granulométrica final, visto que são estabelecidas diferentes taxas de agitação para os produtos desejados. Além disso, juntamente com os agentes de suspensão é responsável pela manutenção da estabilidade da suspensão.

A temperatura é alterada durante o processo a partir de um perfil específico para o tipo de produto desejado. É uma variável difícil de ser controlada pois a reação possui um caráter exotérmico, podendo sofrer disparo, causando danos ao reator ou complicações no beneficiamento. Além disso, o controle da temperatura é realizado a partir de correntes de aquecimento e resfriamento alimentadas à camisa do reator. Este tipo de sistema possui um comportamento dinâmico variável (capacidade de transferência de calor/geração de energia na reação/capacidade de remoção de calor) e tempo morto acentuado dificultando ações corretivas manuais nos parâmetros.

A modelagem matemática do processo é complexa pois requer o conhecimento das expressões cinéticas para as reações apresentadas nas equações (98) a (104), além de uma representação para a distribuição do tamanho das partículas, desde que cada uma delas se comporta como um pequeno reator. Devem ainda ser considerados os mecanismos de quebramento e coalescência das gotas, ou seja, a dinâmica pela qual as gotas aumentam ou diminuem de tamanho pela agitação e ao longo da reação.

Estudos como os de Calabrese *et al.* (1986), Nishikawa *et al.* (1987) Konno *et al.* (1988), Chatzi e Kiparissides (1994) apresentam discussões e modelos para a distribuição e formação de gotas em meios dispersos para sistemas sem reação, ou seja, sistemas heterogêneos semelhantes à fase inicial da polimerização do Estireno em suspensão. É claro que o comportamento do sistema disperso depende de propriedades físicas das espécies envolvidas, (como tensão interfacial) porém os mecanismos são semelhantes. Sistemas com reação são mais complexos porque as propriedades físicas da dispersão variam ao longo da reação.

Kalfas *et al.* (1993) mostraram a complexidade das relações entre a curva de distribuição de tamanho das partículas, frequência de agitação e temperatura, utilizando a polimerização em suspensão do Metacrilato de Metila.

Polaco *et al.* (1999) estudaram a mesma reação de Kalfas *et al.* (1993) observando a distribuição do tamanho das partículas durante o percurso da reação e a influência da taxa de agitação.

Maggioris *et al.* (2000) realizaram um experimento semelhante, porém utilizaram a reação de polimerização do Cloreto de Vinila e observaram, além da taxa de agitação, as alterações promovidas pelo aumento da concentração de estabilizante.

Vega, Lima e Pinto (2001) desenvolveram um método para determinação do peso molecular médio na polimerização do Estireno em solução a partir de medidas de viscosidade. O método foi calibrado com a equação de Mark-Houwink para permitir a avaliação do peso molecular médio em tempo real.

Gugliota, Salazar, Vega e Meira (2001) utilizaram o n-nonil mercaptana como agente de transferência de cadeia para controlar o peso molecular em uma reação de polimerização de Estireno em emulsão. Nos experimentos realizados em um reator com 0,8L, altas conversões foram obtidas indicando melhor desempenho para o n-nonil mercaptana do que para o tetracloreto de carbono.

Descrições detalhadas do processo de produção de EPS estão em Bishop (1971), Machado (1996, 2000) e Mascioli (2001).

APÊNDICE D- O SOFTWARE

O sistema para controle e monitoramento de processos foi baseado inteiramente nos conceitos da programação orientada a objetos e foi denominado 4^{Ctrl} (*For Control*). O sistema 4^{Ctrl} define, por questões organizacionais, cinco módulos (figura 146) para gerenciar as entidades envolvidas em processos:

Gerente 1- *DACs Manager*: agrupa as unidades de aquisição de dados (*Data Acquisition Cards*).

Gerente 2- *Systems Manager*: reúne as unidades que representam os sistemas a serem controlados. Tecnicamente, os módulos do gerente 1 são unidades constituintes dos módulos do gerente 2 e não deveriam ser acessados diretamente de outras unidades. Porém, por questões de flexibilidade esta restrição foi eliminada, em detrimento da organização.

Gerente 3- *Controllers Manager*: classifica as unidades que representam os controladores dos processos contidos no gerente 2.

Gerente 4- *Loops Manager*: gerenciador das unidades que representam as malhas de controle. Os três gerenciadores anteriores contém unidades ligadas por este. Este gerenciador é responsável por organizar o fluxo de informações em uma malha de controle e permite que múltiplas malhas possam ser manipuladas, independentemente, a partir de um mesmo computador, dependendo da capacidade deste.

Gerente 5- *AddIns Manager*: agrupa as unidades não relacionadas ao sistema de controle, como agenda de tarefas, servidores de aquisição de dados, gravação de dados, etc.

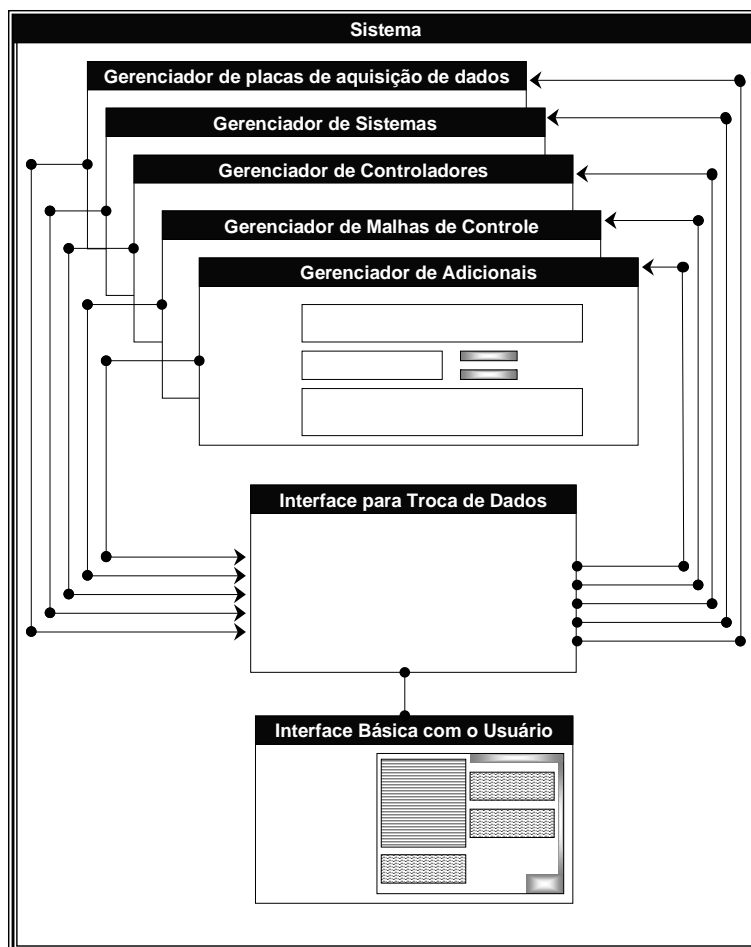


Figura 146 – Protótipo do sistema de monitoramento e controle- 4^{Ctrl}.

Os módulos contidos nos gerentes não trocam informações diretamente, mas através de uma interface (Interface para Troca de Dados -ITD), que funciona como um multiplexador, identificando a origem e a direção da informação em trânsito. Assim, é possível estabelecer uma política para a troca de informações ou, até mesmo, o bloqueio de acesso de alguns módulos sobre outros. Alguns detalhes da implementação serão discutidos na próxima seção.

D-1. A implementação

A linguagem de programação adotada no projeto de 4^{Ctrl} foi a *Object-Pascal*. Esta escolha foi guiada por características como legibilidade, modernidade, atualização constante, flexibilidade e robustez. Dois pontos fortes da linguagem, do

ponto de vista do desenvolvimento de sistemas de controle, são a implementação do modelo de objetos e a possibilidade do uso instruções de baixo nível, até mesmo em *Assembler*. Assim a linguagem mostrou-se adequada, tanto para o desenvolvimento do sistema, como para o desenvolvimento das bibliotecas para acesso ao *hardware* de controle. Além disso a linguagem possui um ambiente integrado para desenvolvimento, *Borland Delphi*, muito bem desenvolvido, facilitando o projeto da interface com o usuário e dispondo de ferramentas para agilizar a escrita/manutenção do código e rastreamento de erros de sintaxe e lógica.

A implementação de um sistema orientado a objetos é iniciada com a definição da hierarquia de classes. Cada gerenciador, figura 146, foi definido como uma classe particular, figura 147, para manipular módulos distintos (controladores, sistemas, etc.), porém como todos os gerenciadores possuem características semelhantes, foi definida uma classe básica (TManager) que reúne as similaridades (atributos e métodos) para todos os gerenciadores. Esta hierarquia gera uma relação de herança entre as classes, sendo os objetos derivados das classes (ControllerManager, SystemManager, etc.) independentes, porém com características comuns. Para os gerenciadores, apenas uma instância de cada classe é requerida. Para os módulos do sistema de controle uma hierarquia, figura 148, semelhante à dos gerenciadores foi adotada. Porém, múltiplas instâncias de cada classe podem ser derivadas.

