

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FABIO SALGADO GOMES SAGAZ**

**SISTEMA BASEADO EM LÓGICA NEBULOSA APLICADO AO CONTROLE DOS  
NÍVEIS DE UM PROCESSO MULTIVARIÁVEL COM QUATRO TANQUES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Mário Cesar M. M. de Campos - Dr. ECP  
Co-orientador: Geraldo M. Pinheiro Gomes - Dr. ENSAE

Rio de Janeiro

2003

C2003

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ            CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

P123 Sagaz, Fabio Salgado Gomes.

Controlador “Fuzzy” aplicado a um processo multivariável /  
Fabio Salgado Gomes Sagaz. – Rio de Janeiro : Instituto Militar de  
Engenharia, 2003.

91 p. : il., graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de  
Junho, 2003.

1. Sintonia de controladores “fuzzy”. 2. Controle robusto. 3.  
Processo multivariável. I. Instituto Militar de Engenharia. II. Título.

CDD 629.83

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FABIO SALGADO GOMES SAGAZ**

**SISTEMA BASEADO EM LÓGICA NEBULOSA AO CONTROLE DOS NÍVEIS  
DE UM PROCESSO MULTIVARIÁVEL COM QUATRO TANQUES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Mário César Mello Massa de Campos – Dr. ECP

Co-orientador: Geraldo Magela Pinheiro Gomes – Dr. ENSAE

Aprovada em 08 de julho de 2003 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Mário César Mello Massa de Campos – Dr. ECP, do IME - Presidente

---

Prof. Geraldo Magela Pinheiro Gomes – Dr. ENSAE, do IME

---

Prof. Fabrício Bandeira Cabral – PhD, do IME

---

Prof. Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – Dr, do IME

Rio de Janeiro

2003

A Deus, aos meus pais e irmãos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Ao Instituto Militar de Engenharia, especialmente ao Departamento de Engenharia Elétrica, pela oportunidade de realizar este curso.

Aos meus pais e irmãos, que sempre me incentivaram e me motivaram em mais esta etapa de minha formação.

Especial ao professor orientador e amigo Mário César Mello Massa de Campos pelo apoio integral, dedicação, interesse e paciência, sem o qual este trabalho não teria se concretizado.

Ao professor co-orientador e amigo professor Geraldo Magela Pinheiro Gomes por todo o auxílio prestado durante a realização desta tese.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....  | 09        |
| LISTA DE TABELAS .....   | 13        |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....   | 14        |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>18</b> |
| 1.1 Introdução.....  | 18        |
| 1.2 Objetivo do trabalho.....  | 19        |
| 1.3 Desenvolvimento do trabalho.....   | 19        |
| 1.4 Organização do texto .....   | 20        |
| <b>2 INTRODUÇÃO AO CONTROLE “NEBULOSO” E SISTEMAS MULTIVARIÁVEIS .....</b>     | <b>21</b> |
| 2.1 Introdução .....   | 21        |
| 2.2 Um breve histórico .....   | 21        |
| 2.3 Teoria e exemplos .....  | 23        |
| 2.3.1 Conjuntos nebulosos .....  | 25        |
| 2.3.2 Lógica nebulosa .....  | 33        |
| 2.3.3 Controladores utilizando lógica nebulosa .....                           | 35        |
| 2.3.4 Estrutura de controladores empregando lógica nebulosa .....              | 38        |
| 2.3.5 Características de controladores nebulosos .....                         | 40        |
| 2.3.6 Aplicações de sistemas baseados na lógica nebulosa .....                 | 41        |
| 2.3.7 Exemplo de um controlador nebuloso para um processo simples (SISO) ..... | 42        |
| 2.4 Sistemas multivariáveis e a matriz RGA .....                               | 47        |
| 2.4.1 A matriz RGA (relative gain array) .....                                 | 48        |
| 2.4.2 Determinação da matriz RGA .....   | 49        |
| 2.4.3 Cálculo da matriz RGA .....  | 50        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>3</b> | <b>CONTROLE MULTIMALHA PID PARA O PROCESSO DOS QUATRO TANQUES</b> .....         | 54  |
| 3.1      | Introdução .....  | 54  |
| 3.2      | Descrição do processo dos quatro tanques .....                                  | 54  |
| 3.3      | Controlador multimalha PID para parâmetros $X_1$ e $X_2$ em 0,7 .....           | 60  |
| 3.4      | Cálculo da matriz RGA do sistema para parâmetro X em 0,7 .....                  | 61  |
| 3.5      | Controlador PID para parâmetro X em 0,3.....                                    | 64  |
| 3.6      | Cálculo da matriz RGA para X em 0,3 .....                                       | 65  |
| 3.7      | Nova estratégia de controle .....   | 68  |
| 3.8      | Conclusão.....  | 70  |
| <b>4</b> | <b>SISTEMA DOS QUATRO TANQUES UTILIZANDO CONTROLADOR NEBULOSO</b> .....         | 71  |
| 4.1      | Introdução .....  | 71  |
| 4.2      | Controlador nebuloso com parâmetro X em 0,7.....                                | 71  |
| 4.3      | Controlador nebuloso com parâmetro X em 0,3.....                                | 78  |
| 4.4      | Índices de desempenho dos controladores (ISE e ITAE).....                       | 80  |
| 4.4.1    | Robustez do controlador PID.....  | 81  |
| 4.4.2    | Robustez do controlador nebuloso.....   | 87  |
| 4.5      | Conclusão.....  | 93  |
| <b>5</b> | <b>SISTEMA DOS QUATRO TANQUES UTILIZANDO DOIS CONTROLADORES NEBULOSOS</b> ..... | 94  |
| 5.1      | Introdução .....  | 94  |
| 5.2      | Sistema Com Dois Controladores .....  | 94  |
| 5.3      | Conclusão.....  | 103 |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> .....  | 104 |
| 6.1      | Conclusões.....   | 104 |
| 6.2      | Perspectivas.....   | 105 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>106</b> |
| <b>8</b> | <b>APÊNDICES.....</b>  | <b>110</b> |
| 8.1      | APÊNDICE 1: processo dos quatro tanques montado no simulink .....  | 111        |
| 8.2      | APÊNDICE 1: estrutura do bloco “planta” com a modelagem matemática dos quatro tanques feita no matlab-simulink ..... | 112        |
| 8.3      | APÊNDICE 1: estrutura do tanque 1 feita no simulink .....  | 114        |
| 8.4      | APÊNDICE 1: estrutura do tanque 2 feita no simulink .....  | 115        |
| 8.5      | APÊNDICE 1: estrutura do tanque 3 feita no simulink .....  | 116        |
| 8.6      | APÊNDICE 1: estrutura do tanque 4 feita no simulink .....  | 117        |
| 8.7      | APÊNDICE 1: estrutura do controlador pid feita no simulink .....   | 118        |
| 8.8      | APÊNDICE 1: estrutura do controlador nebuloso feita no simulink .....  | 119        |
| 8.9      | APÊNDICE 1: estrutura do controlador nebuloso genérico feita no simulink .....                                       | 120        |



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| FIG. 2.1  | Funções de pertinência de temperatura.....   | 24 |
| FIG. 2.2  | Conjunto febril.....   | 25 |
| FIG. 2.3  | Conjunto de homens baixo, mediano e alto.....  | 26 |
| FIG. 2.4  | Exemplos de graus de pertinência de temperatura e altura.....                                      | 26 |
| FIG. 2.5  | Função indicadora de A.....  | 27 |
| FIG. 2.6  | Função de pertinência de A.....  | 28 |
| FIG. 2.7  | União.....   | 29 |
| FIG. 2.8  | Interseção.....  | 30 |
| FIG. 2.9  | Complementação.....  | 31 |
| FIG. 2.10 | Produto.....   | 32 |
| FIG. 2.11 | Diagrama de blocos de um sistema de controle.....  | 35 |
| FIG. 2.12 | Resposta de $e(t)$ .....   | 36 |
| FIG. 2.13 | Característica entrada-saída de um controlador baseado em regras de produção e sem incertezas..... | 37 |
| FIG. 2.14 | Estrutura de um controlador de lógica nebulosa.....  | 38 |
| FIG. 2.15 | Outra representação de um controlador de lógica nebulosa .....                                     | 39 |
| FIG. 2.16 | Processo com controlador nebuloso  | 42 |
| FIG. 2.17 | Funções de pertinência das variáveis $E(t)$ , $DE(t)$ e $\Delta U$                                 | 43 |
| FIG. 2.18 | Resposta dinâmica desejada da variável de processo   | 44 |
| FIG. 2.19 | Resposta do processo para o SP aplicado  | 46 |
| FIG. 2.20 | Sistema MIMO com múltiplos distúrbios.....   | 48 |
| FIG. 2.21 | Sistema 2x2.....   | 50 |
| FIG. 3.1  | Processo dos quatro tanques.....   | 56 |
| FIG. 3.2  | Processo dos quatro tanques, planta e controladores PID.....                                       | 57 |
| FIG. 3.3  | Estrutura do processo com a modelagem matemática dos quatro tanques.....                           | 58 |
| FIG. 3.4  | Estrutura do tanque 1.....   | 58 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIG. 3.5  | Estrutura do controlador multimalha PID.....  | 59 |
| FIG. 3.6  | Resposta do controlador PID para X em 0,7.....  | 61 |
| FIG. 3.7  | Entrada degrau em F1 mantendo F2 constante.....   | 62 |
| FIG. 3.8  | Gráfico de $h_1$ e $h_2$ .....  | 62 |
| FIG. 3.9  | Resposta do controlador PID para X em 0,3.....  | 64 |
| FIG. 3.10 | Estrutura do processo onde aplicamos um degrau em $F_1$ e mantemos $F_2$ constante..... | 65 |
| FIG. 3.11 | Gráfico de $h_1$ e $h_2$ para $F_1$ recebendo o degrau.....                             | 66 |
| FIG. 3.12 | Processo com pareamento trocado.....  | 68 |
| FIG. 3.13 | Resposta do processo para o parâmetro X em 0,3 com pareamento trocado.....              | 69 |
| FIG. 4.1  | Diagrama de blocos do sistema.....  | 71 |
| FIG. 4.2  | Diagrama de blocos do controlador nebuloso.....   | 72 |
| FIG. 4.3  | Funções de pertinência do erro.....   | 73 |
| FIG. 4.4  | Funções de pertinência da variação do erro.....   | 73 |
| FIG. 4.5  | Funções de pertinência de saída.....  | 74 |
| FIG. 4.6  | Resposta do controlador nebuloso com parâmetro X em 0,7.....                            | 78 |
| FIG. 4.7  | Resposta ao controlador nebuloso com parâmetro X em 0,3.....                            | 79 |
| FIG. 4.8  | Processo com pareamento trocado.....  | 79 |
| FIG. 4.9  | Resposta ao controlador nebuloso com parâmetro X em 0,3 e pareamento trocado.....       | 80 |
| FIG. 4.10 | Índice ISE1 para o PID ajustado com parâmetro X em 0,3.....                             | 82 |
| FIG. 4.11 | Índice ISE1 para o PID ajustado com parâmetro X em 0,7.....                             | 83 |
| FIG. 4.12 | Índice ISE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,3.....                              | 83 |
| FIG. 4.13 | Índice ISE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,7.....                              | 84 |
| FIG. 4.14 | Índice ITAE 1 para PID ajustado com parâmetro X em 0,3.....                             | 85 |
| FIG. 4.15 | Índice ITAE 1 para PID ajustado com parâmetro X em 0,7.....                             | 85 |
| FIG. 4.16 | Índice ITAE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,3.....                             | 86 |
| FIG. 4.17 | Índice ITAE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,7.....                             | 86 |
| FIG. 4.18 | Índice ISE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X                        |    |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
|           | em 0,3.....  | 88  |
| FIG. 4.19 | Índice ISE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7.....                         | 88  |
| FIG. 4.20 | Índice ISE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3.....                         | 89  |
| FIG. 4.21 | Índice ISE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7 .....                        | 89  |
| FIG. 4.22 | Índice ITAE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3 .....                       | 90  |
| FIG. 4.23 | Índice ITAE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7 .....                       | 90  |
| FIG. 4.24 | Índice ITAE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3 .....                       | 91  |
| FIG. 4.25 | Índice ITAE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7 .....                       | 91  |
| FIG. 4.26 | Comparação de robustez entre os controladores PID e nebuloso.....                                    | 93  |
| FIG. 5.1  | Esquema do processo com dois controladores nebulosos.....  | 94  |
| FIG. 5.2  | Esquema do controlador nebuloso genérico com os dois controladores nebulosos.....                    | 95  |
| FIG. 5.3  | Função de pertinência do parâmetro X.....  | 96  |
| FIG. 5.4  | Resposta do controlador genérico para parâmetro X em 0,3 e depois em 0,7.....                        | 98  |
| FIG. 5.5  | Resposta do controlador genérico usando o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,3..... | 99  |
| FIG. 5.6  | Resposta do controlador genérico para parâmetro X em 0,7 e depois em 0,3.....                        | 100 |
| FIG. 5.7  | Resposta do controlador genérico usando o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,7..... | 101 |
| FIG. 5.8  | Esquema do controlador nebuloso genérico utilizando vários controladores nebulosos.....              | 102 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| FIG. 6.1 | Esquema do controlador nebuloso genérico utilizando vários controladores PID's.....           | 105 |
| FIG. 8.1 | Processo dos quatro tanques montado no simulink conforme diagrama de blocos da FIG. 3.2.....  | 111 |
| FIG. 8.2 | Estrutura do processo com a modelagem matemática dos quatro tanques.....                      | 112 |
| FIG. 8.3 | Estrutura do tanque 1.....  | 114 |
| FIG. 8.4 | Estrutura do tanque 2.....  | 115 |
| FIG. 8.5 | Estrutura do tanque 3.....  | 116 |
| FIG. 8.6 | Estrutura do tanque 4.....  | 117 |
| FIG. 8.7 | Estrutura do controlador PID.....   | 118 |
| FIG. 8.8 | Controlador nebuloso.....   | 119 |
| FIG. 8.9 | Esquema do controlador genérico com os dois controladores nebulosos e o sistema nebuloso..... | 120 |

## LISTA DE TABELAS

|          |  |    |
|----------|--|----|
| TAB. 2.1 | Regras do controlador nebuloso   | 45 |
| TAB. 2.2 | Valores de $\lambda$ .....   | 53 |
| TAB. 4.1 | Regras do controlador nebuloso.....  | 76 |
| TAB. 4.2 | Valores ISE E ITAE para o PID com parâmetro X em 0,3.....                      | 81 |
| TAB. 4.3 | valores ISE E ITAE para o PID com parâmetro X em 0,7.....                      | 81 |
| TAB. 4.4 | Valores ISE E ITAE para o controlador nebuloso com parâmetro X em<br>0,3 ..... | 87 |
| TAB. 4.5 | valores ISE E ITAE para o controlador nebuloso com parâmetro X em<br>0,7 ..... | 87 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

PID – Controlador Proporcional Integral e Derivativo

SISO – Single-Input Single-Output

MIMO – Multiple-Input Multiple-Output

RGA – Relative Gain Array

ISE – Integral square error

ITAE – Integral time absolute error

### SÍMBOLOS

$\cup$  – União

$\cap$  – Interseção

$\Delta$  – Variação

$\rightarrow$  – Então

$\forall$  – Todo e qualquer

$\wedge$  – E

$\vee$  – Ou

$\Lambda$  – Matriz de ganhos relativos

$X_i$  – Válvula de três vias do ramo i

$F_i$  – Vazão do ramo i

$h_i$  – Nível do tanque i

$\frac{de}{dt}$  – Derivada de e no tempo t

$\int edt$  – Integral de e no tempo t

$\frac{dh_i}{dt}$  – Variação do nível do tanque i no tempo t

$\max$  – Notação de máximo

$\min$  – Notação de mínimo

$\neg$  – Negação

$A^C$  – Complemento

## RESUMO

Os sistemas de controle nebulosos são atualmente ferramentas importantes para a solução de problemas complexos de controle em plantas industriais. O controlador nebuloso tem como uma de suas características, a capacidade de incorporar o conhecimento de operadores e engenheiros na estratégia de controle, valorizando desta forma estas informações.

O objetivo deste trabalho é estudar a possibilidade de usar conceitos da lógica nebulosa para o desenvolvimento de uma metodologia de controle a ser aplicada em um processo multivariável, o processo dos quatro tanques.

Neste trabalho apresenta-se inicialmente conceitos introdutórios da teoria de lógica nebulosa assim como o modelo de um controlador nebuloso.

Apresenta-se em seguida o processo dos quatro tanques. É desenvolvido um controlador PID capaz de controlar este processo.

Em seguida é desenvolvido um controlador nebuloso para controle do processo dos quatro tanques. São então analisados os desempenhos de ambos os controladores.

Finalmente, mostra-se a possibilidade de se usar controladores específicos, ajustados para determinadas condições, que podem ser utilizados conjuntamente para obtenção de um controlador genérico, capaz de controlar o processo em condições de operação variada.