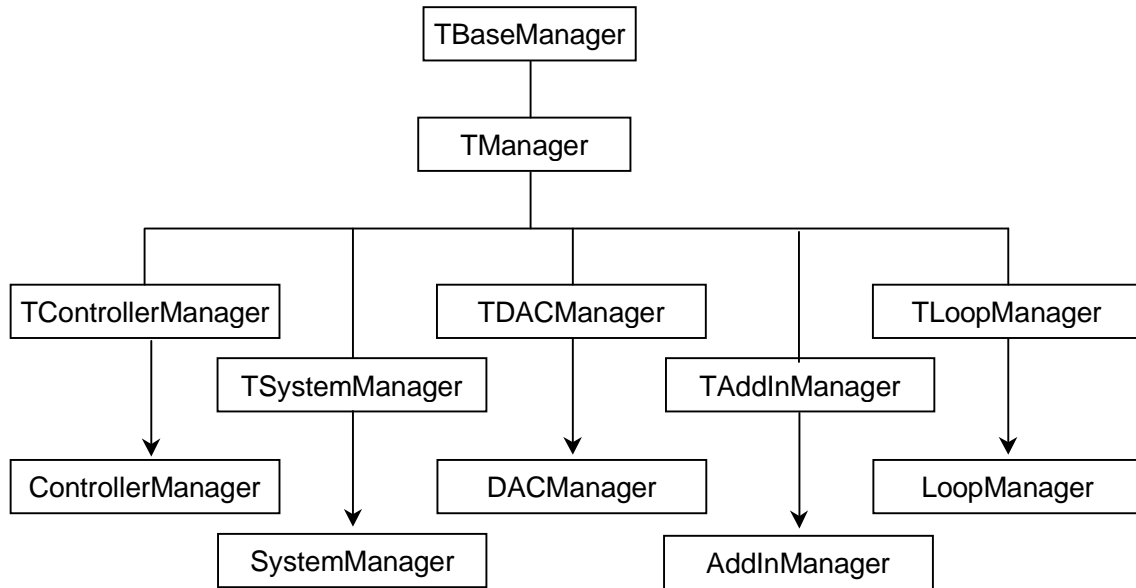


Figura 147 - Hierarquia de classes para os gerenciadores do sistema de controle.

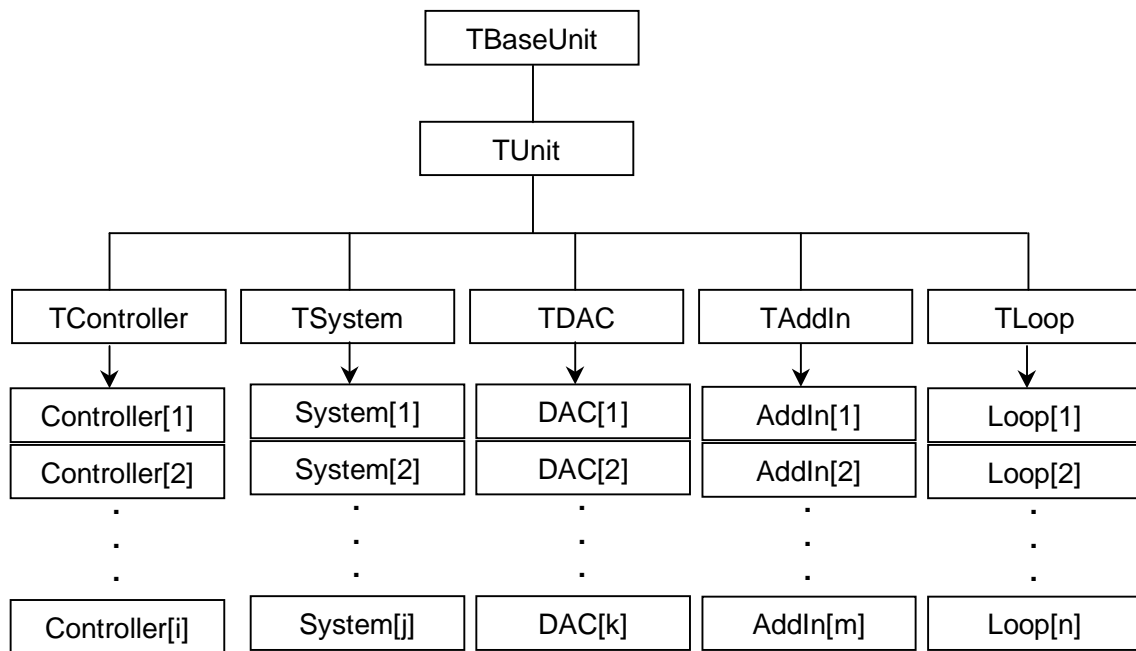


Figura 148 - Hierarquia de classes para os módulos do sistema de controle.

A figura 149 apresenta a interface gráfica formada pelos gerenciadores. As interfaces dos gerentes são formadas por três seções: módulos carregados (*loaded*), disponíveis (*available*) e informações (*description*). A seção dos módulos carregados possui na parte inferior, o nome das principais funções definidas pelo módulo

selecionado na parte superior da seção. Através de um duplo – clique do *mouse* é possível ativar a função. A seção de informações exibe entre outras, a informação do *ID*, um código único, para o gerente considerado, que identifica o módulo para o gerenciador e para a ITD, permitindo a troca de informações. O *ID* é definido pelo projetista/programador e pode ser idêntico para módulos contidos em diferentes gerenciadores, porém na existência de *IDs* iguais em um único gerenciador, apenas um deles pode ser carregado.

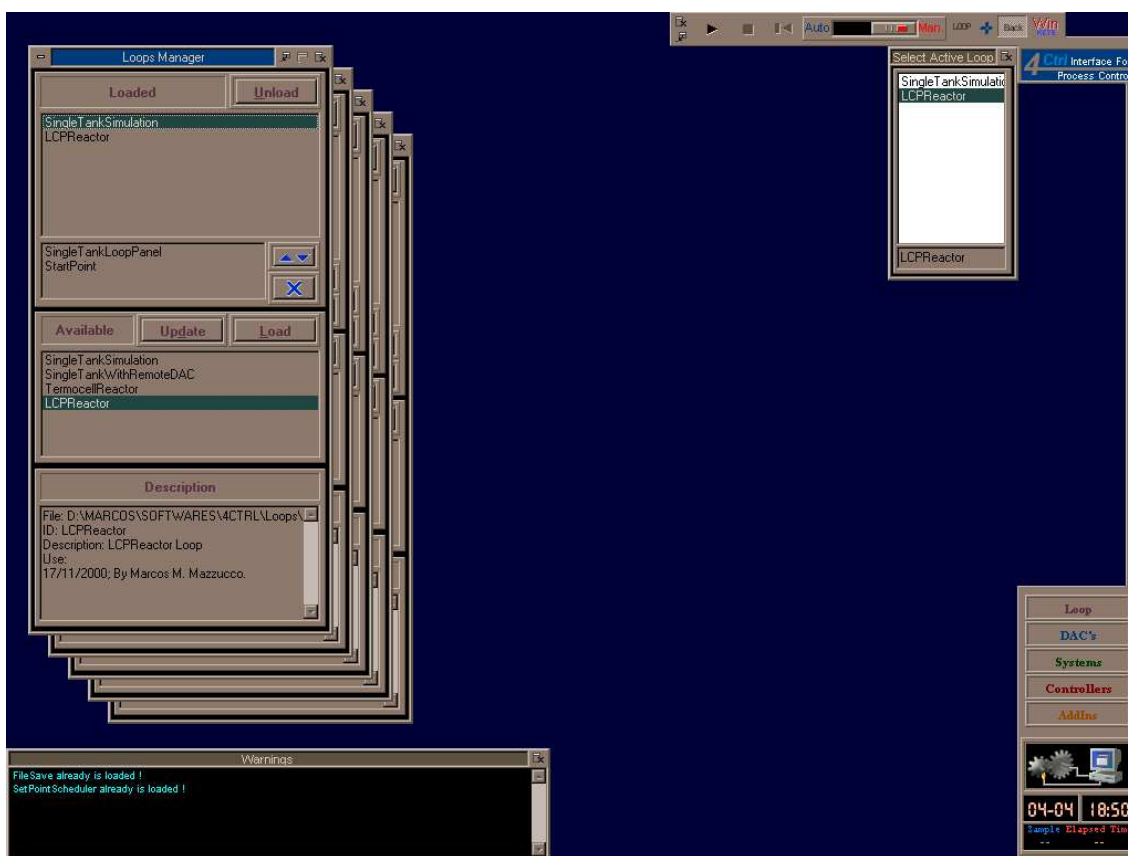


Figura 149 - Os gerenciadores em 4^{Ctrl} .