## ABSTRACT

At the present moment, Fuzzy Control Systems are important instruments for the solution of complex problems in industrial plants. The Fuzzy controller has as one of its characteristics the capacity of incorporating the valuable knowledge of operators and engineers.

The purpose of this dissertation is to study the possibility of using the concepts of fuzzy logic for the development of a method for control of a multivariable process, the quadruple tank process.

Initially, an introduction to the theory of fuzzy logic is presented, as well as the basic model of a fuzzy controller. Then, the quadruple tank process is presented, where a PID controller controls the entire process. A fuzzy controller is designed to control the quadruple tank process. Then, the performances of both controllers are analyzed and compared. Finally, specific controllers adjustable for different conditions are presented, they can be used to control the process at various conditions of operation.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, as malhas de controle PID tem sido utilizadas na maioria dos processos automatizados presentes no meio industrial. Entre os motivos da utilização de estratégias convencionais de controle pode-se mencionar: a simplicidade, a robustez, o número reduzido de parâmetros a serem configurados, os conhecimentos intuitivos sobre o desempenho destas estratégias de controle e um requerimento mínimo de conhecimento matemático e técnico. As limitações destas técnicas de controle estão relacionadas com o número reduzido de graus de liberdade que elas oferecem (COELHO, 2001).

Entretanto, nem todos os processos industriais podem ser controlados de forma apropriada com as malhas de controle PID. Muitos processos multivariáveis com acoplamento entre as variáveis, não-lineares e variantes no tempo necessitam de um tratamento diferenciado. Esse tratamento diferenciado na indústria inclui a utilização de algoritmos de controle preditivo, adaptativo, robusto e inteligente, principalmente na indústria química e aeroespacial (COELHO, 2001).

A teoria de subconjuntos nebulosos nasceu da constatação de que quando a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para concluir fatos e tomar decisões que sejam ao mesmo tempo precisos e significativos tende a diminuir até um limite a partir do qual precisão e relevância passam a ser características quase excludentes (ZADEH, 1973).

Desta forma, esta teoria de subconjuntos nebulosos tem como objetivo criar um sistema ou um ambiente que permita representar conhecimentos que são complexos, incertos, contraditórios e incompletos de uma maneira sistemática e lógica. Os sistemas nebulosos aliam a flexibilidade do tipo de representação simbólica dos conhecimentos (normais dos sistemas especialistas convencionais) com o poder dos cálculos numéricos das técnicas que inspiram sistemas biológicos (redes de neurônios) (CAMPOS, 2000).

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

A motivação deste trabalho é estudar a possibilidade de usar a lógica nebulosa para o desenvolvimento de um método de controle a ser aplicado em um processo multivariável. Para tal foi escolhido o modelo de uma planta do tipo quatro tanques.

## 1.3 METODOLOGIA

O processo escolhido para estudo, foi o processo dos quatro tanques, que vem sendo amplamente utilizado em estudos de processos industriais multivariáveis com grande variação de dinâmica, pela sua complexidade devido a ser um processo com interação variável entre as variáveis manipuladas e controladas e pela sua não linearidade. Pode-se citar além do artigo de JOHANSSON (2000), que fez o primeiro estudo com este processo, o trabalho com modelo de controladores preditivos (HENRIKSSON et. al. , 2003), linearização de processos (GOSMANN, 2002), comparação entre formulações de filtro de Kalman (MARCON, 2002) e está sendo também utilizado como plataforma de ensino de controle multivariável em algumas universidades (GATZKE et. al., 2000, DOYLE et. al., 2000, MEADOWS et. al., 2000).

Primeiramente, conhecendo o processo a ser controlado, são desenvolvidos controladores PIDs capazes de atingir o desempenho desejado para duas diferentes condições de operação do processo. As condições de operação do processo para o projeto dos controladores PIDs correspondem a situações de alta e baixa interação entre as malhas.

Os controladores PIDs anteriormente projetados, são substituídos por controladores nebulosos também capazes de atingir o desempenho desejado para as duas diferentes condições de operação do processo escolhidas anteriormente.

São então analisadas as degradações de desempenho frente a variações de condições de operação do sistema.

É desenvolvida então uma forma de manter o processo com desempenho estável frente às diferentes condições testadas, desenvolvendo para tal um controlador denominado de “sistema nebuloso”, que é capaz de “chavear” entre controladores previamente projetados.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2 apresenta-se de forma sucinta, alguns conceitos da lógica nebulosa, mostra-se a estrutura de um controlador empregando lógica nebulosa, suas características e suas aplicabilidades. Introduce-se ainda de forma breve o conceito de sistema multivariáveis e um estudo do grau de interação entre as malhas de controle de sistemas multivariáveis através da matriz de ganhos relativos (RGA).

No capítulo 3 apresenta-se o processo dos quatro tanques, que será utilizado como base para o estudo dos controladores. É desenvolvido um controlador PID para controlar cada ramo deste processo, com duas diferentes condições de operação, uma com alta e outra com baixa interação entre as malhas. É calculada a matriz RGA para estas condições de operação.

No capítulo 4 é desenvolvido um controlador nebuloso para substituir o controlador PID desenvolvido no capítulo 3. Apresenta-se ainda uma comparação de desempenho dos controladores frente à variação das condições de operação do processo.

No capítulo 5 apresenta-se um controlador nebuloso que combina os dois controladores desenvolvidos no capítulo 4 e que pode controlar o processo para as duas condições de operação empregadas, com alta e baixa interação entre as malhas.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e perspectivas deste trabalho de dissertação.

## 2 INTRODUÇÃO AO CONTROLE “NEBULOSO” E SISTEMAS MULTIVARIÁVEIS

### 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma introdução ao controlador “nebuloso” e aos sistemas multivariáveis que são os principais assuntos necessários ao desenvolvimento desta dissertação. Inicialmente, será feito um breve histórico do controle nebuloso, sua teoria, alguns conceitos e algumas aplicações. Em seguida serão introduzidos alguns aspectos sobre sistemas multivariáveis e sobre o cálculo da matriz RGA (Relative Gain Array).

### 2.2 UM BREVE HISTÓRICO

Aristóteles (384-322 a.C.) foi o primeiro estudioso a fazer uma representação do processo do pensamento, através da sistematização do raciocínio lógico. A lógica aristotélica permaneceu como Aristóteles a estruturou durante vários séculos até o surgimento das lógicas não clássicas no século XIX com A. De Morgan (1806-1871), Boole (1815-1864), G. Frege (1848-1925) e Bertrand Russell (1872-1970) (CAMPOS, 2000).

G. Leibniz (1646-1716), Saccheri (1667-1733) e J. H. Lambert (1728-1777) fizeram tentativas de criar uma teoria matemática associada à lógica, mas foi George Boole que estruturou a lógica matemática.

As idéias de Boole foram publicadas no livro *Mathematical Analysis of Logic*, no qual demonstra-se que a lógica pode ser manipulada algebricamente e que os resultados das operações lógicas podem ser obtidos através da utilização de técnicas matemáticas. Essa obra deu suporte para a lógica matemática ou simbólica utilizada em várias áreas, como nos ramos da computação, eletricidade e eletrônica (CAMPOS, 2000).

As idéias de Boole representaram um grande passo na ciência da computação, no sentido de auxiliar na simulação e implementação do processo do raciocínio na máquina. Segundo Boole: "O que nós temos que examinar são as leis de uma das mais importantes faculdades mentais. A matemática que temos que construir é a matemática do intelecto humano". No século XX surgiram vários outros princípios da

lógica, que auxiliaram a construção de programas de computador, como por exemplo, a teoria da demonstração por refutação de Herbrand (1930), o princípio da resolução de Robinson (1965) e a SLD resolution de Kowalski (1971) (CAMPOS, 2000).

A lógica nebulosa foi primeiramente proposta por Lotfi A. Zadeh da Universidade da Califórnia em Berkeley em um artigo de 1965 (JÚNIOR e AGUIAR, 1999). Ele refinou suas idéias em um outro artigo de 1973 onde foi introduzido o conceito de "variáveis lingüísticas" (YONEYAMA, 2000). Outras pesquisas seguiram, até a primeira aplicação industrial - em uma fábrica de cimento na Dinamarca - surgindo em 1975 (CAMPOS, 2000).

O conceito da lógica "nebulosa" decorreu da observação de Zadeh de que as ferramentas lógicas disponíveis até a década de 60 eram incapazes de modelar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional clássica ou booleana (ZADEH, 1965).

Em 1974, o Prof. Mamdani, do Queen Mary College, Universidade de Londres, aplicou os conceitos "nebulosos" para controlar uma máquina a vapor (YONEYAMA, 2000).

Vieram em seguida, várias outras aplicações, destacando-se, por exemplo, os controladores nebulosos de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens (MENDEL, 1995).

Os japoneses têm mostrado um grande interesse em sistemas nebulosos, como por exemplo, Seiji Yasunobu e Soji Miyamoto da Hitachi, que em 1985 apresentaram simulações demonstrando a superioridade de sistemas de controle nebulosos para a estrada de ferro de Sendai; suas idéias foram adotadas e sistemas nebulosos foram usados para controle de aceleração, frenagem, e parada quando a linha foi inaugurada em 1987 (COELHO, 2001).

Outro evento em 1987 ajudou a promover o interesse em sistemas nebuloso: durante um encontro internacional de pesquisadores da lógica nebulosa em Tokyo, naquele ano, Takeshi Yamakawa demonstrou o bom desempenho de um controle nebuloso em um experimento de um pêndulo invertido - um problema clássico de

controle em que um veículo tenta manter uma haste montada no seu topo na posição vertical com movimentos de ida e volta (COELHO, 2001).

Seguindo semelhantes demonstrações, os japoneses se interessaram cada vez mais por sistemas nebulosos, desenvolvendo tanto aplicações industriais como aplicações para consumo; em 1988 eles criaram o Laboratório Internacional de Engenharia Nebulosa (LIFE), uma cooperativa que compreendia 48 companhias para pesquisa em sistemas nebulosos (COELHO, 2001).

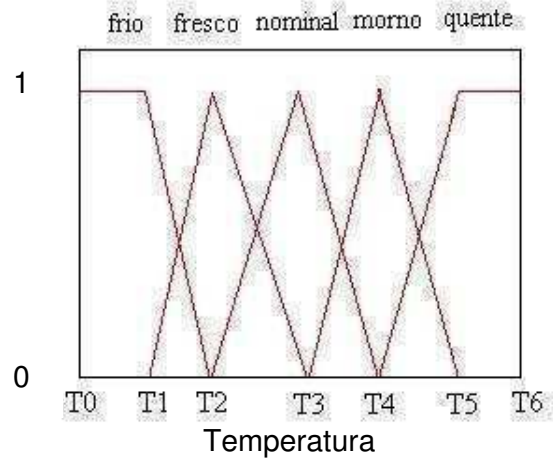
## 2.3 TEORIA E EXEMPLOS

A lógica “nebulosa” pretende modelar conhecimentos que não se resumem apenas a um “sim” ou um “não”, mas que também tenha decisões “abstratas” ou subjetivas, do tipo “um pouco mais”, “talvez sim”, etc. (JÚNIOR e AGUIAR, 1999).

Por exemplo, é aquele homem alto ou baixo? A taxa de risco para aquele empreendimento é grande ou pequena? Um sim ou um não como resposta a estas questões é, na maioria das vezes, incompleta. Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. De forma mais objetiva e preliminar, podemos definir lógica “nebulosa” como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores.

Por exemplo, a seguir será analisado um sistema de frenagem, dirigido por um microcontrolador, que toma as decisões baseado na temperatura do freio, velocidade, e outras variáveis do sistema. A variável “temperatura” neste sistema pode ser dividida dentro de uma faixa de “estados”: “frio”, “fresco”, “moderado”, “morno”, “quente”, “muito quente”. Contudo, a transição de um estado para o próximo é difícil de fixar; um limiar arbitrário deve ser ajustado para dividir o “morno” do “quente”, mas isso resultaria em uma mudança descontínua quando o valor de entrada passasse pelo limiar.

Outra solução é criar os estados “nebulosos”, que permitem uma mudança gradual de um estado para o outro. Poderia-se definir a temperatura de entrada usando funções características como na FIG. 2.1.



**FIG. 2.1 Funções de características de temperatura**

Desta forma, o estado da variável de entrada não mais salta abruptamente de um estado para o próximo; ao invés disso ele perde gradualmente “valor” em um estado enquanto vai ganhando “valor” no próximo estado. O “valor verdadeiro” da temperatura do freio estará quase sempre em algum ponto entre duas funções consecutivas: 0,6 nominal e 0,4 morno, ou 0,7 nominal e 0,3 fresco, e assim por diante.

As variáveis de entrada em um sistema de controle nebuloso são em geral mapeadas dentro de conjuntos de funções características como será visto no próximo item deste capítulo - o processo de conversão de um valor de entrada em um valor nebuloso é chamado de “codificação”. Note que um sistema de controle pode ter tipos de entradas binárias (on/off) junto com entradas analógicas, e tais entradas (on/off) terão sempre um valor verdadeiro igual a 1 ou 0. Mas tais entradas binárias são apenas um caso simplificado de uma variável nebulosa, logo o sistema pode utilizá-las sem dificuldade.

Determinando o mapeamento das variáveis de entrada com as funções características, o sistema pode então tomar decisões com as regras:

SE {temperatura do freio é morna} E {velocidade é não muito rápida} ENTÃO {pressão do freio deve ser ligeiramente reduzida}.

Onde, neste caso, as duas variáveis de entrada são “temperatura do freio” e “velocidade”. A variável de saída, “pressão do freio”, é semelhantemente gerada a



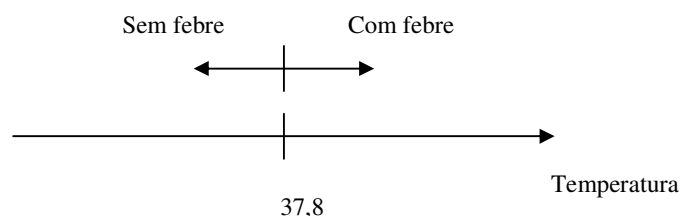
partir de conjuntos nebulosos que podem ter valores como: "ligeiramente reduzido", "ligeiramente acrescido", e assim por diante.

Portanto, a decisão é baseada em um *conjunto* de regras: *todas* as regras que aplicamos são invocadas, usando as funções características e os valores verdadeiros obtidos das entradas, para determinar o resultado da regra. As saídas são mapeadas dentro de suas funções características e depois estes resultados são combinados para gerar uma resposta específica, por exemplo, a pressão do freio. Este procedimento é conhecido como "decodificação". A combinação de operações nebulosas e regras descrevem um sistema nebuloso.

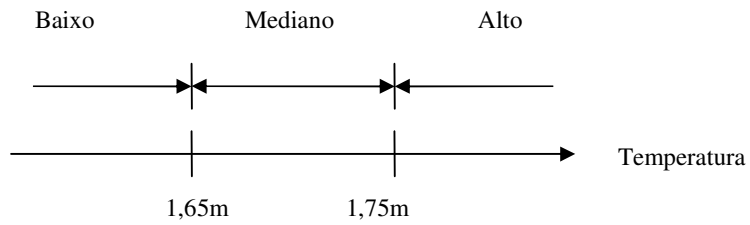
A seguir serão detalhados estes conceitos de sistemas nebulosos.

### 2.3.1 CONJUNTOS NEBULOSOS

Um conjunto é uma coleção de objetos. Na teoria clássica de conjuntos, um objeto possui apenas duas possibilidades quanto a sua relação com um conjunto, ou seja, um dado objeto é, ou não é, um elemento do conjunto. Na teoria de conjuntos nebulosos, um objeto possui variados graus de pertinência. Podemos ilustrar a utilidade de tal tipo de teoria examinando exemplos do dia-a-dia. Na teoria clássica de conjuntos, o paciente é dito estar com febre se a sua temperatura ultrapassar 37,8 °C. Assim, alguém que tenha 37,7 °C não pertence ao conjunto de pacientes febris, ver a FIG. 2.2. Também, homens com alturas entre 1,65 m e 1,75 m são considerados de estatura mediana e, acima de 1,75 m de estatura alta. Nestas condições, 1,76 m é a estatura de um homem alto, mas com 1,74 m é a de um homem mediano, ver a FIG. 2.3.

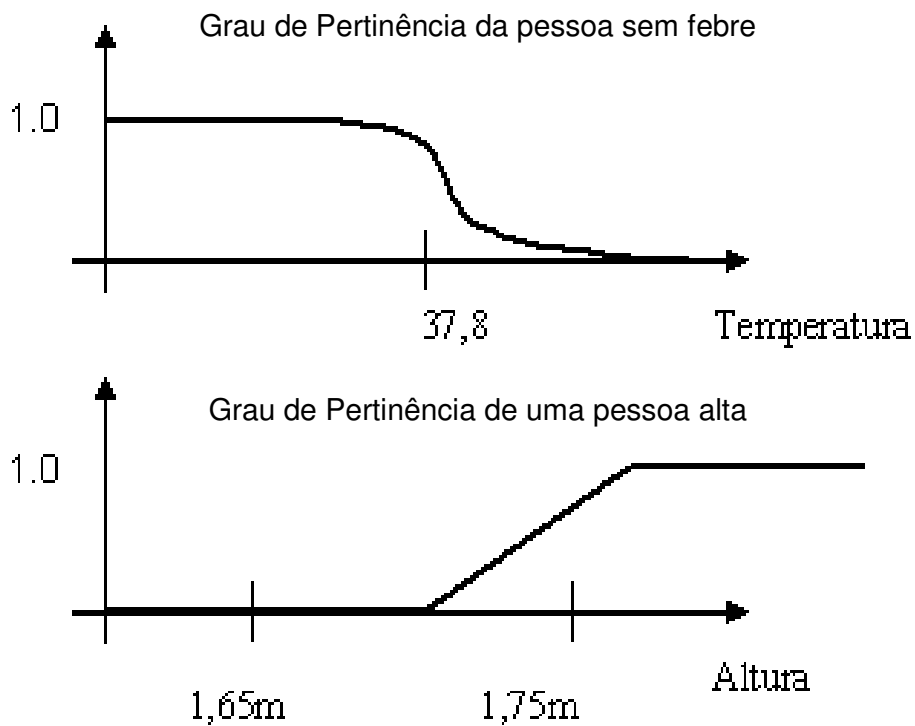


**FIG. 2.2 Conjunto febril**



**FIG. 2.3 Conjunto de homens baixo, mediano e alto**

Por outro lado, usando o conceito de conjuntos nebulosos, as incertezas quanto ao que seria um estado febril (ou ao que seria alto) ficariam representados por um grau de pertinência, como demonstrado na FIG. 2.4.



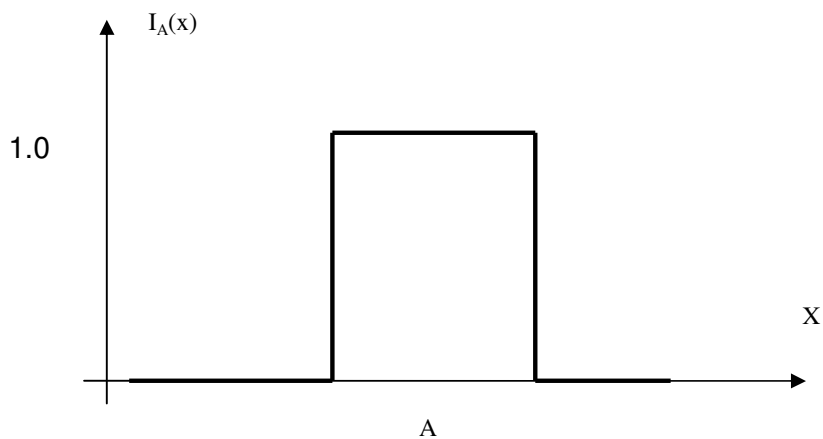
**FIG. 2.4 Exemplos de graus de pertinência de temperatura e altura**

Verifica-se que a transição dos graus de pertinência demonstrados na FIG. 2.4 são suaves. Tanto a transição de uma pessoa sem febre para com febre, quanto de uma pessoa mediana para alta, não ocorre de forma abrupta, o seu estado varia gradativamente de um estado para outro.

A formalização do conceito de conjuntos nebulosos pode ser obtida estendendo a teoria clássica de conjuntos. Assim, na teoria clássica, um conjunto pode ser caracterizado pela sua função característica, ou seja, dado um conjunto A no universo X, define-se  $I_A(x):X \rightarrow (0,1)$  por

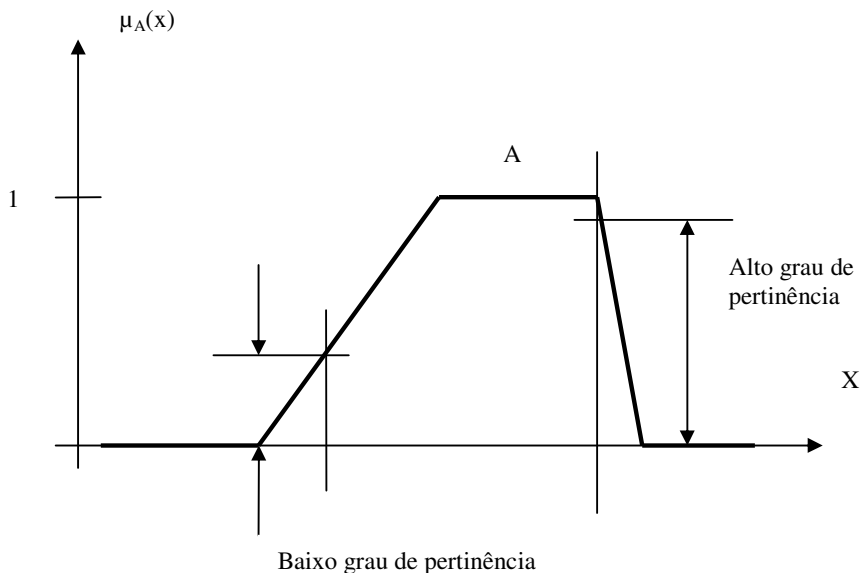
$$I_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Se X for um conjunto  $R^+$  e A um intervalo fechado, a função indicadora de A assume o aspecto ilustrado na FIG. 2.5 abaixo:



**FIG. 2.5 Função indicadora de A**

Portanto, um conjunto clássico pode ser representado como  $A = \{x \in X | I_A(x) = 1\}$ , ou abreviadamente,  $A \equiv \{x, I_A\}$ . De forma análoga, os conjuntos nebulosos são definidos por uma função  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$  conhecida como a função de pertinência, que expressa o quanto um dado elemento X pertence a A, ver a FIG. 2.6.



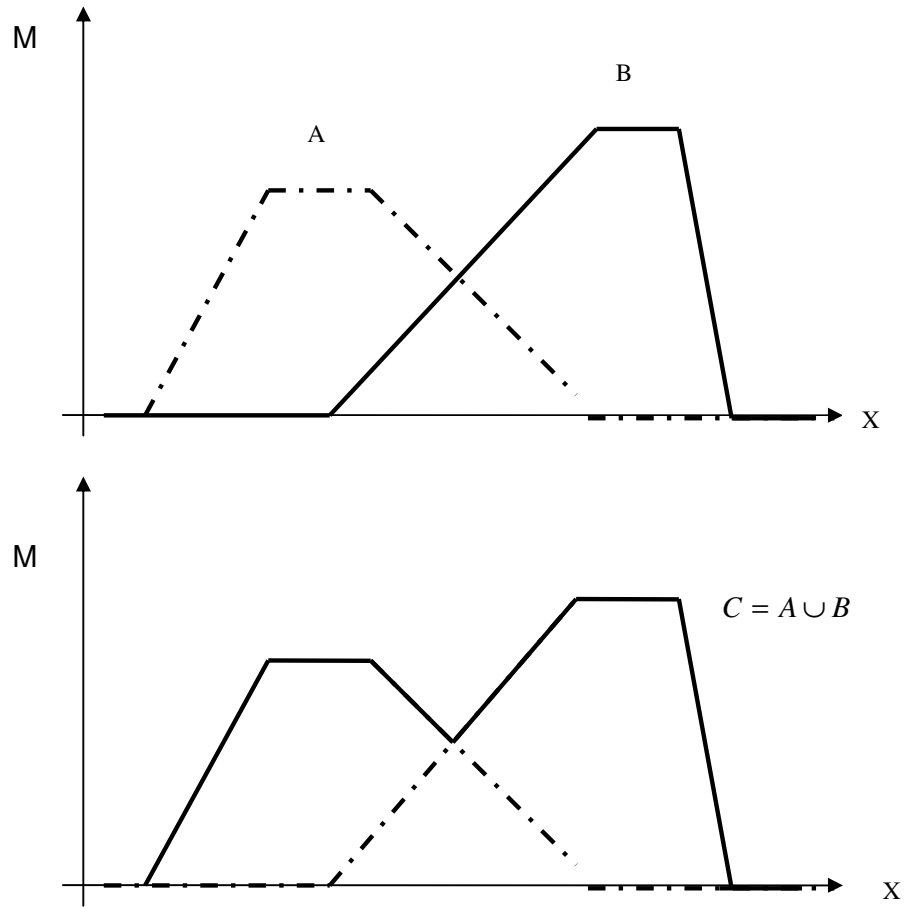
**FIG. 2.6 Função de pertinência de A**

A teoria de conjuntos nebulosos busca, portanto, traduzir em termos formais a informação imprecisa que ocorre de maneira natural na representação dos fenômenos da natureza, como descrito por seres humanos utilizando uma linguagem corriqueira.

Na teoria clássica de conjuntos, quando um elemento  $x$  pertence a um conjunto  $A$  ou um conjunto  $B$ , denota-se que  $x \in A \cup B$ , diz-se que  $x$  pertence a  $A$  união com  $B$ . Quando um elemento  $x$  pertence simultaneamente aos conjuntos  $A$  e  $B$ , denota-se que  $x \in A \cap B$ , diz-se que  $x$  pertence a  $A$  interseção com  $B$ . Também no caso de conjuntos nebulosos deseja-se fazer associações semânticas análogas e que resultariam em expressões do tipo  $(\alpha \vee \beta), (\alpha \wedge \beta), (\neg \alpha)$ . Portanto, necessita-se que sejam definidas, para conjuntos nebulosos, as expressões com conjuntos:  $A \cup B, A \cap B$  e  $A^c$ .

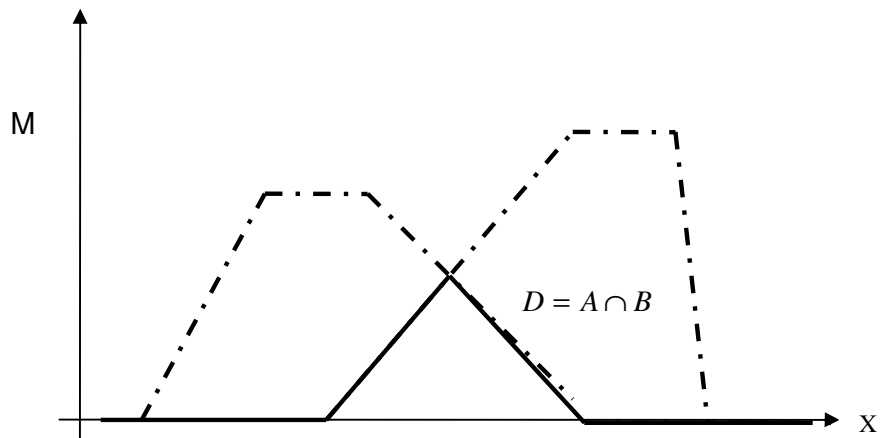
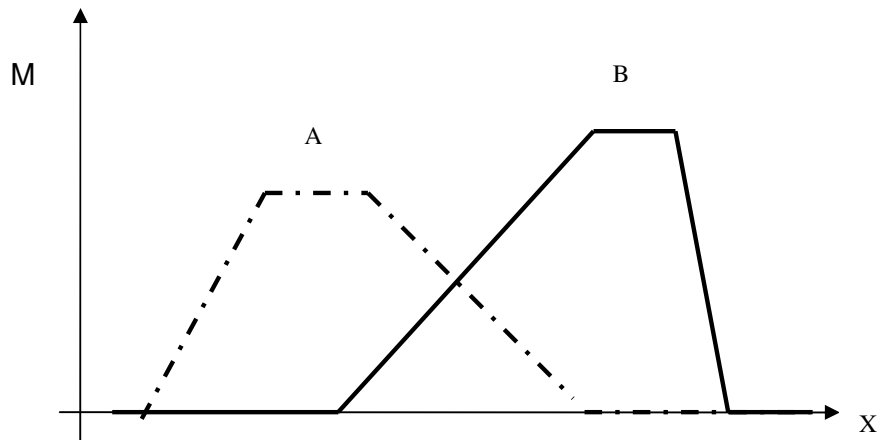
Dados conjuntos nebulosos  $A$  e  $B$  sobre um universo  $X$  e caracterizados pelas funções de pertinência  $\mu_A$  e  $\mu_B$ , podem ser definidas as seguintes operações:

- a) União: o conjunto nebuloso  $C = A \cup B$  pode ser caracterizado pela função de pertinência:  $\forall x \in X, \mu_c(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ , ver FIG. 2.7.



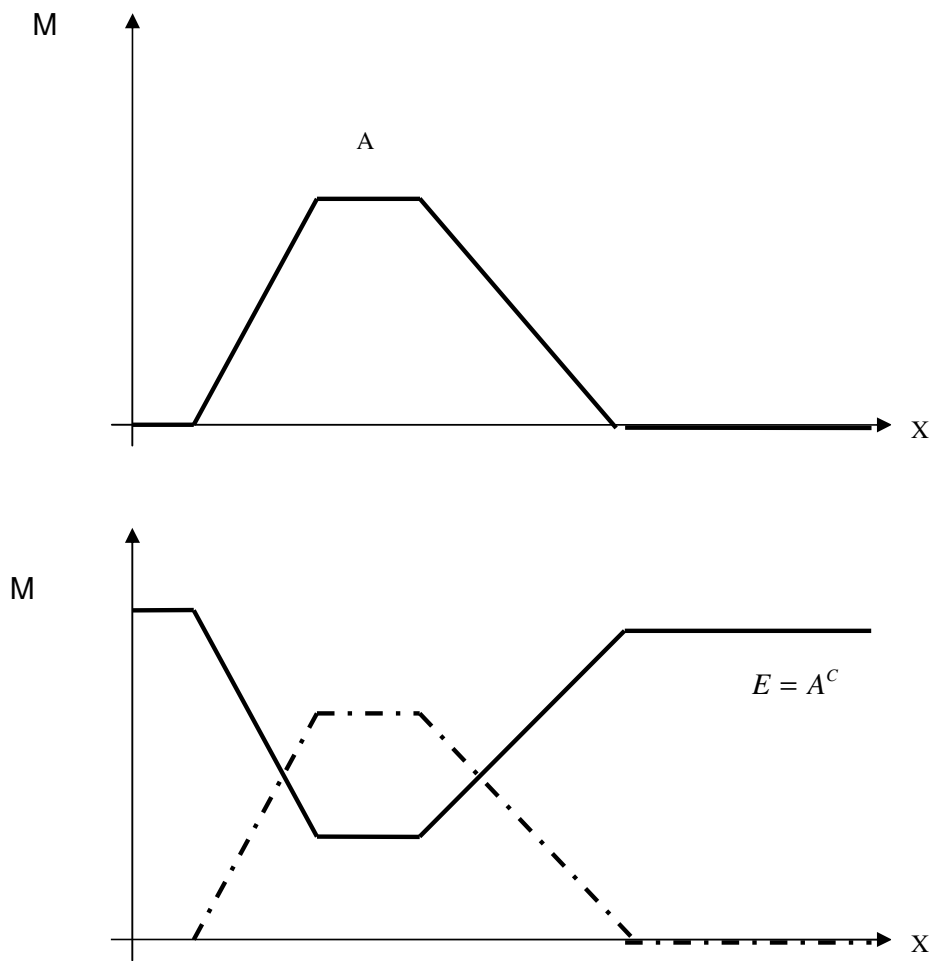
**FIG. 2.7 União**

b) Interseção : o conjunto  $D = A \cap B$  pode ser caracterizado pela função de pertinência:  $\forall x \in X, \mu_D(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ , ver FIG. 2.8.