Cada módulo ligado a um gerenciador é representado por uma biblioteca de ligação dinâmica (*Dynamic Link Library - DLL*), devidamente compilada e armazenada em disco em uma estrutura de diretórios pré – definida, tabela 23. A partir desta estrutura, cada gerenciador busca os módulos disponíveis, os quais correspondem a seus sub – diretórios, e relaciona-os na seção de módulos disponíveis (*available*), figura 149. Os identificadores são obtidos através da

pesquisa dos gerenciadores sobre todos os módulos, através de duas funções de identificação incluídas nestes, "Classificadora" e "Identificadora". Desde que seja respeitada a convenção de passagem de parâmetros, *cdecl*, qualquer linguagem de programação ou aplicativo pode fazer uso de um módulo de 4^{Ctrl} . Diferentes convenções poderiam ser utilizadas para a passagem de parâmetros, a *cdecl* foi adotada pois é padrão para compiladores C/C++, para os quais a maioria dos *software* são compatíveis. Além disso, qualquer compilador desta natureza pode ser utilizado para criar um módulo para 4^{Ctrl} . Isto confere robustez de manutenção suficiente para o sistema, pois permite que sejam realizadas alterações neste pela simples modificação ou substituição de um módulo.

A aplicação de um módulo é dada pela tríade Entradas/Parâmetros/Saídas, figura 150. Assim, devidamente ajustado pelos parâmetros, um módulo pode receber entradas e enviar saídas, podendo estas serem dependentes ou não.

A figura 151 apresenta uma malha de controle simples com módulos contendo uma entrada e uma saída (SISO), cuja representação interna, para 4^{Ctrl} , está representada na figura 152. A figura 153 mostra as tríades para os módulos que constituem um processo simples. O módulo de aquisição de dados, AD/DA, está incluído no módulo sistema, e portanto a representação de sua tríade não apresenta relação direta com a malha estabelecida. Porém, é claro que a saída do módulo *sistema*, $Y(t)$, é dada pela saída do módulo AD/DA, $Y^*(t)$.

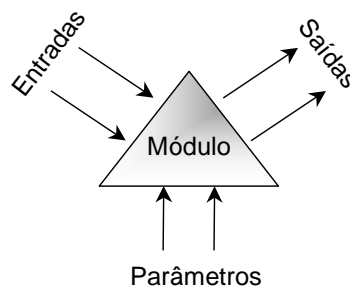


Figura 150 - Tríade Entradas/Parâmetros/Saídas.

Tabela 23 - Estrutura de diretórios necessária para os gerenciadores.

Diretório	Gerenciador	Módulo	Identificador	
...:\...\4Ctrl	\AddIns	AddIn_1	ID1	
		AddIn_k	IDk	
		\Controllers	Controller_1	ID1
			Controller_k	IDk
		\DACs	DAC_1	ID1
			DAC_k	IDk
	\Loops	Loop_1	ID1	
		Loop_k	IDk	
	\Systems	System_1	ID1	
		System_k	IDk	

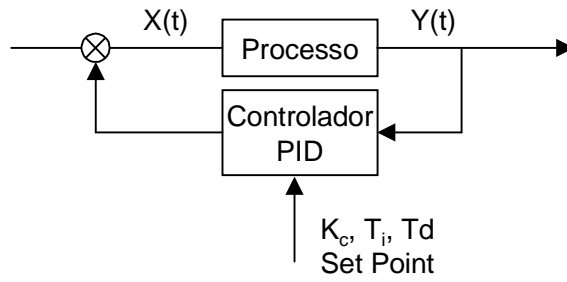


Figura 151- Um processo SISO (*Single Input Single Output*).

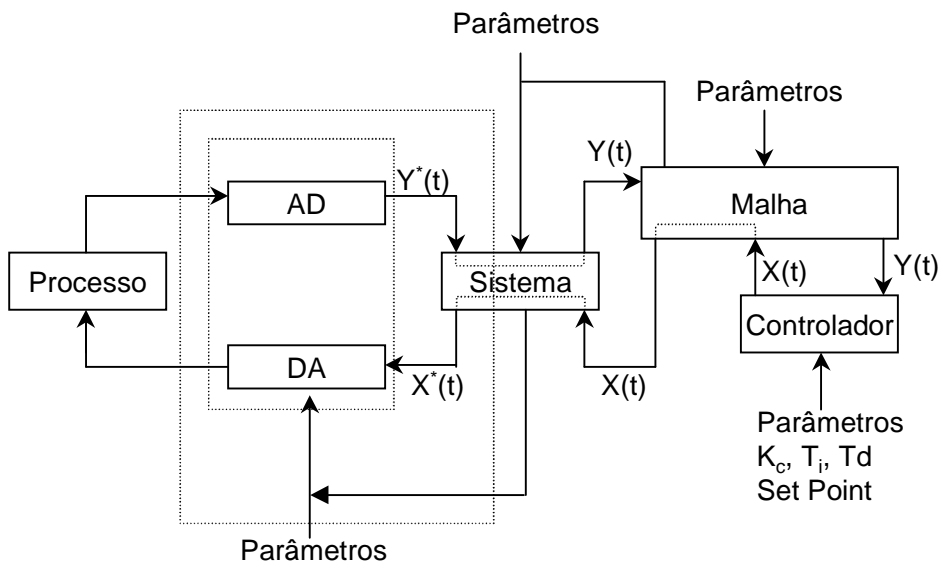


Figura 152 - Representação de um processo SISO para 4^{Ctrl}.

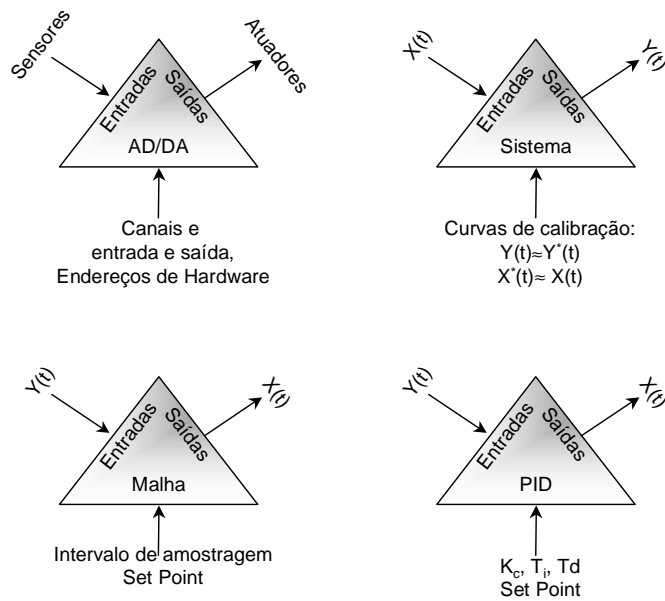


Figura 153 - Tríades para os módulos da figura 152.

D-1.1. Módulos de Troca de Dados

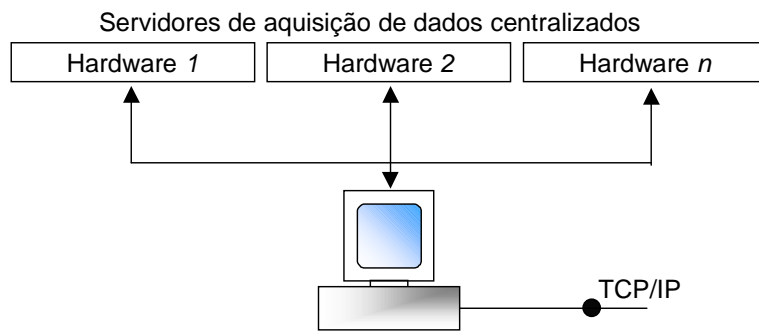
Como um dos objetivos deste trabalho é fornecer um sistema com robustez e flexibilidade para o controle e monitoramento de múltiplas unidades de produção em batelada, foi definida uma estrutura cliente/servidor para troca de informações entre processo e o sistemas de controle. Neste tipo de estrutura são formados blocos independentes, com habilidades específicas, que trocam informações entre si através de um protocolo preestabelecido. A troca interna de informações é realizada através da ITD (Interface para Troca de Dados) que permite a passagem de dados numéricos ou em forma textual. As funções principais disponíveis na ITD estão descritas na tabela 24. Nesta, enquanto as funções *Input* e *Output* transportam apenas dados numéricos, as funções *GetModuleParameter* e *SetModuleParameter* transportam dados alfanuméricos permitindo uma troca mais flexível de informações.

Para permitir flexibilidade na estruturação física do sistema, 4^{Ctrl} recebeu a implementação de unidades remotas para acesso ao *hardware* de controle. Uma rede baseada no protocolo TCP/IP foi adotada para transportar dados de computadores contendo servidores de dados até máquinas clientes, que realizam os cálculos necessários e retornam ações às unidades servidoras. Desta forma não existem limitações para a distância de transporte dos dados. Além disso, o uso da rede *Internet*, disponibiliza os dados à grandes distâncias, permitindo supervisão e até manipulação remota da planta.

Tabela 24 - Funções principais da ITD.

Função	Descrição
IsLoaded(const ModuleType, ModuleName:ShortString):Boolean;	Identifica a disponibilidade de um módulo
LoadModule(const ModuleType, ModuleName:ShortString):Integer;	Permite que um módulo requisiite outro a partir de um arquivo.
Execute(const ModuleType, ModuleName:ShortString):Integer;	Permite que um módulo execute outro disponível.
Input(const ModuleType, ModuleName:ShortString; const ch:Cardinal; var Inpt:Double):Integer;	Permite que um módulo obtenha o valor das entradas de outro.
Output(const ModuleType, ModuleName:ShortString; const ch:Cardinal; var Outpt:Double):Integer;	Permite que um módulo obtenha o valor das saídas de outro.
GetModuleParameter(const ModuleType, ModuleName,Parameter:ShortString; var ParameterValue:ShortString):Integer;	Permite que um módulo conheça os parâmetros de outro.
SetModuleParameter(const ModuleType, ModuleName,Parameter, ParameterValue:ShortString):Integer;	Permite que um módulo altere os parâmetros de outro.