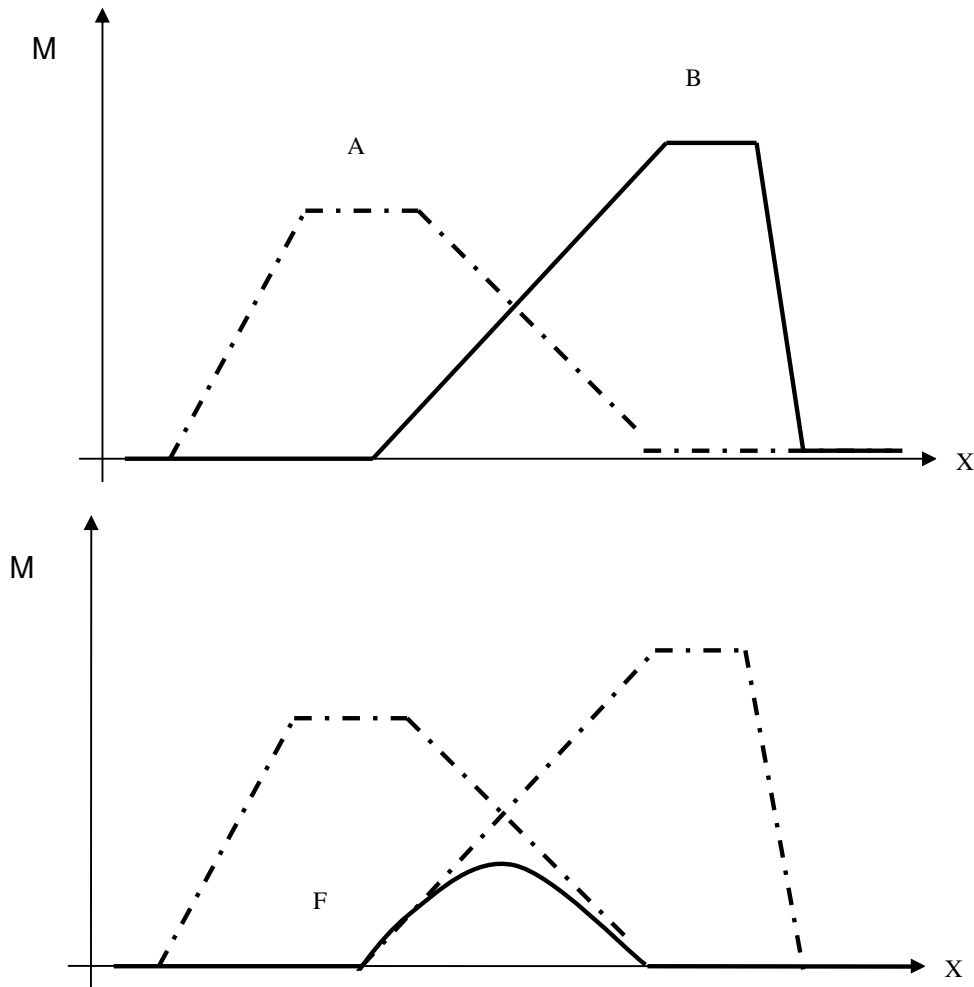
**FIG. 2.8 Interseção**

- c) Complementação: o conjunto  $E=A^c$ , diz-se que E é o complemento de A, pode ser caracterizado pela função de pertinência:  $\forall x \in X, \mu_E(x) = 1 - \mu_A(x)$ , ver FIG. 2.9. Onde E é o complemento do conjunto A.



**FIG. 2.9 Complementação**

- d) Produto Cartesiano: o conjunto  $F = A \times B$  pode ser caracterizado pela função de pertinência:  $\forall x \in X, \mu_F(x) = \mu_A(x)\mu_B(x)$ , ver a FIG. 2.10.



**FIG. 2.10 Produto**

No caso particular de  $\mu_A$  e  $\mu_B$  serem idênticas a  $I_A(x)$  e  $I_B(x)$ , respectivamente, as operações com conjuntos nebulosos representam as operações clássicas com conjuntos (YONEYAMA, 2000).

Pode-se verificar que as operações com conjuntos nebulosos satisfazem as seguintes propriedades: (YONEYAMA, 2000, p. 72-73)

- a)  $(A^c)^c = A$ ; Involução
- b)  $(A \cap B)^c = A^c \cup B^c$ ; De Morgan
- c)  $(A \cup B)^c = A^c \cap B^c$ ; De Morgan



- d)  $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ ; Distributividade da  $\cap$
- e)  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ ; Distributividade da  $\cup$
- f)  $(A \cap B) \cup A = A$ ; Absorção
- g)  $(A \cup B) \cap A = A$ ; Absorção
- h)  $A \cup A = A$ ; Idempotência
- i)  $A \cap A = A$ ; Idempotência

Definindo-se  $\mu_X(x)=1$  para  $\forall x \in X$  e  $\mu_\emptyset(x)=0$  para  $\forall x \in X$ , tem-se ainda as propriedades (YONEYAMA, 2000);

- j)  $A \cap \emptyset = \emptyset$
- k)  $A \cap X = A$
- l)  $A \cup \emptyset = A$
- m)  $A \cup X = X$

Atentar, porém, que para conjuntos nebulosos algumas operações legítimas com conjuntos clássicos, não são necessariamente válidas (YONEYAMA, 2000) (CAMPOS, 2000):

- n)  $A \cup A^c \neq X$
- o)  $A \cap A^c \neq \emptyset$ ; não vale o princípio da exclusão

### 2.3.2 LÓGICA NEBULOSA

A relação entre subconjuntos nebulosos mostra as ligações imprecisas ou graduais entre os elementos destes subconjuntos (ZADEH, 1973).

Um sistema dinâmico pode ser interpretado como uma transformação entre entradas e saídas. No caso de um sistema nebuloso, estas transformações são definidas entre os subconjuntos nebulosos dos diferentes domínios das variáveis de entradas e saídas através de uma implicação lingüística, do tipo (PADILHA, 2001):

$A \Rightarrow B$ , isto é, **SE**  $\{A(u)\}$  **ENTÃO**  $\{B(v)\}$

Um algoritmo nebuloso é composto de **N** regras lingüísticas:

$R_1$ : [**SE**  $\{A_1(u)\}$  **ENTÃO**  $\{B_1(v)\}$ ]

$R_2$ : [**SE**  $\{A_2(u)\}$  **ENTÃO**  $\{B_2(v)\}$ ]

:

$R_N$ : [**SE**  $\{A_N(u)\}$  **ENTÃO**  $\{B_N(v)\}$ ]

Esta forma de modelo nebuloso é conhecida como modelo do tipo “Mandani” (HELLENDONRN e DRIANKOV, 1997).

A relação nebulosa **R** para este algoritmo tem função de pertinência  $\mu_R(u,v)$ , definida, por exemplo, utilizando operadores “min” e “max” em um subconjunto nebuloso do produto cartesiano  $\{A_i \times B_i\}$  de função de pertinência igual a (PADILHA, 2001):

$$\mu_R(u,v) = \bigcup_{i=1, \dots, N} \{\min(\mu_{A_i}(u), \mu_{B_i}(v))\}$$

$$\mu_R(u,v) = \max_{i=1, \dots, N} \{\min(\mu_{A_i}(u), \mu_{B_i}(v))\}$$

A composição de duas relações nebulosas  $R_1$  entre X e Y ( $X \times Y$ ) e  $R_2$  entre Y e Z ( $Y \times Z$ ) é uma relação nebulosa  $R = R_1 \circ R_2$  entre X e Z ( $X \times Z$ ) com função de pertinência definida utilizando operadores “min” e “max” como:

$$\mu_R(x,z) = \sup \{\min(\mu_{R_1}(x,y), \mu_{R_2}(y,z))\} \Rightarrow (x,z) \in X \times Z \text{ e } y \in Y$$

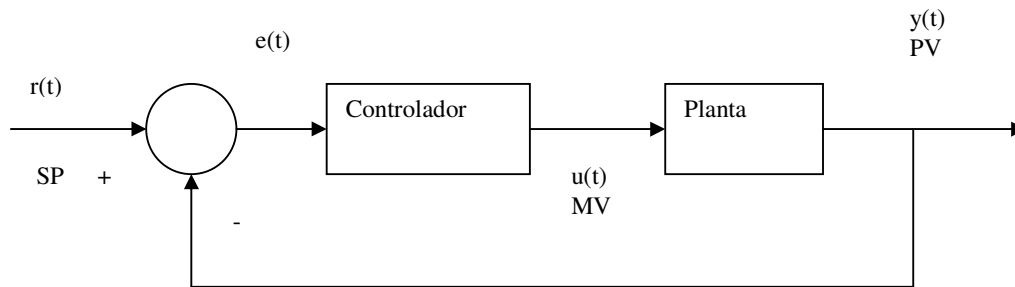
$$\mu_R(x,z) = \max \{\min(\mu_{R_1}(x,y), \mu_{R_2}(y,z))\}$$

A lógica nebulosa permite um tratamento mais flexível dos conhecimentos do que a lógica clássica.

Por exemplo, se existir uma regra da forma “**SE**  $\{V \text{ é } A\}$  **ENTÃO**  $\{W \text{ é } B\}$ ”; e se uma medida ou sensor indicar que **V** está próximo de **A**, isto é, **V** é **A'**; o raciocínio nebuloso conclui que **W** também deve estar próximo de **B**, ou seja, **W** é **B'**.

### 2.3.3 CONTROLADORES UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA

O problema típico de controle consiste em obter, a partir de um certo conhecimento da planta, uma lei de controle que atenda as especificações desejadas. A FIG. 2.11 mostra um diagrama de blocos de um sistema de controle.



**FIG. 2.11 Diagrama de blocos de um sistema de controle**

Onde:

MV – variável manipulada

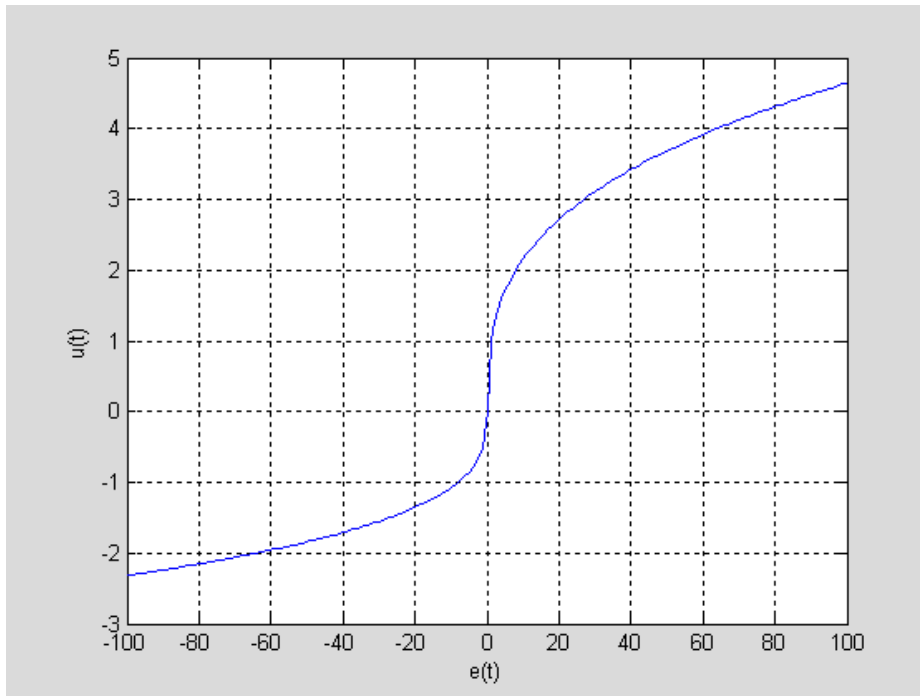
PV – variável do processo

SP – setpoint

Para efeito de ilustração são mostrados a seguir três tipos possíveis de controladores que poderiam ser empregados:

a) controlador baseado em equação: (YONEYAMA, 2000, p.77)

$u(t) = \sqrt[3]{e(t)}$ , cuja resposta está representada na FIG. 2.12. A saída  $u(t)$  do controlador é função do erro ( $e(t)$ ).



**FIG. 2.12 Resposta de e(t)**

b) controlador baseado em regras de produção não nebulosas: (YONEYAMA, 2000, p.78)

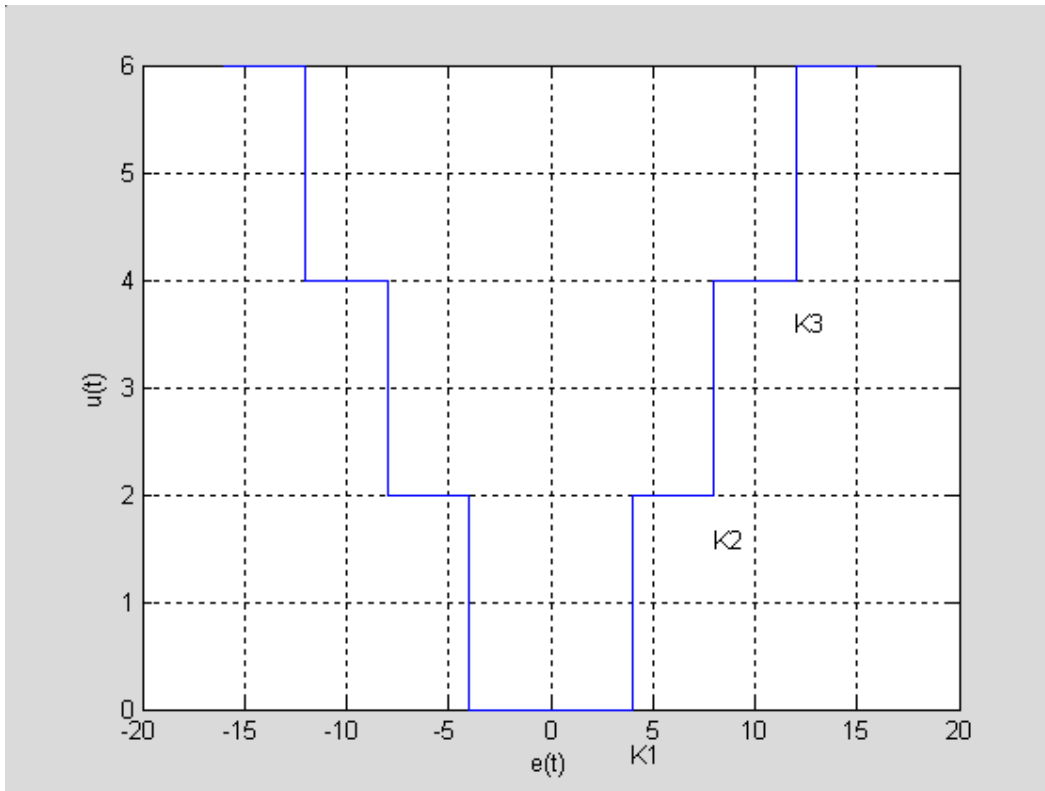
$$\text{Se } (|e(t)| \leq K_1) \quad \text{Então } (u(t) = 0)$$

$$\text{Se } (K_1 < |e(t)| \leq K_2) \quad \text{Então } (u(t) = u_1)$$

$$\text{Se } (K_2 < |e(t)| \leq K_3) \quad \text{Então } (u(t) = u_2)$$

$$\text{Se } (|e(t)| > K_3) \quad \text{Então } (u(t) = u_3)$$

Esta lei de controle está representada na FIG. 2.13.



**FIG. 2.13 característica entrada-saída de um controlador baseado em regras de produção e sem incertezas**

c) Controlador baseado em regras de produção nebulosa: (YONEYAMA, 2000, p.78)

Se  $(e(t)$  é QZ) Então  $(u(t)$  é QZ)

Se  $(e(t)$  é MP) Então  $(u(t)$  é MP)

Se  $(e(t)$  é MN) Então  $(u(t)$  é MN)

Se  $(e(t)$  é GP) Então  $(u(t)$  é GP)

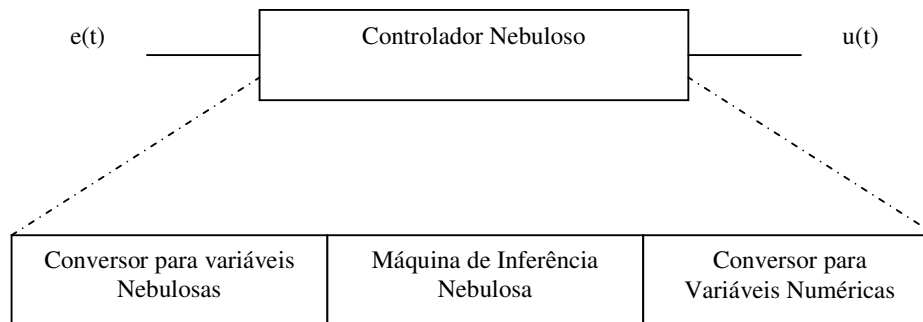
Se  $(e(t)$  é GN) Então  $(u(t)$  é GN)

onde QZ significa Quase\_Zero, MP=Médio\_Positivo, MN=Médio\_Negativo, GP=Grande\_Positivo, e GN=Grande\_Negativo.

Este tipo de controlador nebuloso é assunto desta dissertação e será detalhado a seguir.

### 2.3.4 ESTRUTURA DE CONTROLADORES EMPREGANDO LÓGICA NEBULOSA

Os controladores empregando lógica nebulosa possuem, de modo geral três blocos, como especificado na FIG. 2.14 abaixo:



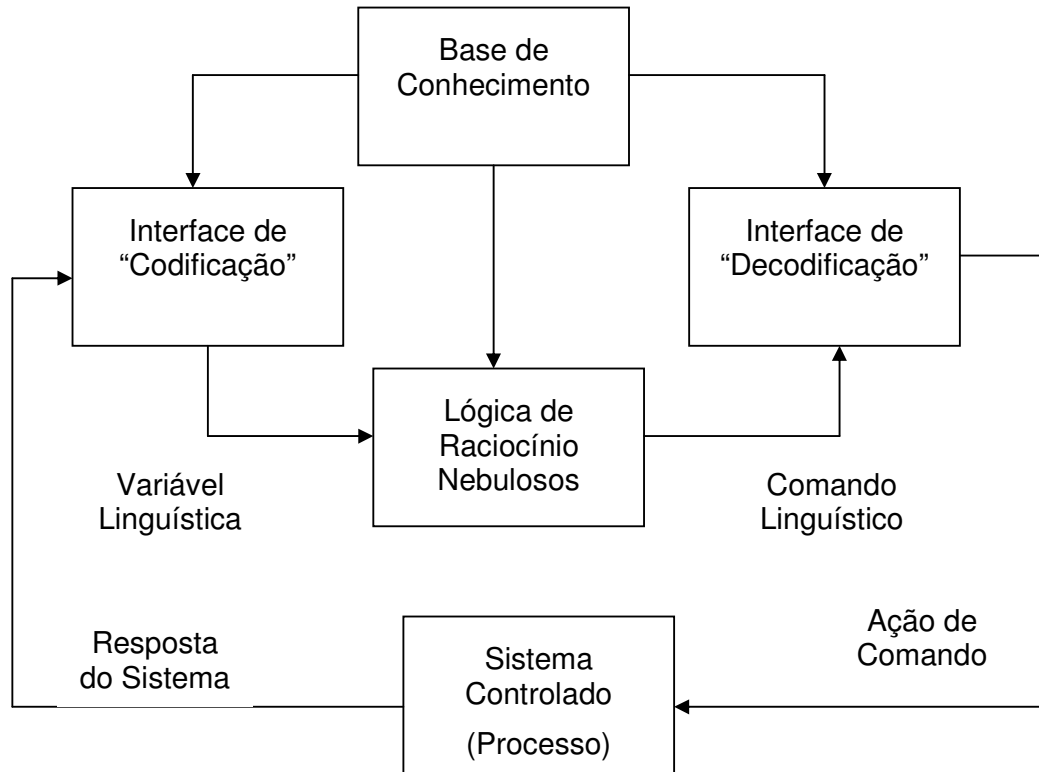
**FIG. 2.14 Estrutura de um controlador de lógica nebulosa**

O conversor para variáveis nebulosas é também chamado de “codificador”. Sua função é converter o sinal de entrada para um valor apropriado para inferência nebulosa. Ou seja, a função  $e(t)$ , que pode ser, por exemplo, uma tensão, precisa ser convertida em um valor apropriado. Tipicamente, são calculados os valores das funções de pertinência para cada um dos valores lingüísticos associados à grandeza  $e(t)$ .

A máquina de inferência nebulosa recebe as informações sobre  $e(t)$ , já convertidas em termos associados as variáveis lingüísticas, especificamente graus de pertinência de conjuntos nebulosos e gera, a partir de regras fornecidas pelo projetista, ativações para as várias saídas também de tipo lingüísticas. Estas saídas lingüísticas ativadas devem ser, posteriormente, convertidas para uma variável numérica  $u(t)$ .

O conversor para variável numérica ou “decodificador”, é o responsável por transformar as variáveis lingüísticas geradas pela máquina de inferência nebulosa em um valor bem definido  $u(t)$ .

Outra representação comumente encontrada para descrever a estrutura de um controlador empregando lógica nebulosa é apresentado na FIG.2.15 (LEITÃO, 2000).



**FIG. 2.15 Outra representação de um controlador de lógica nebulosa**

A interface de codificação exerce as seguintes funções (CAMPOS, 2000):

- Medida dos valores das variáveis de entrada.
- Mapeamento dos valores assumidos pelas variáveis de entrada no universo de referência correspondente.
- Conversão dos dados de entrada em valores lingüísticos apropriados.

A base de conhecimento compreende um conhecimento do domínio da aplicação e dos objetivos desejados. Consiste em uma “base de dados” e uma “base de regras lingüísticas de controle”:

- A base de dados fornece as definições necessárias para a correta execução das regras de controle e da manipulação de dados.

- A base de regras caracteriza os objetivos e a política de controle do sistema. Ela pode, por exemplo, representar os conhecimentos de um operador experiente no controle da planta em questão.

A lógica de raciocínio nebuloso é o núcleo de um controlador nebuloso, e possui a capacidade de simulação do processo de decisão humano baseado em conceitos nebulosos e em ações de controle tomadas através das regras de dedução nebulosa.

A interface de decodificação efetua as funções de:

- Mapeamento dos valores assumidos pelas variáveis de saída no seu universo de referência correspondente.
- Processo de decodificação, que implementa uma ação de comando.

### 2.3.5 CARACTERÍSTICAS DE CONTROLADORES NEBULOSOS

A seguir serão descritas algumas características dos controladores nebulosos:

- Aspectos favoráveis (CAMPOS, 2000):
  - a) Não há necessidade de um modelo do sistema a ser controlado;
  - b) Possibilidade de incorporar conhecimentos e heurísticas do operador humano, de como controlar o sistema;
  - c) Aplicabilidade em sistemas de dinâmica complexa;
  - d) Possibilidade de explorar as características não-lineares dos controladores nebulosos para obter um maior desempenho.
- Aspectos desfavoráveis (CAMPOS, 2000):
  - a) Ausência de diretrizes precisas para o projeto do controlador nebuloso, resultando em uma sintonia quase que artesanal e pouco sistematizada;
  - b) Impossibilidade de demonstração, nos casos gerais, de propriedades como a estabilidade, ausência de ciclos limite, etc;
  - c) A consistência das regras não é garantida a priori.



### 2.3.5 APLICAÇÕES DE SISTEMAS BASEADOS NA LÓGICA NEBULOSA

Aspiradores de pó da Matsushita (COELHO, 2001) usam controladores de 4 bits executando algoritmos de lógica nebulosa que monitoram sensores de pó e ajustam o poder de sucção; máquinas de lavar Hitachi usam controladores nebulosos para controle de peso, verificação do tipo de tecido, e sensores de sujeira para automaticamente ajustarem os ciclos de lavagem para o uso otimizado da potência, da água, e do detergente.

A Cannon desenvolveu uma câmera fotográfica com autofoco que usa um dispositivo "charge-coupled" (CCD) para medir a claridade de imagens em seis regiões do campo de visão e usa esta informação para determinar se a imagem está no foco; ela também rastreia a taxa de mudança no movimento da lente durante a procura do foco e controla a velocidade para evitar o "overshoot" (COELHO, 2001). A saída é a posição do curso da lente. Este sistema nebuloso usa 13 regras.

Um condicionador de ar industrial projetado pela Mitsubishi (COELHO, 2001) usa 25 regras para aquecer e 25 regras para refrescar. Um sensor de temperatura fornece a entrada, e as saídas são: a alimentação de um inversor, uma válvula de um compressor, e um ventilador. Comparado com o projeto anterior, o controlador nebuloso aquece e esfria 5 vezes mais rápido, reduz o consumo de potência em 24%, incrementa a estabilidade da temperatura por um fator de 2, e usa menos sensores (COELHO, 2001).

Estes exemplos mostram o interesse dos japoneses por lógica nebulosa que é refletido em outras aplicações que eles têm implementado: reconhecimento de caracteres, sistemas nebulosos ópticos, robôs, helicópteros comandados por voz através de um robô, sistemas de elevadores, entre outras (YONEYAMA, 2000).

A Agência de Proteção Ambiental nos EUA tem estudado a implantação de controladores nebulosos para controle de energia, e a NASA tem estudado este tipo de controle para ancorar suas naves. Simulações mostram que ele pode reduzir em muito o consumo de combustível. Firms como a Boeing, General Motors, Allen-Bradley, Chrysler, Eaton e Whirlpool também têm trabalhado em lógica nebulosa (COELHO, 2001).

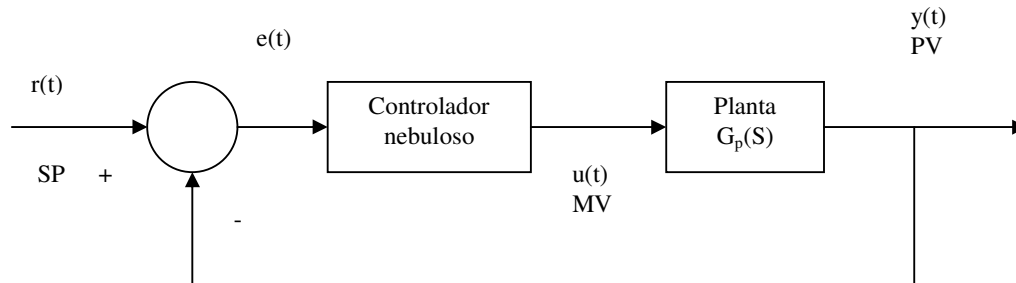
Em 1996 a Matsushita produziu uma máquina de lavar pratos "inteligente" que usa um controlador nebuloso e um "one-stop sensing module" que combina um

termistor (para medida da temperatura), um sensor condutivo (para medir o nível de detergente através dos íons presentes na água), um sensor de turvação para medir a sujeira na lavagem, e um sensor magnético para ler a velocidade. O sistema otimiza o ciclo de lavagem para qualquer carga resultando em um mínimo de energia, detergente, e água (CAMPOS, 2000).

Outras aplicações de sistemas nebulosos incluem a integração de lógica nebulosa com redes neurais e com os denominados algoritmos genéticos, com o objetivo de construir um sistema nebuloso capaz de aprender (RAPOSO, 2000; LEITÃO, 2000; PADILHA, 2001).

### 2.3.7 EXEMPLO DE UM CONTROLADOR NEBULOSO PARA UM PROCESSO SIMPLES (SISO) (CAMPOS, 2000)

O processo utilizado como exemplo é mostrado na FIG. 2.16.



**FIG. 2.16 Processo com controlador nebuloso**

Neste processo, o controlador nebuloso deverá atuar na planta, através da variável manipulada MV, de forma a que a variável de processo PV, saída do processo, siga o “setpoint” desejado (SP).

A dinâmica do processo é representada pela função de transferência  $G_p$  abaixo:

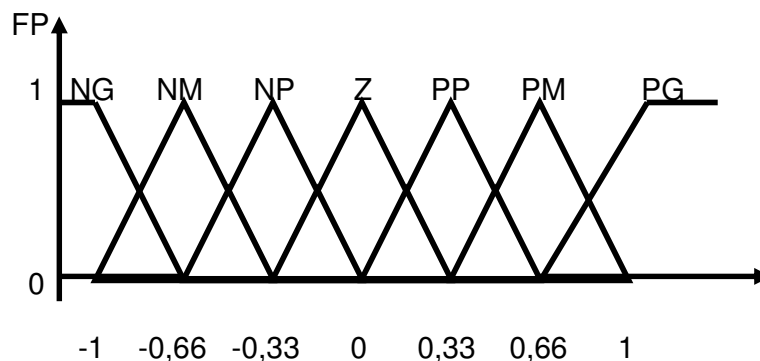
$$G_p(s) = \frac{5}{s^2 + s + 1}$$

Deseja-se projetar um controlador nebuloso para este processo. Os passos para elaboração do controlador nebuloso são:

- 1º Passo: Definição do domínio das variáveis do controlador.
- 2º Passo: Normalização, por exemplo, no intervalo [-1 , 1].
- 3º Passo: Definição das funções de pertinência das variáveis do controlador.
- 4º Passo: Elaboração das regras.

As variáveis de entrada do controlador nebuloso são o erro “E(t)” e a variação do erro “DE(t)”, a variável de saída é “ $\Delta U$ ”. O erro é calculado subtraindo-se o valor do “setpoint” desejado (SP), ou ponto de operação, da saída do processo  $E(t) = SP - y(t)$ . A variação do erro é calculada fazendo  $DE(t) = E(t) - E(t-1)$ . A ação de controle é realizada sobre a variável manipulada **U**, que irá por exemplo, abrir ou fechar uma válvula.

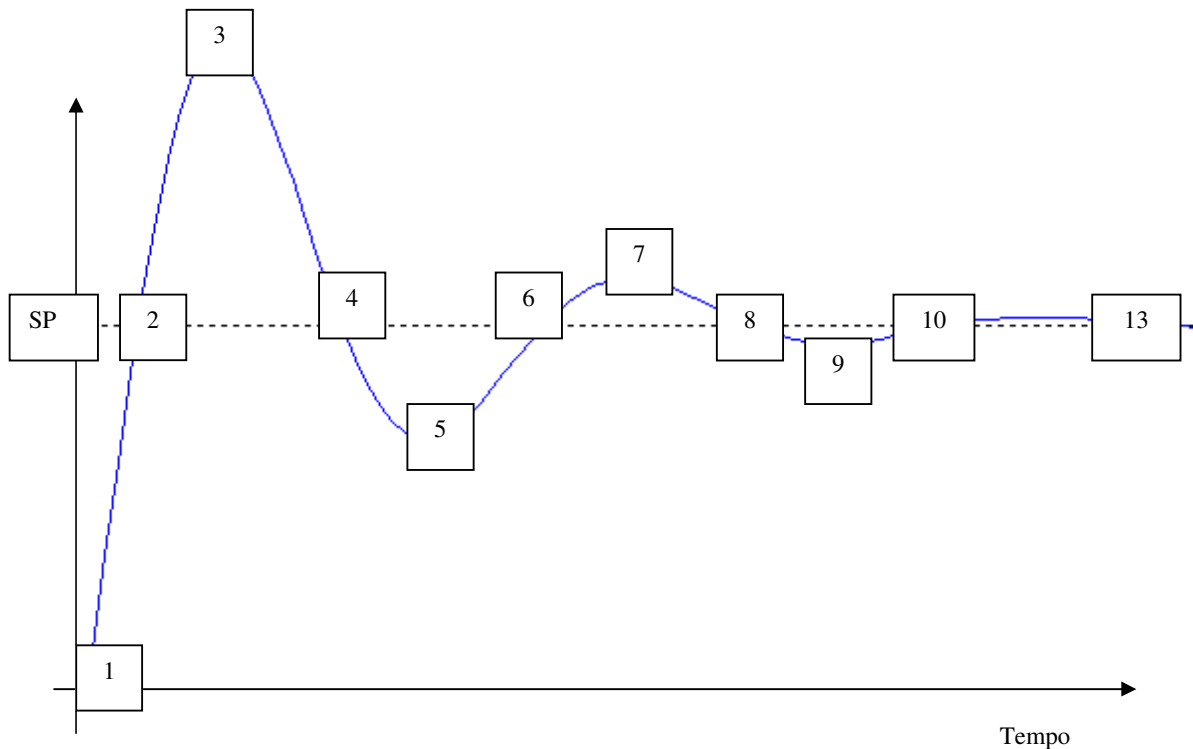
Para cada uma das variáveis de entrada, E(t) e DE(t), e saída,  $\Delta U$ , foram utilizadas funções de pertinência com 7 valores lingüísticos, sendo cada um destes valores representado por uma função de pertinência do tipo {**NG, NM, NP, Z, PP, PM, PG**}, FIG. 2.17.



**FIG. 2.17** Funções de pertinência das variáveis E(t), DE(t) e  $\Delta U$

Como cada variável tem 7 valores lingüísticos, pode-se obter até 49 regras (número de valores lingüísticos elevado à dimensão do espaço de entrada  $7^2$ ). Estas regras são criadas em função dos conhecimentos de um especialista em controle e

de um especialista do processo a ser controlado, a partir de uma resposta dinâmica desejada para o sistema. A FIG. 2.18 mostra a resposta dinâmica do processo, que será usada para a definição das regras do controlador nebuloso.



**FIG. 2.18 Resposta dinâmica desejada da variável de processo**

A TAB. 2.1 mostra as 13 regras de controle obtidas pela análise dos pontos de **(1)** até **(13)** da FIG. 2.18, considerando o comportamento aceitável, segundo a análise qualitativa de um especialista do sistema, da variável de saída para cada um destes pontos. Por exemplo, no ponto **(2)** o erro entre a variável de saída ou de processo e o seu valor desejado (“setpoint”) está próximo de zero (**Z**), mas a variação do erro é negativa e grande (**NG**), logo deve-se esperar que a variável de saída se afaste rapidamente do seu “setpoint”, portanto para manter a variável igual ao “setpoint”, o controlador deve se antecipar e variar a saída de um forma negativa e grande (**NG**) (Regra 2 da TAB. 2.1).

**TAB. 2.1 Regras do controlador nebuloso**

| E \ ΔE | NG    | NM    | NP     | Z      | PP     | PM    | PG    |
|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| NG     |       |       |        | NG(3)  |        |       |       |
| NM     |       |       |        | NM(7)  |        |       |       |
| NP     |       |       |        | NP(11) |        |       |       |
| Z      | NG(2) | NM(6) | NP(10) | Z(13)  | PP(12) | PM(8) | PG(4) |
| PP     |       |       |        | PP(9)  |        |       |       |
| PM     |       |       |        | PM(5)  |        |       |       |
| PG     |       |       |        | PG(1)  |        |       |       |

A simulação do processo foi realizada no Matlab-Simulink (MATLAB USER'S GUIDE, 1999). Foi projetado um controlador nebuloso que recebe a variável de saída, o erro anterior e o "setpoint" desejado. O controlador irá calcular o erro segundo a EQ. 2.1:

$$E = SP - PV \quad (\text{EQ. 2.1})$$

Onde E é o erro, SP é o "setpoint" desejado e PV é a variável do processo.