Com a definição da estrutura cliente/servidor, a instalação do sistema de controle pode assumir, basicamente, 5 configurações, as quais são apresentadas nas figuras 154, 155, 156, 157 e 158. Assim, é possível obter desde instalações totalmente centralizadas para pequenas unidades ou unidades sem redes para transmissão de dados até instalações totalmente distribuídas.



Cientes: Controle centralizado - Múltiplas Malhas

Figura 154 - Estrutura de dados totalmente centralizada.

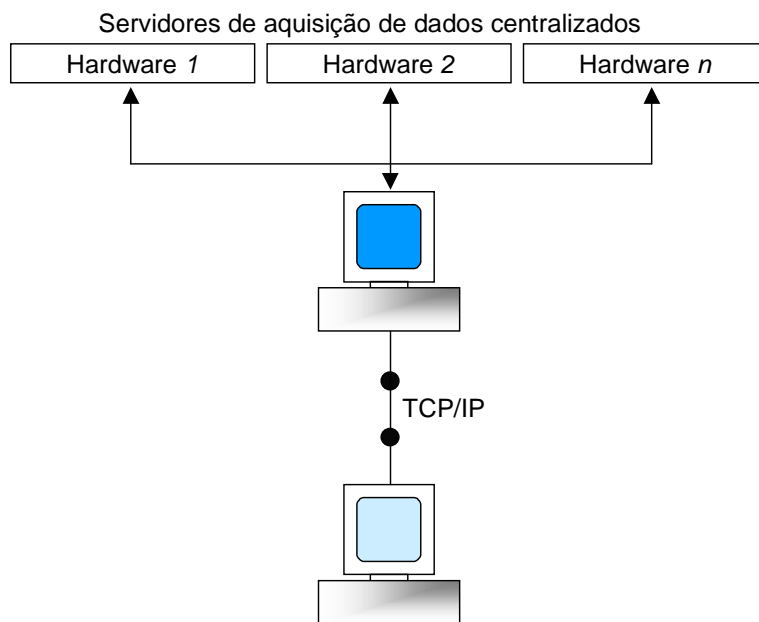
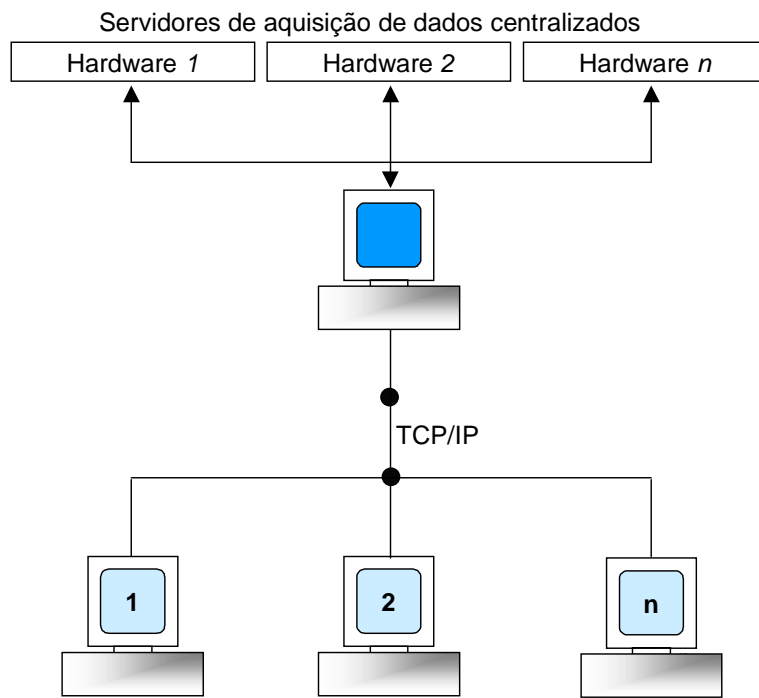
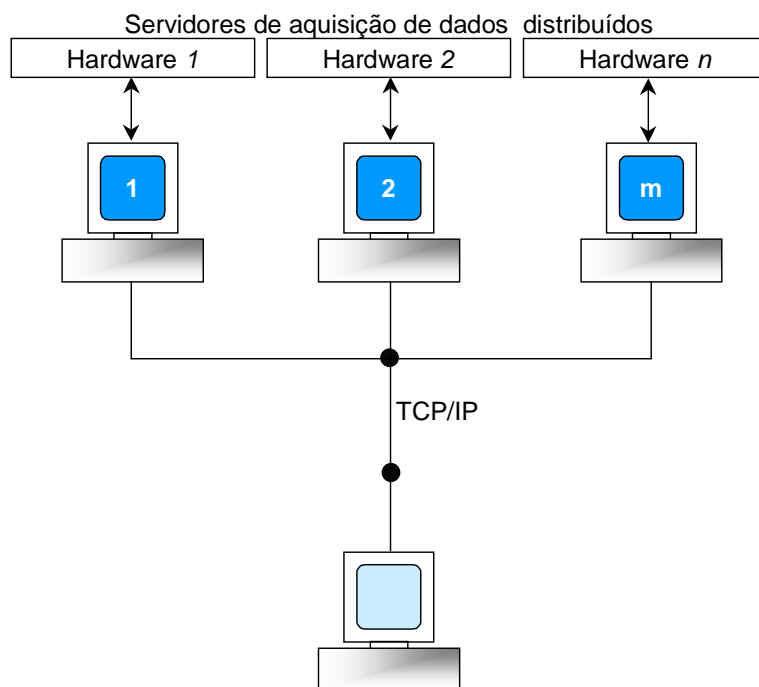


Figura 155 - Estrutura de dados centralizada por funcionalidade.



Cientes: Controle distribuído - Múltiplas Malhas

Figura 156 - Estrutura de dados centralizada no *hardware*.



Cientes: Controle centralizado - Múltiplas Malhas

Figura 157 - Estrutura de dados centralizada no controle.

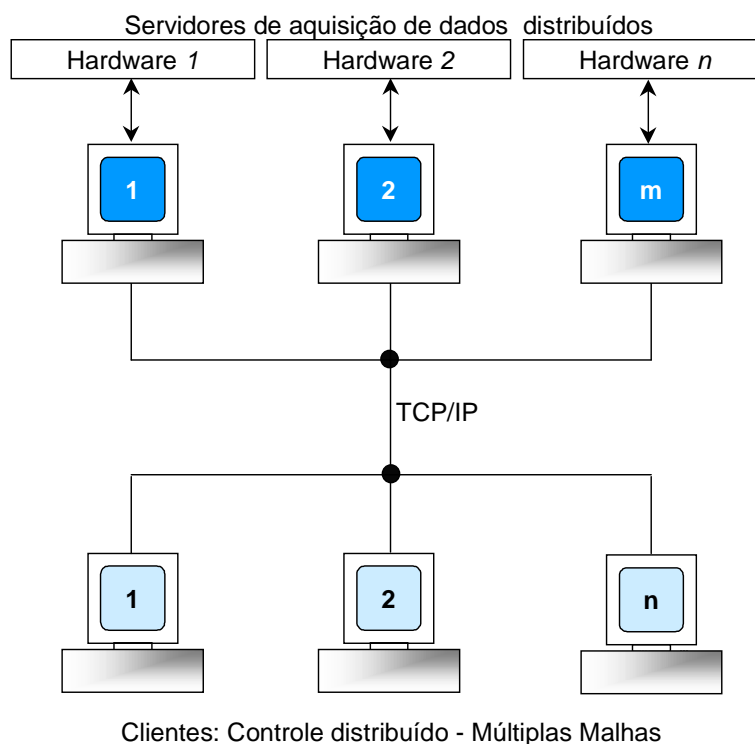


Figura 158 - Estrutura de dados totalmente distribuída.

Certamente uma das grandes vantagens do uso de servidores de dados é o aproveitamento de recursos de *hardware* para múltiplas soluções, ou ainda supervisionar várias unidades a partir de uma única estação controladora, figura 157. A figura 159 mostra a interface gráfica dos servidores de aquisição de dados para três placas, cujas especificações estão descritas no apêndice B.

A figura 160 mostra as interfaces gráficas para duas placas de aquisição de dados. Estas interfaces não são acessadas diretamente, desde que são utilizadas pelo módulo “sistema”, o qual é responsável pela manipulação direta do processo, porém são úteis para a manutenção e instalação do *software*.