A variação do erro será calculada segundo a EQ. 2.2:

$$DE = E - E_a \quad (\text{EQ. 2.2})$$

Onde DE é a variação do erro, E é o erro e  $E_a$  é o erro anterior.

São então normalizados os valores do erro E e da variação do erro DE. A normalização do erro E segue a EQ. 2.3:

$$E_N = \left( \frac{2(E - E_{\min})}{(E_{\max} - E_{\min})} \right) - 1 \quad (\text{EQ. 2.3})$$

Onde  $E_N$  é o erro normalizado, E é o erro calculado por EQ. 2.1, e  $E_{\min}$  e  $E_{\max}$ , definem o fator de escala da normalização.

Já a normalização da variação do erro DE segue a EQ. 2.4:

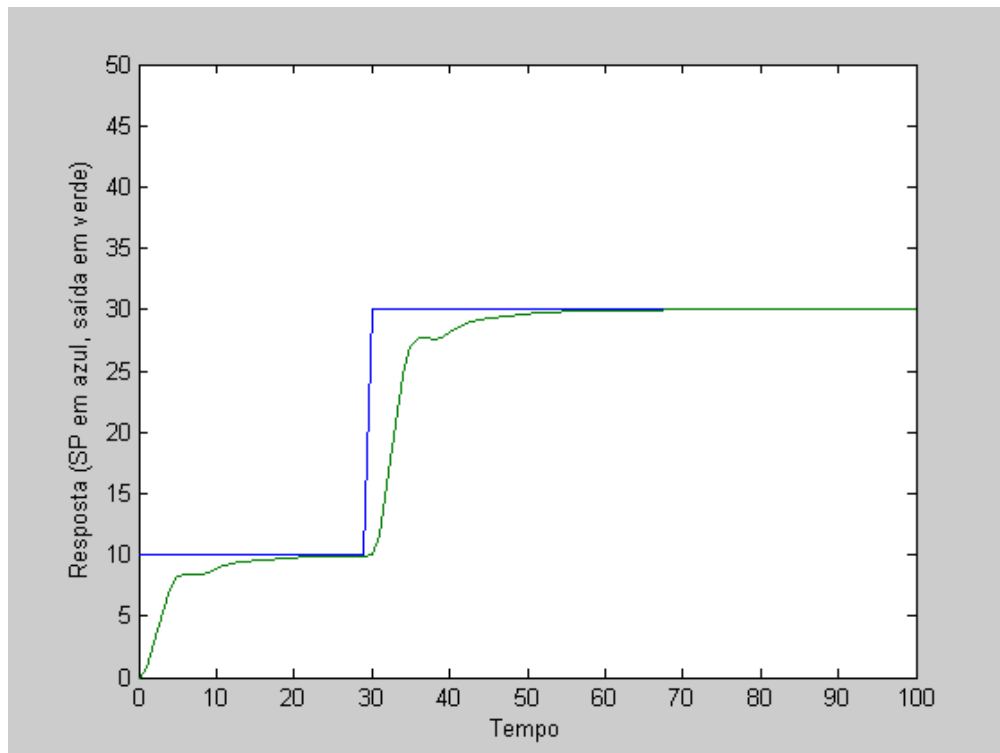
$$DE_N = \left( \frac{2(DE - DE_{min})}{(DE_{max} - DE_{min})} \right) - 1 \quad (\text{EQ. 2.4})$$

Onde  $DE_N$  é a variação do erro normalizada,  $DE$  é a variação do erro calculada pela EQ. 2.2, e  $DE_{min}$  e  $DE_{Max}$  definem o fator de escala da normalização.

O controlador nebuloso utilizará as funções de pertinência de  $E$ ,  $DE$ , descritas na FIG. 2.17, e as regras segundo a TAB. 2.1, e irá gerar a função de pertinência de saída  $\Delta U$ .

Para facilidade no ajuste fino do controlador, as EQ. 2.1 e EQ. 2.2, foram multiplicadas por um ganho, o ganho do erro “ $E$ ” é igual a 1, e o da variação do erro “ $DE$ ”, igual a 0,01.

A FIG. 2.19 mostra a resposta do processo para o controlador nebuloso projetado. A variação de “setpoint” aplicada foi de inicialmente 10, para 30 no instante de 30 segundos. O tempo total de simulação foi de 100 segundos.



**FIG. 2.19 Resposta do processo para o SP aplicado**

Pode-se perceber que o controlador consegue alcançar os “setpoints” desejados.

## 2.4 SISTEMAS MULTIVARIÁVEIS E A MATRIZ RGA

Como um dos objetivos deste trabalho é estudar a aplicação de sistemas nebulosos multivariáveis, será feita a seguir uma introdução aos sistemas multivariáveis.

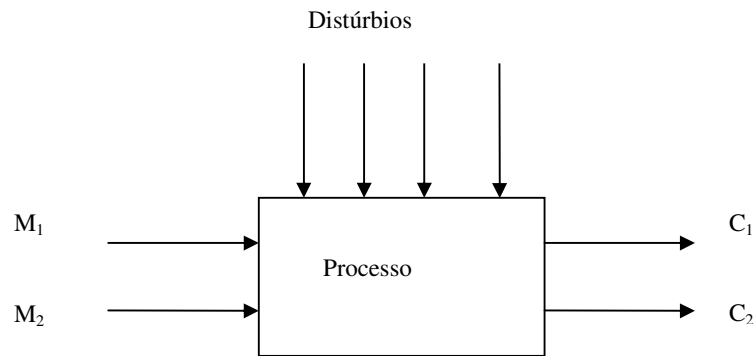
A grande maioria dos processos industriais são controlados por PIDs (BOLTON, 1995, p.340). Esses controladores possuem, uma entrada e uma saída e são aplicados em sistemas SISO, (*single input, single output*), ou seja, sistemas com uma variável controlada e uma variável manipulada.

Porém, na prática os processos possuem inúmeras variáveis que devem ser controladas e inúmeras variáveis que podem ser manipuladas (sistema MIMO, *multiple input, multiple output*). Estes são os chamados sistemas multivariáveis.

Quando a interação entre as variáveis do sistema MIMO é fraca, ele pode ser controlado eficientemente com vários PIDs, é o chamado controle multimalhas. Entretanto, se a interação for forte, necessita de estratégias de controle mais elaboradas.

Será apresentada a seguir uma técnica para analisar o grau de dependência entre as variáveis de entrada e saída de processos multivariáveis, conhecida como matriz de ganhos relativos (RGA) que foi desenvolvida por BRISTOL (1966).

O controle de um sistema MIMO é obviamente bem mais complexo do que o de um sistema SISO. A complexidade do controle destes processos ocorre devido às interações que acontecem entre as variáveis controladas e manipuladas. A FIG. 2.20 mostra um fluxograma simplificado de um sistema multivariável. Por conveniência, o número de variáveis manipuladas é igual ao número de variáveis controladas, mas isso nem sempre pode ocorrer.



**FIG. 2.20 Sistema MIMO com múltiplos distúrbios**

Em geral, uma mudança em uma das variáveis manipuladas, por exemplo,  $M_1$ , irá afetar todas as variáveis controladas,  $C_1$  e  $C_2$ . Devido a esta interação do processo, existe a necessidade de se escolher bem o par de variáveis controladas e manipuladas para executar o controle multimalha, com vários PIDs. Por exemplo, pode-se controlar  $C_1$  manipulando-se  $M_1$ , enquanto outro PID controla  $C_2$  através de  $M_2$ . Outra possibilidade é controlar  $C_1$  manipulando-se  $M_2$ , e  $C_2$  através de  $M_1$ .

Quando possuímos um processo a ser controlado com  $n$  variáveis controladas e  $n$  variáveis manipuladas, existem  $n!$  possibilidades de configuração de um controle multimalha, com vários PIDs.

#### 2.4.1 A MATRIZ RGA (RELATIVE GAIN ARRAY)

Bristol (BRISTOL, 1966) desenvolveu um método para a análise de processos de controle multivariáveis. A análise proposta por Bristol leva em consideração apenas o comportamento das variáveis no estado estacionário e fornece duas importantes informações:

- O grau de interação entre as malhas de controle do processo;
- Uma recomendação quanto ao par mais efetivo de variáveis controlada e manipulada.



## 2.4.2 DETERMINAÇÃO DA MATRIZ RGA

A determinação da matriz RGA é o primeiro passo para definirmos a estratégia de controle a ser adotada em um sistema multimalha (SHINSKEY, 1996). Como foi dito anteriormente, através deste método podemos medir o grau de interação entre as variáveis do processo e assim escolher os melhores pares de variáveis controlada-manipulada.

A matriz RGA é comumente representada por  $\Lambda$ , tendo o seguinte formato:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{EQ. 2.5})$$

A matriz  $\Lambda$  é quadrada (nxn), número de variáveis controladas igual ao número de variáveis manipuladas.

As colunas são associadas às variáveis manipuladas  $M_j$  e as linhas às variáveis controladas  $C_i$ .

Cada termo  $\lambda_{ij}$  é calculado a partir de:

$$\lambda_{ij} = \frac{\left( \frac{\Delta C_i}{\Delta M_j} \right)_M}{\left( \frac{\Delta C_i}{\Delta M_j} \right)_C} = \left[ \frac{\text{GanhodeMalhaAberta}}{\text{GanhodeMalhaFechada}} \right] \quad (\text{EQ. 2.6})$$

O ganho em malha aberta  $\left( \frac{\Delta C_i}{\Delta M_j} \right)_M$  é obtido com todas as outras variáveis manipuladas constantes no valor de regime permanente e só  $M_j$  variando.

O ganho em malha fechada  $\left( \frac{\Delta C_i}{\Delta M_j} \right)_C$  é obtido com todas as outras variáveis manipuladas em controle, em malha fechada, e só  $M_j$  variando.

Sendo  $C_i$  a variável controlada e  $M_j$  a variável manipulada.

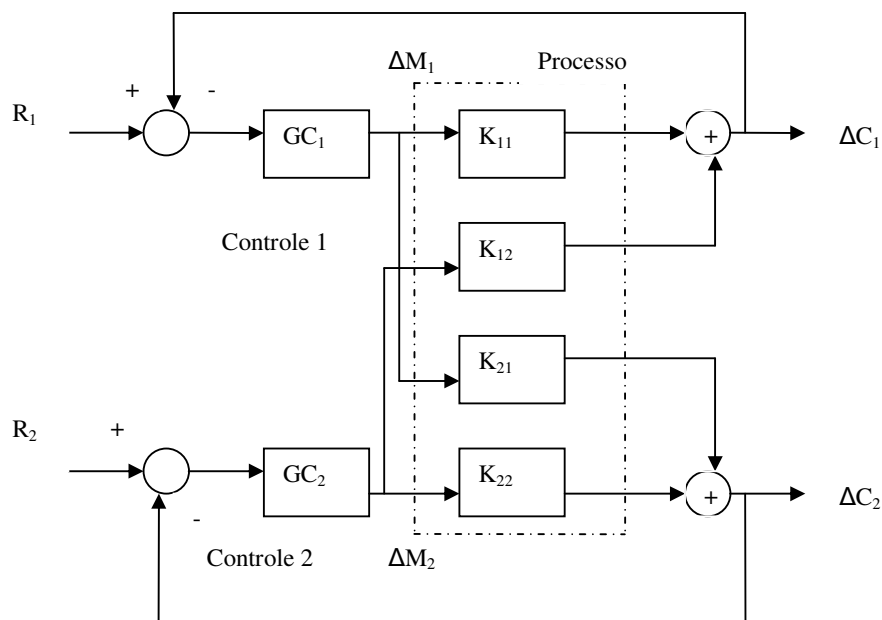
A matriz RGA possui duas importantes propriedades (SEBORG, 1989):

- É normalizada. A soma dos elementos de cada linha ou coluna é 1.
- É adimensional, já que representa um ganho entre duas grandezas de mesma natureza.

Pode-se ainda ressaltar que para o caso particular de um sistema com “n” variáveis de entrada e “n” variáveis de saída, a matriz RGA é quadrada.

### 2.4.3 CÁLCULO DA MATRIZ RGA

Vamos analisar um sistema 2x2 mostrado na FIG. 2.21.



**FIG. 2.21 Sistema 2x2**

A variação da variável controlada ( $C_i$ ) depende tanto da variável manipulada 1 ( $\Delta M_1$ ), quanto da variável manipulada 2 ( $\Delta M_2$ ):

$$\Delta C_1 = K_{11}\Delta M_1 + K_{12}\Delta M_2 \quad (\text{EQ. 2.7})$$

$$\Delta C_2 = K_{21}\Delta M_1 + K_{22}\Delta M_2 \quad (\text{EQ. 2.8})$$

Onde  $K_{ij}$  denota o ganho de estado estacionário entre  $\Delta C_i$  e  $\Delta M_j$  e seus elementos formam a matriz de ganhos estáticos do processo:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{EQ. 2.9})$$

Cálculo do termo  $\lambda_{11}$ :

Da EQ. 2.7 tem-se que  $\left( \frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} \right)_{M_2} = K_{11}$ , pois não há variação da variável manipulada 2 ( $\Delta M_2=0$ ). (EQ. 2.10)

Portanto: GanhoMalhaAberta= $K_{11}$

Antes de se calcular  $\left( \frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} \right)_{C_2}$ , deve-se primeiro eliminar o termo  $\Delta M_2$ . Isto é feito resolvendo a EQ. 2.8 para  $\Delta M_2$  e  $\Delta C_2$ , pois neste caso o valor de  $C_2$  fica constante,  $\Delta C_2=0$ , já que esta variável está sob controle. Portanto tem-se que:

$$\Delta M_2 = -\frac{K_{21}}{K_{22}} \cdot \Delta M_1 \quad (\text{EQ. 2.11})$$

Substituindo na EQ. 2.7 temos:

$$\Delta C_1 = K_{11} \cdot \Delta M_1 + K_{12} \cdot \left( -\frac{K_{21}}{K_{22}} \right) \cdot \Delta M_1 \quad (\text{EQ. 2.12})$$

$$\Delta C_1 = K_{11} \cdot \left( 1 - \frac{K_{12} \cdot K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22}} \right) \cdot \Delta M_1 \quad (\text{EQ. 2.13})$$

Logo o ganho em malha fechada será:

$$\left( \frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} \right)_{C_2} = K_{11} \cdot \left( 1 - \frac{K_{12} \cdot K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22}} \right) \quad (\text{EQ. 2.14})$$

Substituindo EQ. 2.9 e EQ. 2.13 na EQ. 2.6 obtém-se a expressão de ganho relativo ( $\lambda_{11}$ ):

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1 - \frac{K_{12} \cdot K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22}}} = \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (\text{EQ. 2.15})$$

Lembrando que a soma de cada linha ou coluna da matriz  $\Lambda$  é igual a 1 (SEBORG, 1989), os demais ganhos relativos são facilmente calculados a partir de  $\lambda_{11}$ :

$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{11} = \lambda_{21} \quad \text{e} \quad \lambda_{11} = \lambda_{22} \quad (\text{EQ. 2.16})$$

Logo, a matriz RGA para um sistema 2x2 pode ser expressa por:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 1 - \lambda \\ 1 - \lambda & \lambda \end{bmatrix} \quad (\text{EQ. 2.17})$$

O símbolo  $\lambda$  substitui a  $\lambda_{11}$ . Observa-se a simetria de  $\Lambda$  apenas no caso especial da matriz RGA 2x2. Porém, isto não necessariamente irá ocorrer em processos de ordem superior ( $n > 2$ ).

Para estes casos a RGA pode ser calculada através da expressão:

$$\lambda_{ij} = K_{ij} \cdot H_{ij} \quad (\text{EQ. 2.18})$$

Onde  $K_{ij}$  é o ganho em regime permanente entre  $C_i$  e  $M_j$ , e  $H_{ij}$  o elemento  $(i,j)$  de  $H = (K^{-1})^T$ , onde  $H_{ij}$  é o elemento da transposta da matriz inversa de  $K$ , que é a matriz de ganhos estáticos do processo. Os elementos  $\lambda_{ij}$  serão dados pelo produto termo a termo das matrizes  $K$  e  $H$ . Desta forma, para a determinação da RGA basta

encontrar a matriz de ganhos em regime permanente do sistema (SEBORG et al., 1989, p.456).

A decisão sobre a escolha dos pares de variáveis controladas e manipuladas é tomada conforme a TAB. 2.2 abaixo:

**TAB. 2.2 Valores de  $\lambda$**

| Valor de $\lambda_{ij}$ | Decisão  |
|-------------------------|--|
| $\lambda_{ij} > 1$      | $C_i$ e $M_j$ interagem e o grau de interação cresce à medida que $\lambda$ cresce.  |
| $\lambda_{ij} < 0$      | $C_i$ e $M_j$ tem sinais dos ganhos estáticos contrários quando em malha aberta e fechada e não devem formar um par, quando se usa controladores lineares, como o PID. |
| $\lambda_{ij} = 1$      | Par ideal – não há interação com outras malhas. Os ganhos de malha aberta e malha fechada são idênticos.   |
| $\lambda_{ij} = 0$      | $M_j$ não afeta $C_i$ e assim não devem formar um par.   |
| $0 < \lambda_{ij} < 1$  | Há interação entre as malhas, o ganho em malha fechada é maior que o ganho em malha aberta.  |

SEBORG, 1989, p.457

Portanto a recomendação desta metodologia é de formar pares de variáveis controladas e manipuladas que possuam o ganho relativo  $\lambda_{ij}$  positivo e o mais perto possível de 1.

### 3 CONTROLE MULTIMALHA PID PARA O PROCESSO DOS QUATRO TANQUES

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o processo dos quatro tanques, que será utilizado neste trabalho para comparação dos controladores. Em seguida serão utilizados controladores PIDs multimalha para controlar este processo tanto com baixa interação, quanto com grande interação. Isto é, será analisado o desempenho dos controladores em dois pontos distintos de operação, um com grande interação e outro com baixa interação entre as malhas.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DOS QUATRO TANQUES

O sistema dos quatro tanques (JOHANSSON, 2000) foi desenvolvido com o intuito de estudar as limitações no desempenho de controladores frente à mudança na dinâmica do sistema. Este processo é constituído de quatro tanques, conectados em série e em paralelo como na FIG. 3.1. Os tanques superiores, de número 3 e 4, descarregam nos tanques de número 1 e 2, respectivamente, que desembocam em um tanque pulmão. A forma como se alimentam os quatro tanques é que caracteriza o sistema. Existem duas vazões independentes  $F_1$  e  $F_2$  controladas pelas válvulas  $V_1$  e  $V_2$ . Tomando como exemplo a vazão  $F_1$ , esta pode ser dividida em uma fração de  $F_1$  que desemboca no tanque 1 e o restante no tanque 4, que posteriormente desembocará no tanque 2. Analogamente, a vazão  $F_2$  pode ser dividida numa fração de  $F_2$  que desemboca no tanque 2, e o restante desembocará no tanque 3 que posteriormente desembocará no tanque 1. A maior ou menor fração de  $F_1$  e  $F_2$  que desembocam nos tanques 4 e 3 respectivamente dependem das válvulas de três vias  $X_1$  e  $X_2$ . Estas válvulas variam de zero até um,  $X \in [0,1]$ . Quando  $X_1$  é 1 toda a vazão  $F_1$  cairá no tanque 1, o mesmo acontecendo com  $X_2$ , que se for 1 toda a vazão cairá no tanque 2. Conforme  $X_1$  e  $X_2$  vão tendo o seu valor reduzido, menos de  $F_1$  e  $F_2$  cairão nos tanques 1 e 2, passando a caírem nos tanques 3 e 4. Até que

se  $X_1$  e  $X_2$  forem 0, nenhuma das vazões cairá diretamente nos tanques 1 e 2, caindo somente nos tanques 3 e 4.

As variáveis controladas deste sistema são os níveis  $h_1$  do tanque 1, e  $h_2$  do tanque 2. As variáveis manipuladas serão as vazões  $F_1$  do ramo 1 e  $F_2$  do ramo 2, enquanto as frações de  $X_1$ , válvula de três vias do ramo 1, e de  $X_2$ , válvula de três vias do ramo 2, serão distúrbios do sistema. Como simplificação do estudo, as válvulas de três vias  $X_1$  e  $X_2$  serão tratadas como parâmetro  $X$  e terão o mesmo posicionamento.

O desafio de controlar este processo vem da modificação que ocorre na sua dinâmica quando o parâmetro  $X$  é variado. A alteração na dinâmica do processo pode fazer com que ele fique mais lento ou mais rápido, e isso pode acarretar a instabilidade do sistema.

O processo é não-linear e existe interação entre as malhas do processo. A maior ou menor interação entre as malhas do processo é definido pela posição das válvulas de três vias.

Serão estudados dois pontos bem distintos na dinâmica deste processo, o primeiro com baixa interação entre os ramos, parâmetro  $X$  em 0,7 e um segundo ponto com grande interação entre os ramos, com parâmetro  $X$  em 0,3.

Os controladores empregados deverão variar as vazões  $F_1$  e  $F_2$ , variáveis manipuladas, de forma a atingir os níveis desejados  $h_1$  e  $h_2$ , variáveis controladas, conforme os “setpoints” empregados.

O desempenho destes controladores será considerado satisfatório caso os níveis desejados sejam atingidos.

O processo dos quatro tanques vem sendo amplamente utilizado em estudos de processos industriais multivariáveis com grande variação de dinâmica, pela sua complexidade devido a ser um processo com interação variável entre as variáveis manipuladas e controladas e pela sua não linearidade. Pode-se citar além do artigo de JOHANSSON (2000), que fez o primeiro estudo com este processo, o trabalho com modelo de controladores preditivos (HENRIKSSON et. al., 2003), linearização de processos (GOSMANN, 2002), comparação entre formulações de filtro de Kalman (MARCON, 2002) e está sendo também utilizado como plataforma de ensino de controle multivariável em algumas universidades (GATZKE et. al., 2000, DOYLE et. al., 2000, MEADOWS et. al., 2000).

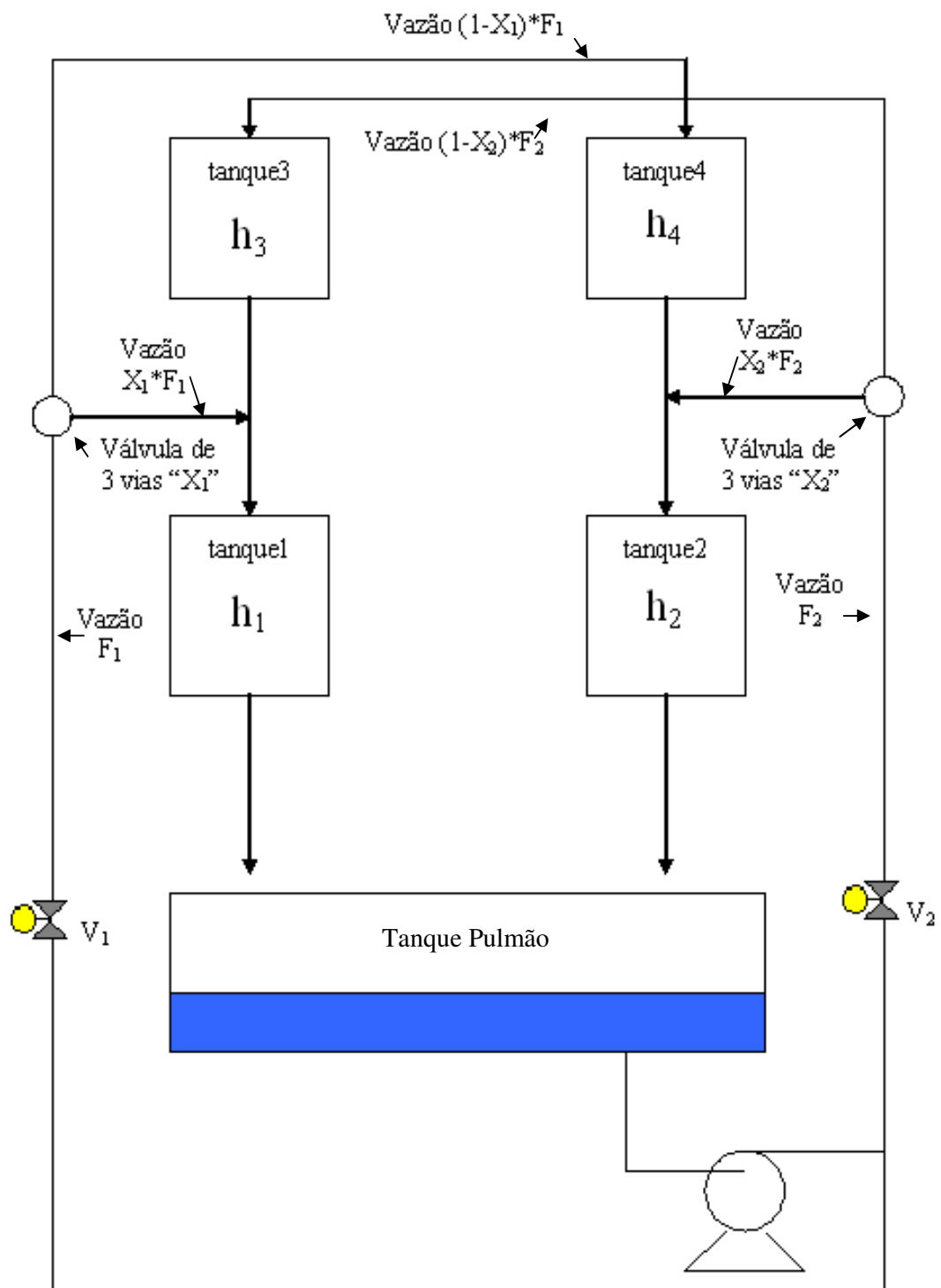


FIG. 3.1 Processo dos quatro tanques



A modelagem matemática é desenvolvida como segue:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = X_1 F_1 + R_3 \sqrt{h_3} - R_1 \sqrt{h_1} \quad (\text{EQ. 3.1})$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = X_2 F_2 + R_4 \sqrt{h_4} - R_2 \sqrt{h_2} \quad (\text{EQ. 3.2})$$

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = (1 - X_2) F_2 - R_3 \sqrt{h_3} \quad (\text{EQ. 3.3})$$

$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = (1 - X_1) F_1 - R_4 \sqrt{h_4} \quad (\text{EQ. 3.4})$$

Onde  $A_i$  é a área da base do tanque  $i$ ;

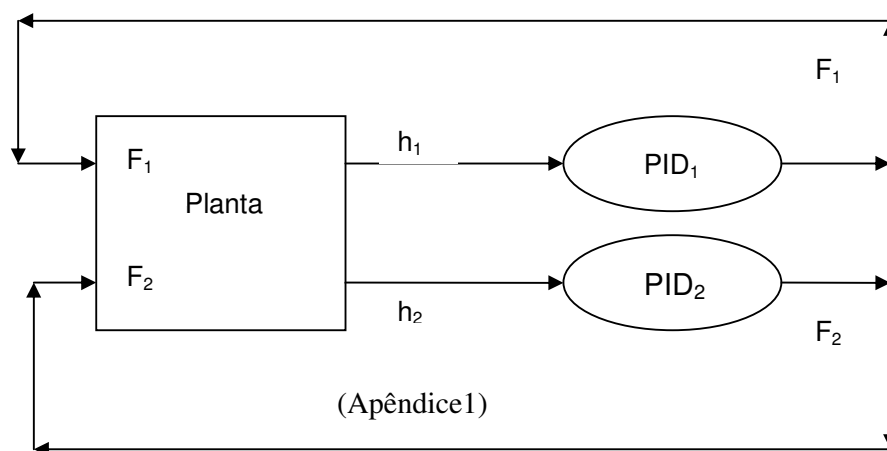
$R_i$  é a constante de perda de carga da saída do tanque  $i$ ;

$h_i$  é o nível no tanque  $i$ ;

$F_j$  é a vazão no ramo  $j$ ;

$X_i$  é a posição da válvula de três vias  $i$ .

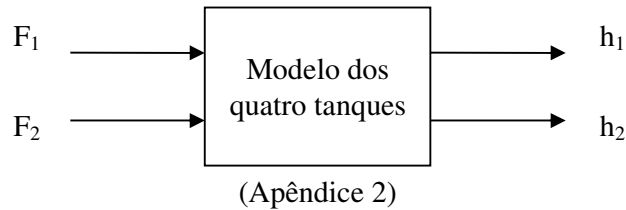
O processo será montado no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999) segundo as EQ. 3.1, EQ. 3.2, EQ. 3.3 e EQ. 3.4, e será configurado no bloco chamado planta, e sendo utilizado ainda, um controlador  $PID_1$  para controlar o nível  $h_1$  do tanque 1 e um outro controlador  $PID_2$  para controlar o nível  $h_2$  do tanque 2, conforme a FIG.3.2.



**FIG. 3.2 Processo dos quatro tanques, planta e controladores PIDs**

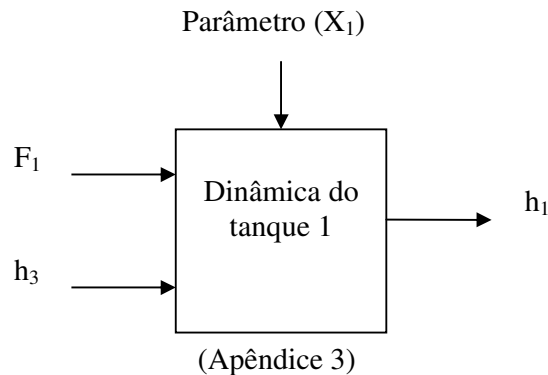
O bloco descrito na FIG. 3.2 como planta, é mostrado na FIG. 3.3, a sua montagem foi feita no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999). Nele são

montadas as estruturas dos tanques, tanque 1, tanque 2, tanque 3 e tanque 4, conforme as equações EQ. 3.1, EQ. 3.2, EQ. 3.3 e EQ. 3.4 descritas anteriormente. As entradas do bloco da planta são as vazões  $F_1$  e  $F_2$  e as saídas os níveis  $h_1$  e  $h_2$ .



**FIG. 3.3 Estrutura do processo com a modelagem matemática dos quatro tanques.**

Tomando como exemplo o tanque 1, FIG. 3.4. As entradas deste sistema são o nível  $h_3$  e a vazão  $F_1$  e a saída do sistema é  $h_1$ . Estrutura montada no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999).



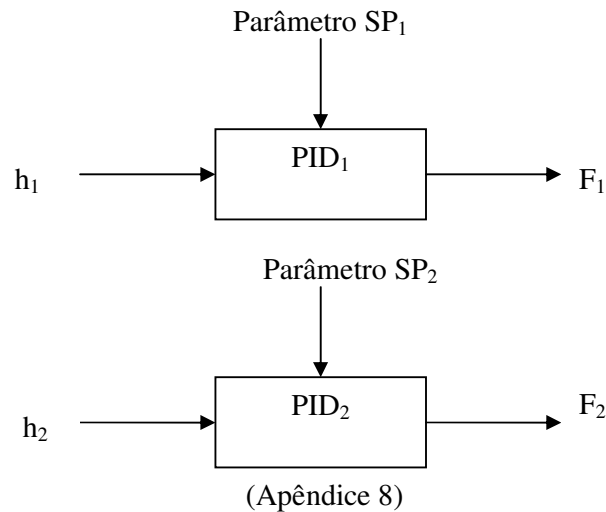
$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = X_1 F_1 + R_3 \sqrt{h_3} - R_1 \sqrt{h_1}$$

**FIG. 3.4 Estrutura do tanque 1**

Um bloco equivalente foi desenvolvido no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999) para os demais tanques. O tanque 2 tem como entradas a vazão  $F_2$  e o nível  $h_4$  e a saída é o nível  $h_2$ . O tanque 3 tem como entrada a vazão  $F_2$  e saída o

nível  $h_3$ . O tanque 4 tem como entrada a vazão  $F_1$  e saída o nível  $h_4$ . A estrutura de cada tanque segue a sua respectiva equação.

Os controladores PIDs da FIG. 3.2 são caracterizados pela seguinte estrutura, FIG. 3.5. Estrutura montada no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999).



**FIG. 3.5 Estrutura do controlador multimalha PID**

O controlador  $PID_1$  receberá o nível  $h_1$  do tanque 1 e irá compará-lo com o valor de nível desejado, ou “setpoint” desejado,  $SP_1$ , e irá aumentar ou diminuir a vazão  $F_1$ . O mesmo acontece com o  $PID_2$ , que recebe o nível  $h_2$  do tanque 2, compara com o valor de nível desejado, ou “setpoint”,  $SP_2$ , e aumenta ou diminui a vazão  $F_2$ .

A equação do controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é a seguinte: (BOLTON, 1995, p.340)

$$u = K_p e + \frac{1}{T_I} \int edt + T_d \frac{de}{dt} \quad (\text{EQ. 3.5})$$

Onde a variável “e” é o erro ou desvio ( $e=h_i-SP_i$ )

Onde  $K_p e$  é o termo proporcional, cuja saída é diretamente proporcional ao erro, que é a entrada do controlador PID. O parâmetro  $K_p$  é também chamado de ganho proporcional. O termo  $\frac{1}{T_I} \int edt$  representa o termo integral. No controle integral, a saída do controlador é proporcional à integral do sinal de erro “e” no tempo “t”. O termo  $\frac{1}{T_I}$  é uma constante de sintonia chamada de ganho integral. O

termo  $T_D \frac{de}{dt}$  representa o termo derivativo. No controle derivativo, a saída do controlador é proporcional à taxa de variação do erro “e” no tempo “t”, ou seja, proporcional a derivada do erro. O termo  $T_D$  é o ganho derivativo.