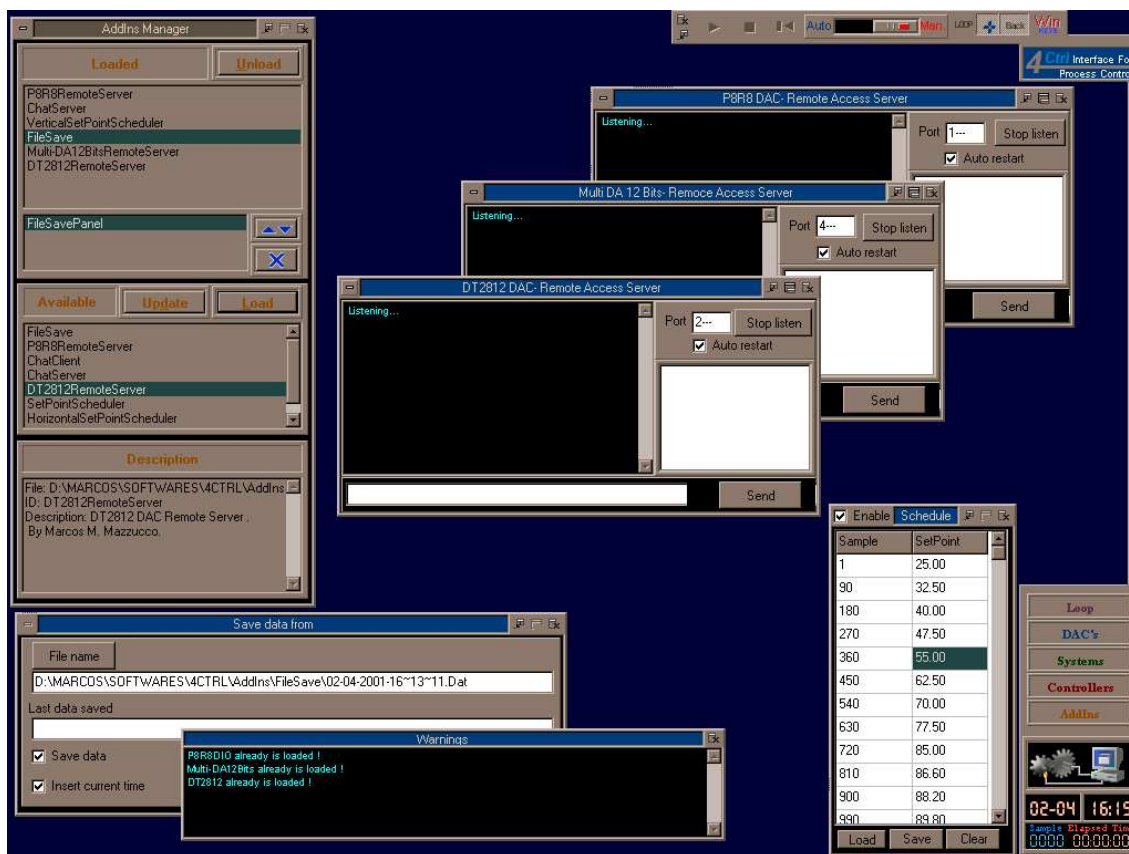


Figura 159 – Servidores de dados e módulos adicionais.

A troca de dados é um dos elementos mais importantes do sistema de controle, pois permite a formação de uma estrutura flexível e moderna onde as informações devem estar totalmente disponíveis. A implementação em bibliotecas de ligação dinâmica, facilita a substituição de *hardware* defeituoso por novas unidades, de diferentes fabricantes, sem a necessidade de recompilação do código pela substituição do *Driver*. Para o desenvolvimento de novos sistemas, a implementação modular é interessante, pois generaliza as funções para acesso aos dados, tabela 24. A estrutura dos módulos de aquisição de dados definida em 4^{Ctrl} é adequada para processos contínuos no tempo, desde que sistemas constituídos por eventos discretos exigem um tratamento específico, Banks e Carson (1984).

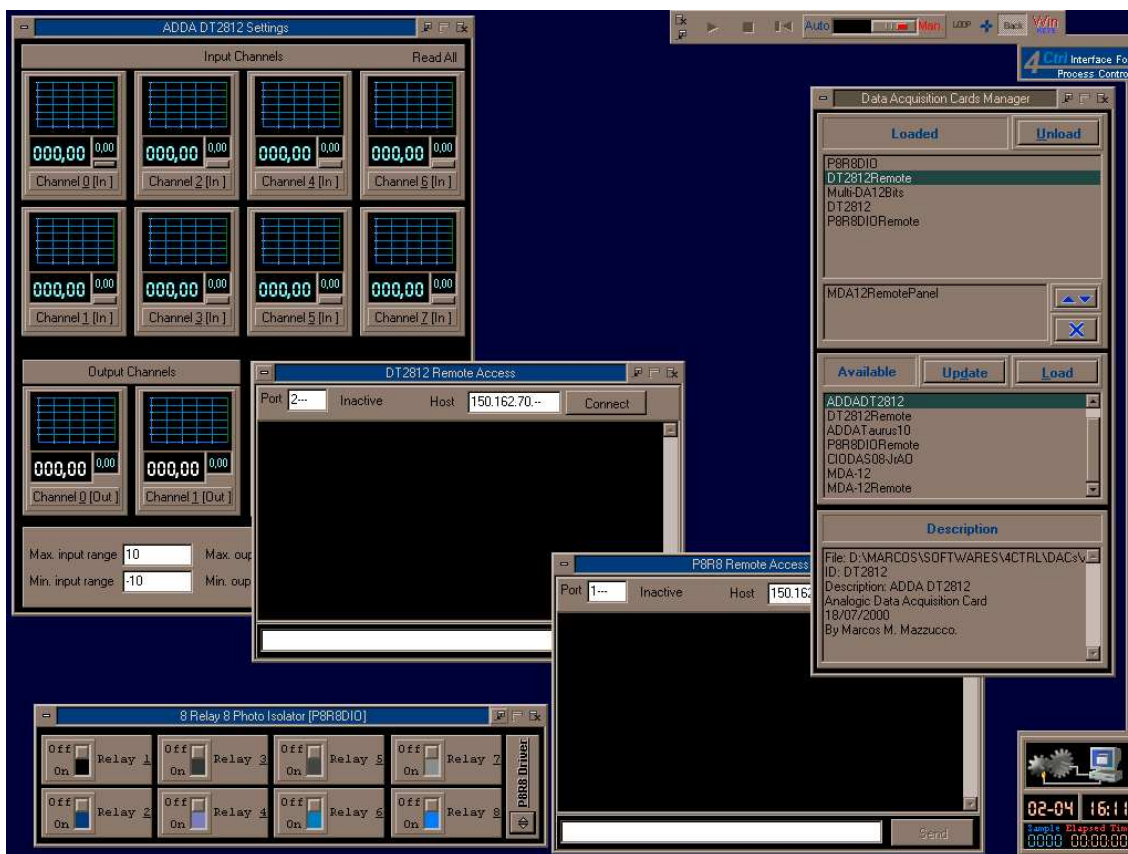


Figura 160 - Interfaces gráficas para aquisição de dados : Clientes e Driver.

A figura 161, apresenta as interfaces gráficas parciais disponibilizadas por quatro sistemas implementados em 4^{Ctrl} que podem utilizar simultaneamente a ITD permitindo que um único conjunto *software/hardware* possa monitorar/controlar diversos processos.

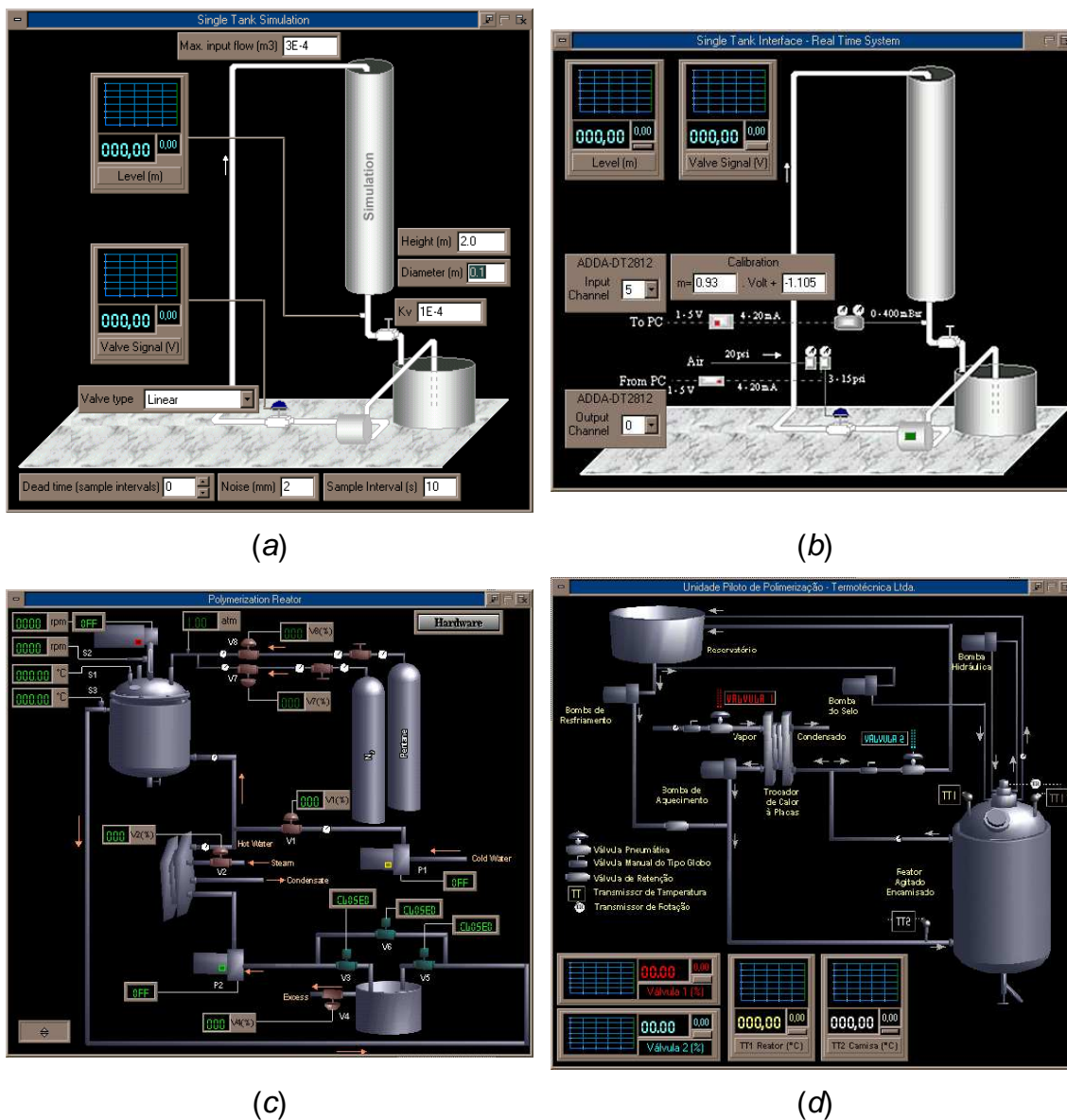


Figura 161 - Sistemas simulado (a) e reais (b, c e d).

D-2. O Sequenciamento de Operações para o Controle da Unidade de Polimerização

Processos químicos são representados por operações unitárias a fim de simplificar o projeto e operação de sistemas. O controle automático do processo, porém, requer a integração das operações unitárias envolvidas e, em muitos casos, o acoplamento das informações destas. Processos que operam em regime de

batelada ou semi - batelada, requerem partidas, paradas e limpezas freqüentes, de forma que um sequenciamento rápido e eficiente de todas as etapas envolvidas pode representar um ganho substancial de tempo. A implementação de 4^{Ctrl} possibilita o acionamento de motores, bombas, válvulas solenóides, válvulas pneumáticas, etc automaticamente e assim o sequenciamento das operações pode ser realizado. Dependendo da complexidade da lógica do sequenciamento das operações, várias abordagens podem ser utilizadas, como projeto orientado a objetos (Rumbaugh *et al.*, 1994), sistemas de eventos discretos (Banks e Carson, 1984) ou, em termos de hardware, controladores lógico-programáveis (Seborg *et al.*, 1989). Os controladores lógico-programáveis (CLP) são comuns em sistemas industriais, inclusive em processos do tipo batelada para solucionar complexas cadeias lógicas no sequenciamento de atividades.

Os sistemas implementados em 4^{Ctrl} não apresentam uma lógica complexa entre os eventos que se sucedem durante as operações e, portanto, o sequenciamento pode ser realizado por uma fila de tarefas simples.

O conjunto básico de instruções que devem ser enviadas para o funcionamento das unidades experimentais apresentadas nas figuras 21, 22 e 23 está resumido no diagrama da figura 162. O diagrama mostra que seis eventos distintos definem as atividades mínimas necessárias à operação dos sistemas. Estão representadas também, as entidades que realizam as tarefas: Gerenciador de processos e eventos, Algoritmo de controle, Algoritmos de acesso ao hardware e Armazenamento de dados.

Para o sistema de polimerização de Estireno aqui utilizado, as operações necessárias para partida, reação e parada da unidade são mais complexas que a ilustrada na da figura 162. A figura 163 indica esta complexidade, 33 eventos representam as operações básicas para teste, operação e diagnóstico de uma unidade típica de produção de poliestireno expansível em batelada. Não estão incluídas as instruções requeridas para a fase de impregnação, quando o reator é pressurizado, recebe uma quantidade pré - definida de Pentano e um perfil de temperatura é imposto.

Os eventos 1 a 10, figura 163, são preparatórios para a unidade, habilitando instrumentos e equipamentos e iniciando os periféricos do processo. A figura 164

mostra 4^{Ctrl} com o sistema de controle para a unidade de polimerização. Está destacada a caixa de acionamento manual dos equipamentos do sistema.

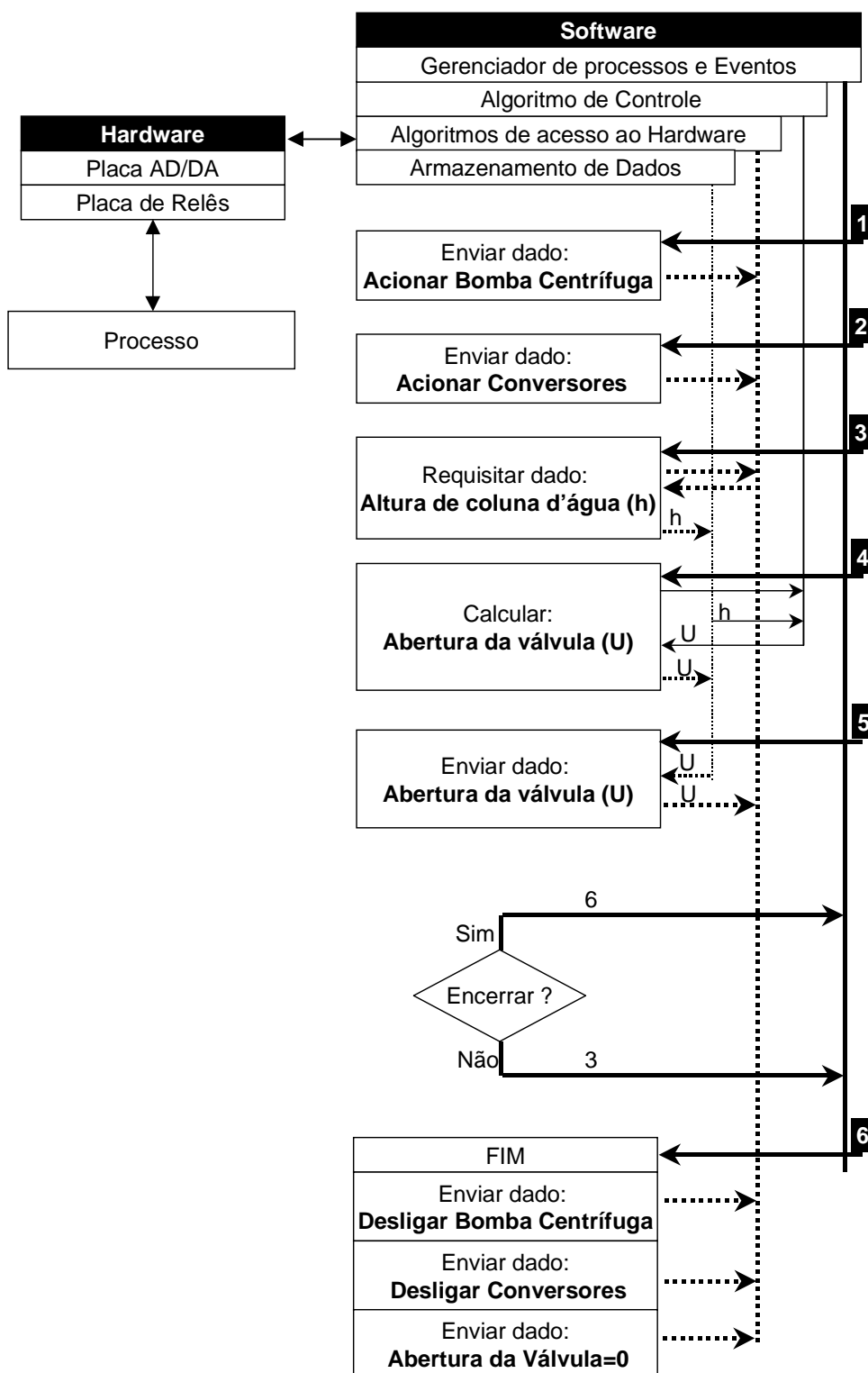


Figura 162 – Conjunto de instruções para as malhas de controle de nível

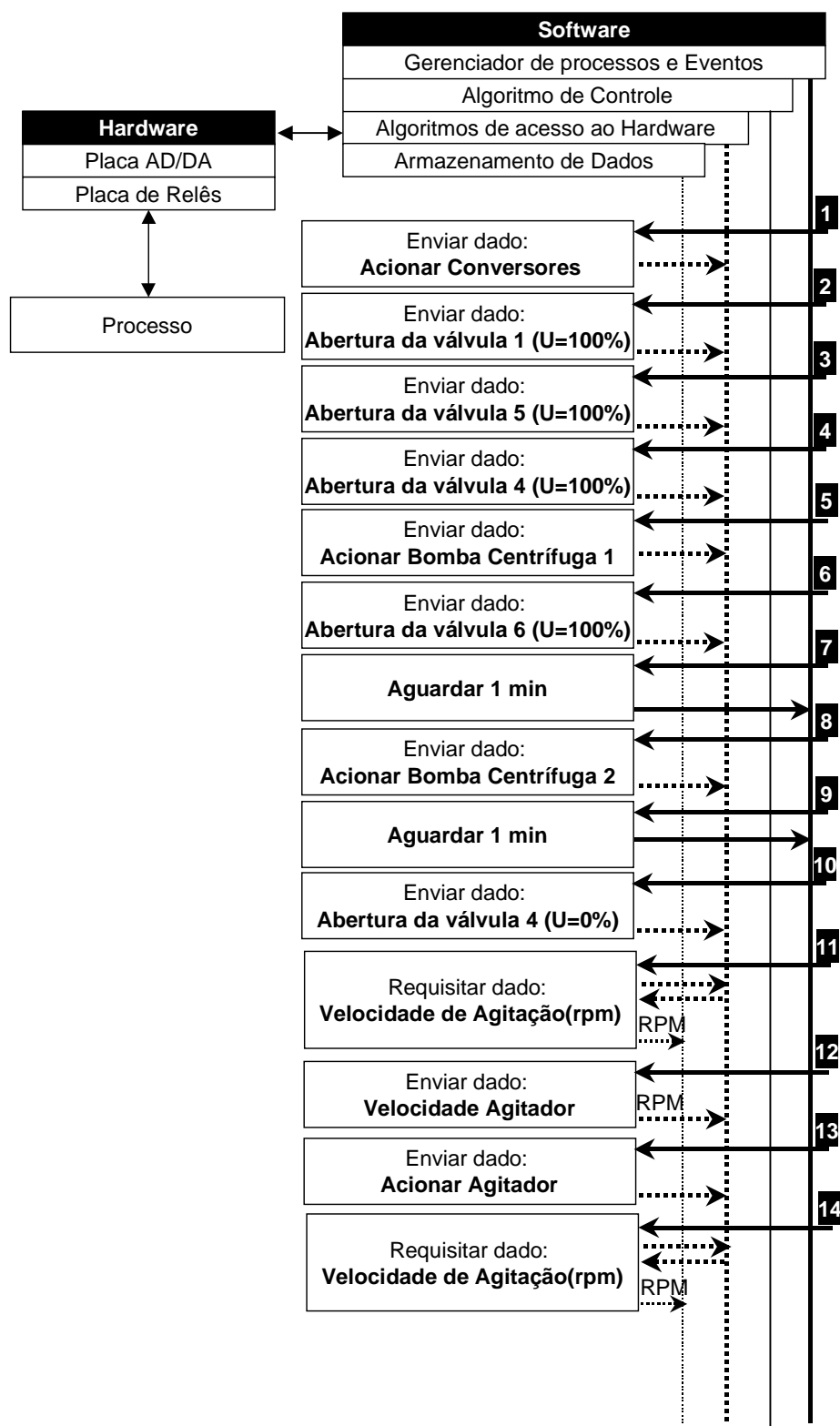


Figura 163 - Conjunto de instruções para o reator de polimerização (Parte 1/4).

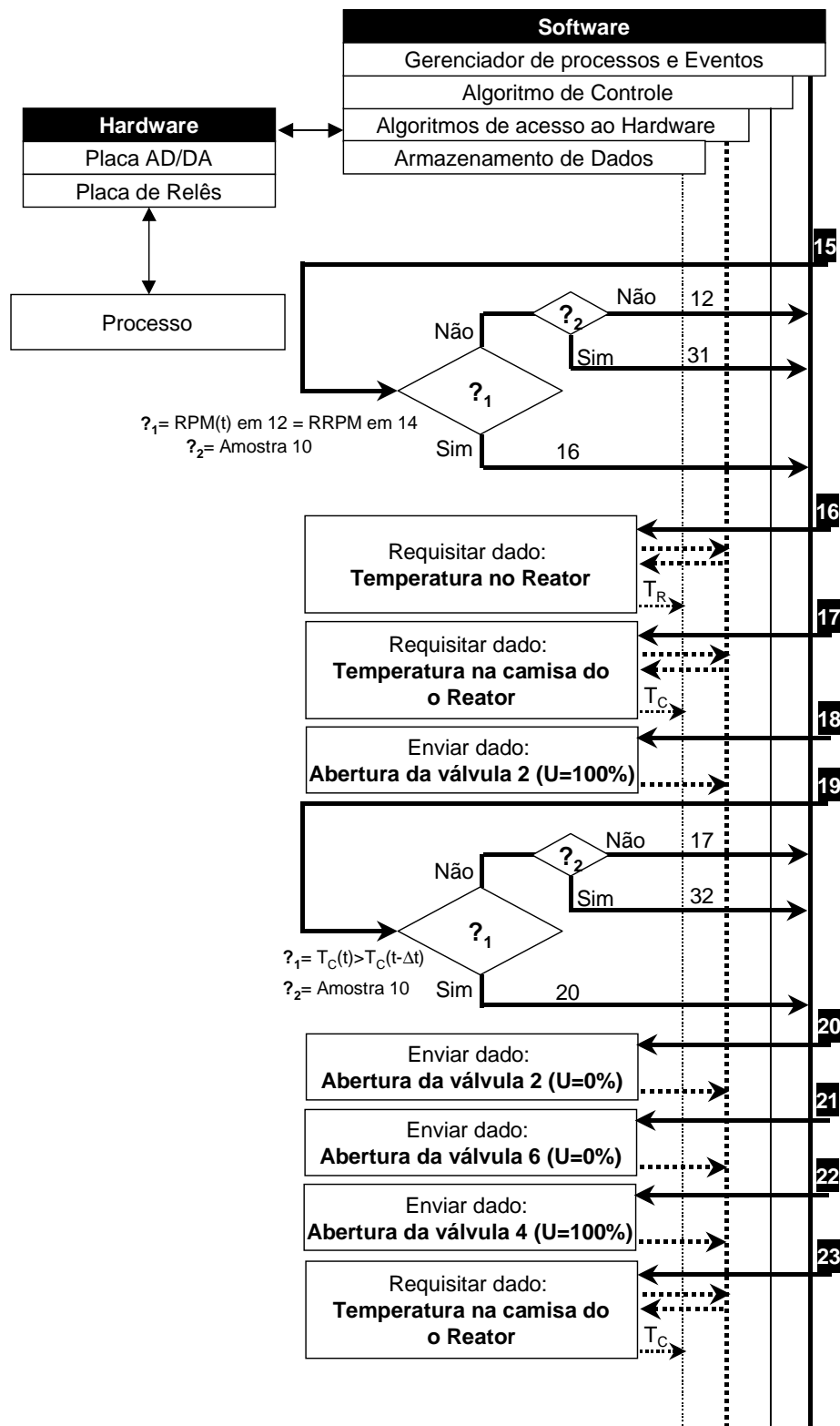


Figura 163 - Conjunto de instruções para o reator de polimerização (Parte 2/4).

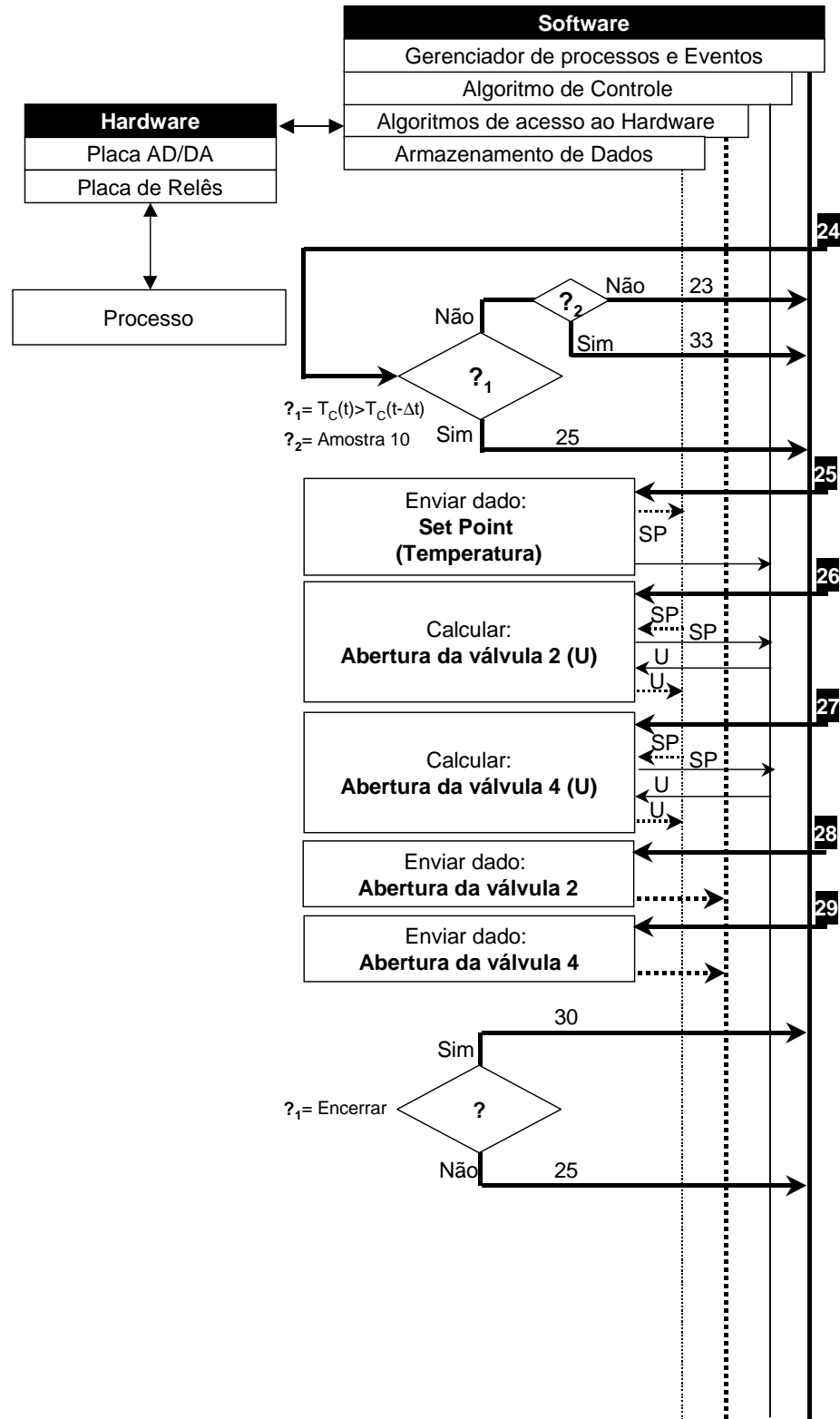


Figura 163 - Conjunto de instruções para o reator de polimerização (Parte 3/4).

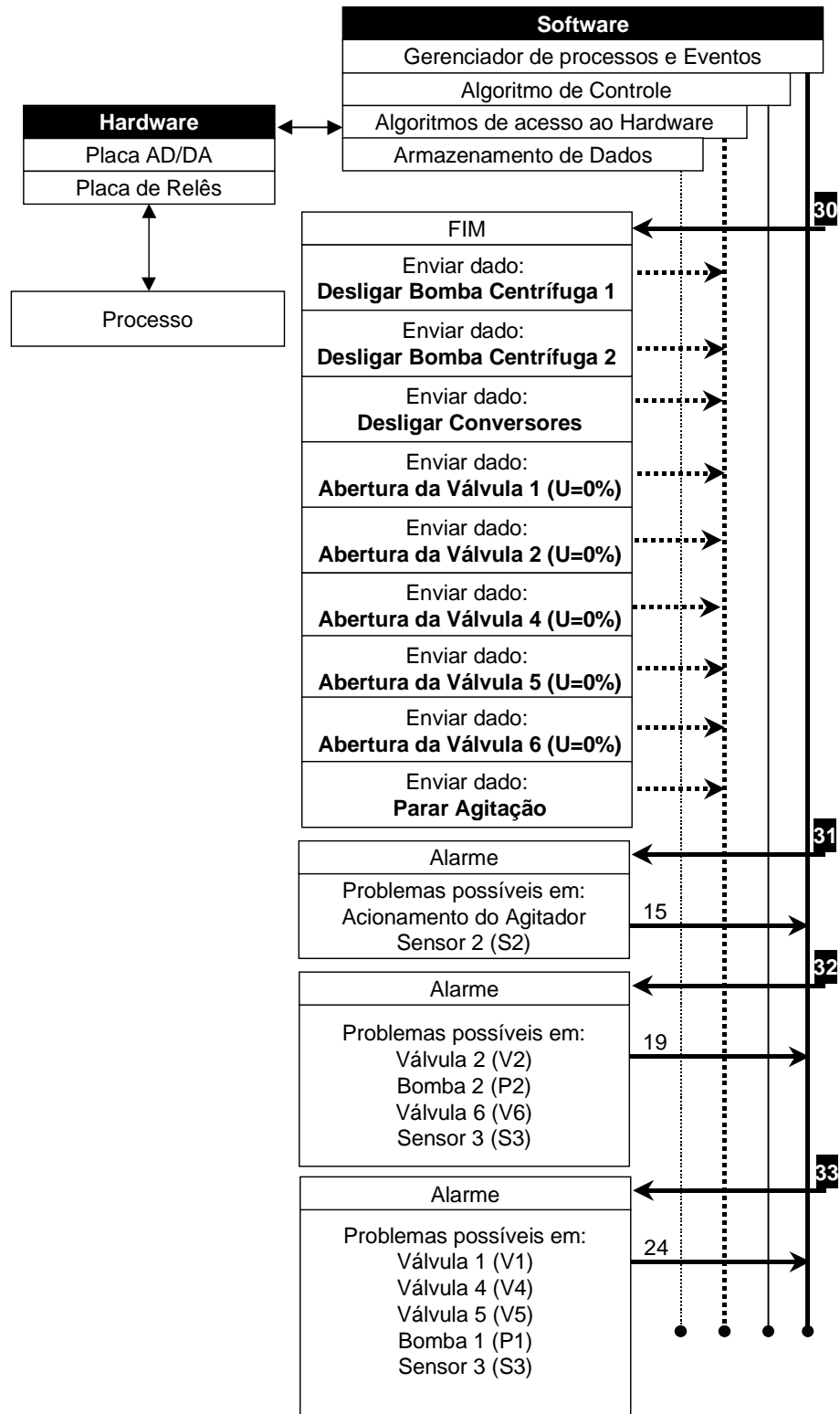


Figura 163 - Conjunto de instruções para o reator de polimerização (Parte 4/4).

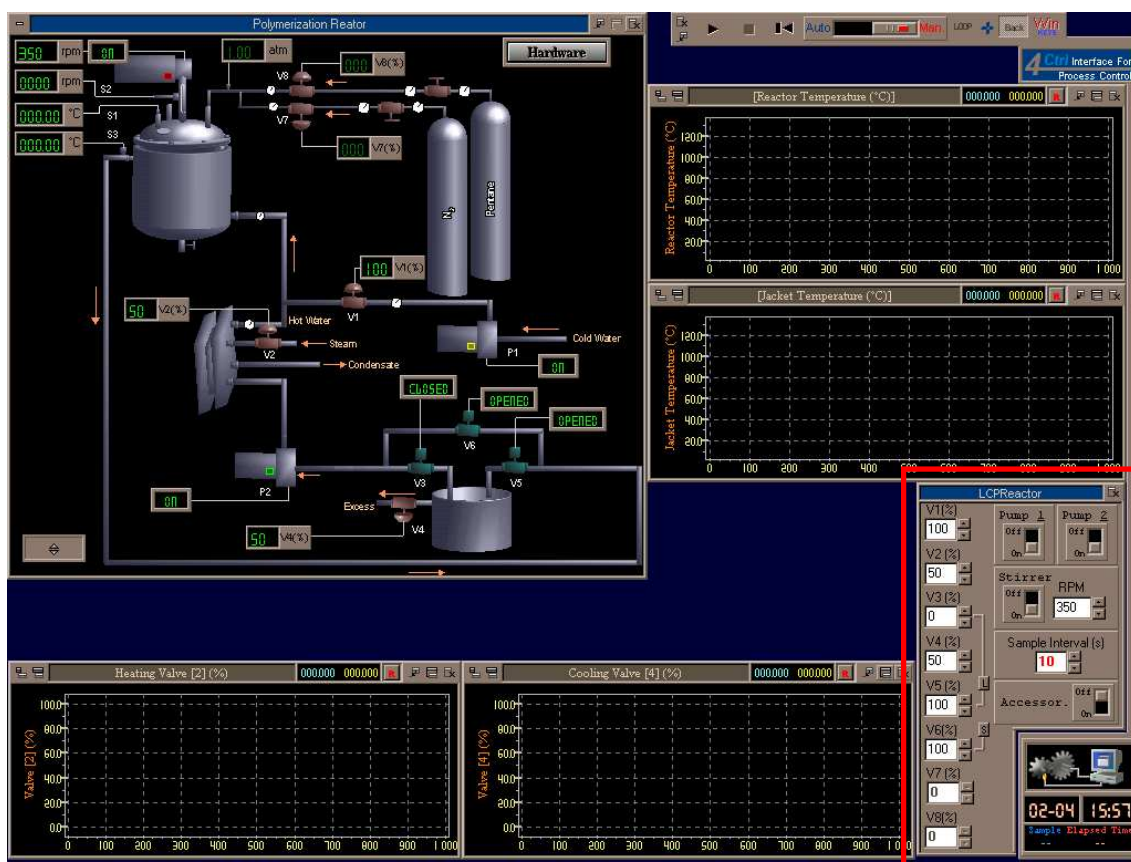


Figura 164 - O sistema de controle da unidade de polimerização.

O desenvolvimento de um *software* de controle modular exige um grande investimento de tempo na fase de prototipificação, a qual determina a flexibilidade e simplicidade para a aplicação final. De fato, o modelo de programação orientada a objetos confere flexibilidade na definição dos protótipos. Porém, a simplicidade de aplicação depende da coerência na definição das estruturas de troca de informações.

Florianópolis, 8 de dezembro de 2003.