### 3.3 CONTROLADOR MULTIMALHA PID PARA PARÂMETROS $X_1$ E $X_2$ EM 0,7

Decidiu-se inicialmente trabalhar o processo com o parâmetro X ajustado em 0,7. Isso significa dizer que 70% das vazões  $F_1$  e  $F_2$  caem diretamente nos tanques 1 e 2 respectivamente e o restante irá para os tanques 4 e 3 respectivamente. Assim sendo, a vazão  $F_1$  irá ter relação direta com o nível  $h_1$  e a vazão  $F_2$  com o nível  $h_2$ . Ou melhor,  $F_1$  irá influenciar mais  $h_1$  do que  $h_2$ .

Para o valor de  $X_1$  e  $X_2$  em 0,7, tem-se certa interação entre as malhas, visto que, 30% da vazão de uma malha irá para o tanque superior da outra malha.

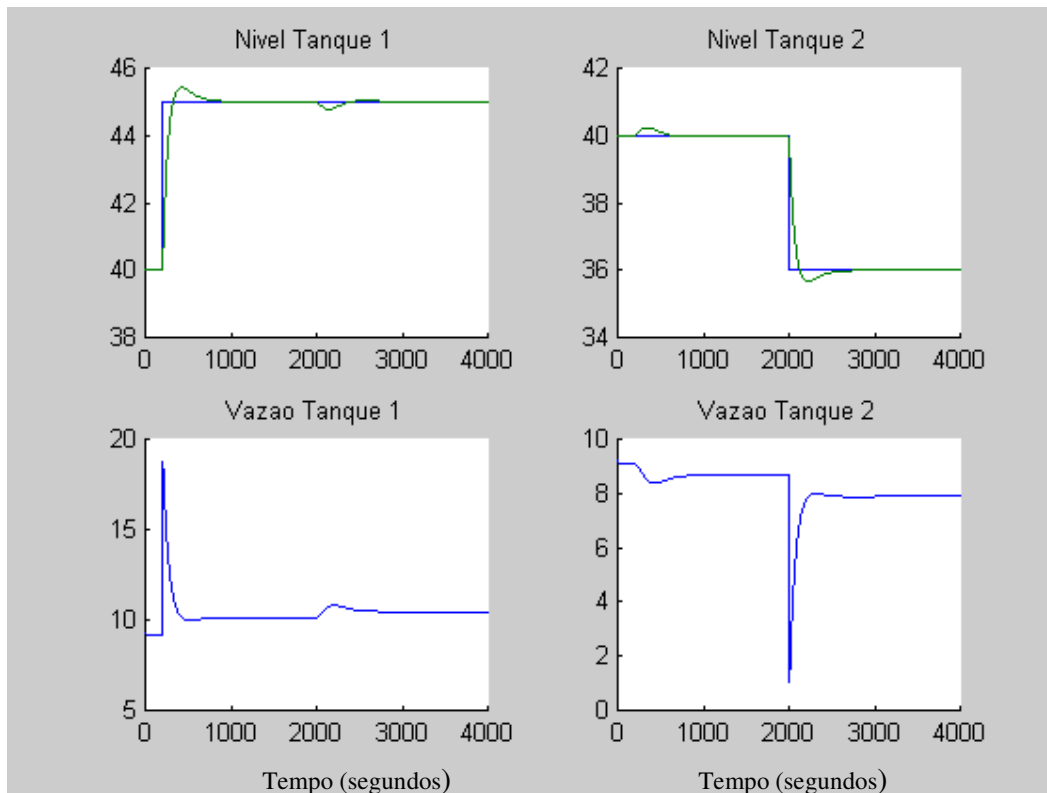
O experimento consiste em, dado um determinado “setpoint” que se deseja obter, conseguir ajustar o controlador PID para que seja possível manter o nível estável.

Para o tanque 1, variou-se o nível que era inicialmente 40 para 45 no instante 200 segundos. Para o tanque 2 variou-se o nível que inicialmente era 40 para 36 no tempo de 2000 segundos.

O método para ajuste do controlador PID foi empírico, ou de tentativa e erro. Foram sendo variados os valores dos termos proporcional e integral até que se conseguisse um bom desempenho para o sistema. O termo derivativo foi eliminado ( $T_D=0$ ).

Os valores dos parâmetros do controlador PID encontrados são, para o termo proporcional,  $K_p = -10$ , para o termo integral,  $\left(\frac{1}{T_I}\right) = -0,05$ , e para o termo derivativo,  $T_D = 0$ , para ambos os controladores PIDs, o controlador  $PID_1$  e o controlador  $PID_2$ .

A FIG. 3.6 mostra a resposta do sistema para o controlador PID ajustado para parâmetro X em 0,7 com os parâmetros do controlado PID descritos anteriormente.



**FIG. 3.6 Resposta do controlador PID para X em 0,7**

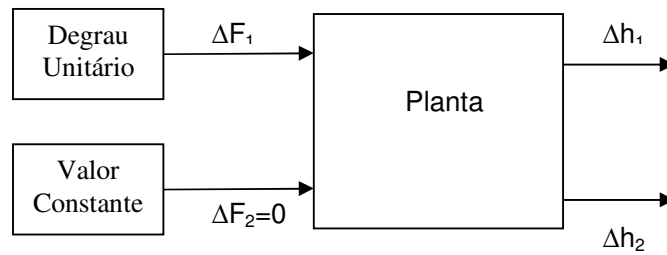
Pode-se verificar que existe uma certa interação entre as malhas olhando o gráfico acima, FIG. 3.6. Quando se muda o “setpoint” do tanque 1, o PID deste tanque levará o nível até o valor desejado, porém, esta variação na vazão do tanque 1 irá gerar uma perturbação no tanque 2. O mesmo pode ser visto quando se altera o “setpoint” do tanque 2.

### 3.4 CÁLCULO DA MATRIZ RGA DO SISTEMA PARA PARÂMETRO X EM 0,7

A quantificação do grau de interação entre as malhas pode ser obtida através da matriz RGA como se vê a seguir.

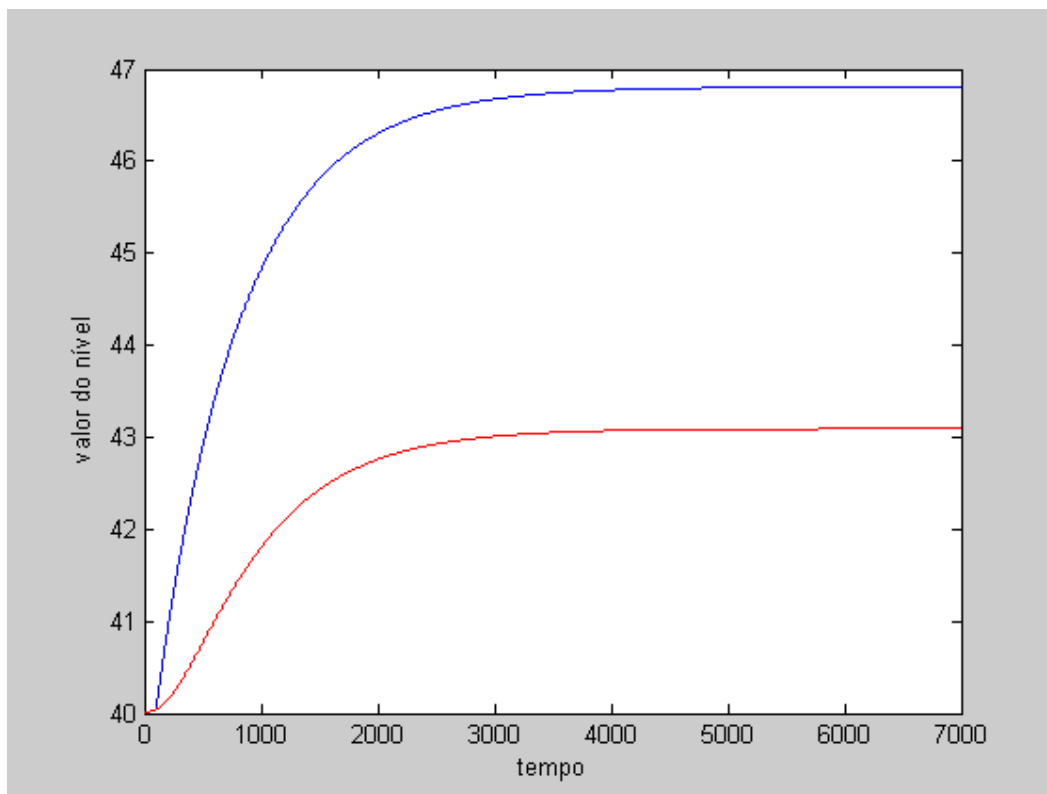
Para se analisar a interação será feita uma identificação direta utilizando o processo em malha aberta.

Primeiro é aplicado um degrau unitário em  $F_1$ , mantendo  $F_2$  no valor nominal (de regime permanente) em todo o período, tem-se então, a FIG. 3.7. Durante este experimento não existe controle (sistema em manual). Estrutura montada no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999).



**FIG. 3.7 Entrada degrau em F1 mantendo F2 constante**

A FIG. 3.8, abaixo, mostra o gráfico da variação dos níveis  $h_1$  (em azul) e  $h_2$  (em vermelho), para a estrutura da FIG. 3.7.



**FIG. 3.8 Gráfico de  $h_1$  e  $h_2$**

A primeira análise que pode-se fazer é que o sistema é estável, visto que o nível tende para um novo valor de regime permanente.

Para calcular o valor de  $K_{11}$  do gráfico faz-se o seguinte:

$$K_{ij} = \frac{\Delta h_i}{\Delta u_j} \text{ sendo } K_{11} = \frac{\Delta h_1}{\Delta u_1}$$

Onde  $\Delta h$  é a variação do nível e  $\Delta u$  é o degrau, que é unitário. A variação do nível é:

$$\text{Nível no fim da simulação} - \text{nível do início da simulação} = 46,807 - 40 = 6,807$$

$$\text{Logo, } K_{11} \text{ será } \left( \frac{6,807}{1} \right) = 6,807$$

$$K_{11} = 6,807$$

O procedimento é repetido para calcular o valor de  $K_{12}$ :

$$K_{12} = \frac{\Delta h_2}{\Delta u_1} = \frac{43,092 - 40}{1} = 3,092$$

$$K_{12} = 3,092$$

O processo é simétrico, todos os tanques são iguais, a posição das válvulas  $X_1$  e  $X_2$  também. Com isso,  $K_{11}$  é igual a  $K_{22}$  e  $K_{12}$  igual a  $K_{21}$ .

Como:

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{21} \cdot K_{12}}$$

Logo:

$$\lambda_{11} = 1,8323$$

Os valores de  $K_{21}$  e de  $K_{22}$  podem ser obtidos também por um gráfico. Faz-se  $\Delta F_2$  receber a entrada de um degrau unitário e  $F_1$  é mantido constante, no valor de regime permanente. Porém, como o processo é simétrico, o seu cálculo se tornou desnecessário.

A matriz RGA será então:

$$RGA = \begin{bmatrix} 1,8323 & -0,8323 \\ -0,8323 & 1,8323 \end{bmatrix}$$

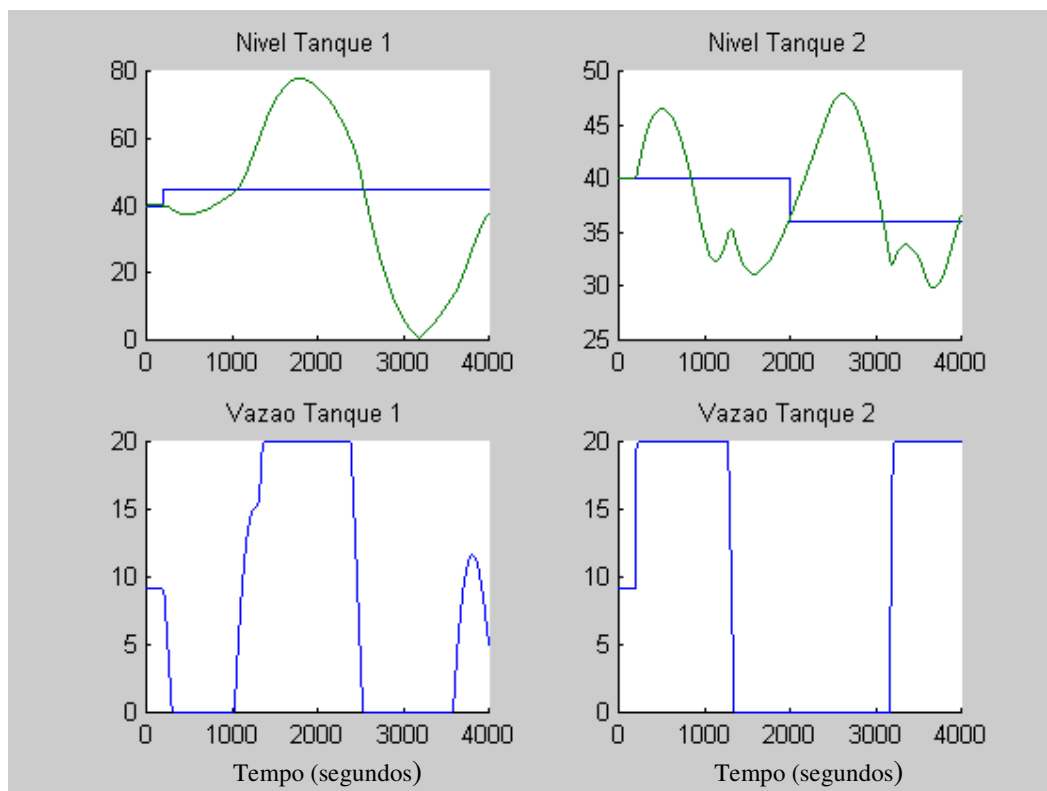
Confirma-se assim que para estas condições, com os parâmetros  $X_1$  e  $X_2$  iguais a 0,7, os pares  $F_1$  e  $h_1$ , e  $F_2$  e  $h_2$  são os pares que devem ser escolhidos para se aplicar o controle multimalha PID.

### 3.5 CONTROLADOR PID PARA PARÂMETRO X EM 0,3

Será analisada a resposta do processo frente a um novo valor do parâmetro X. O parâmetro X será ajustado em 0,3, ou seja, apenas 30% da vazão  $F_1$  irá para o tanque 1, os demais 70% desta vazão irão para o tanque 4. O mesmo acontece com a vazão  $F_2$ , onde apenas 30% irá para o tanque 2 e 70% para o tanque 3.

Inicialmente, será mantida a mesma estrutura entre processo e controlador, ou seja, pares de controle ( $F_1-h_1$ ) e ( $F_2-h_2$ ). A sintonia também foi mantida igual a do item 3.4 desta dissertação.

Para o valor de  $X_1$  e  $X_2$  em 0,3 tem-se o resultado mostrado na FIG. 3.9, para as mesmas mudanças nos “setpoints” do nível  $h_1$  e  $h_2$ .



**FIG. 3.9** Resposta do controlador PID para X em 0,3



Nota-se que o PID ajustado para o parâmetro X em 0,7 não conseguiu manter o desempenho desejado.

Em função da mudança do parâmetro operacional  $X_1$  e  $X_2$  a interação entre os dois ramos do processo mudou, e a estratégia de controle adotada (pareamento  $(F_1-h_1)$  e  $(F_2-h_2)$ ) fica instável.

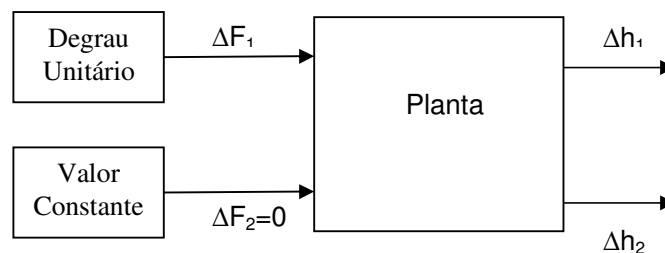
Um resultado como este já era esperado visto que os PIDs de cada ramo foram ajustados para controlarem a vazão dos seus ramos, que ficavam em quase a sua totalidade nos mesmos. Ou seja, vazão  $F_1$  atuando no ramo 1, 70% de  $F_1$  cai no tanque 1 e vazão  $F_2$  atuando no ramo 2, 70% de  $F_2$  cai no tanque 2. Com isso a situação se inverte, 70% da vazão do ramo de  $F_1$ , ramo 1, vai para o ramo 2 caindo no tanque 4 e somente 30% desta vazão cai no tanque 1, o mesmo ocorre no outro ramo. Portanto, já era esperado que o PID ajustado para o parâmetro X em 0,7 não deveria ter um bom desempenho quando o parâmetro X fosse colocado em  $X=0,3$ .

### 3.6 CÁLCULO DA MATRIZ RGA PARA X EM 0,3

A quantificação do grau de interação entre as malhas pode ser obtida através da matriz RGA como se vê a seguir.

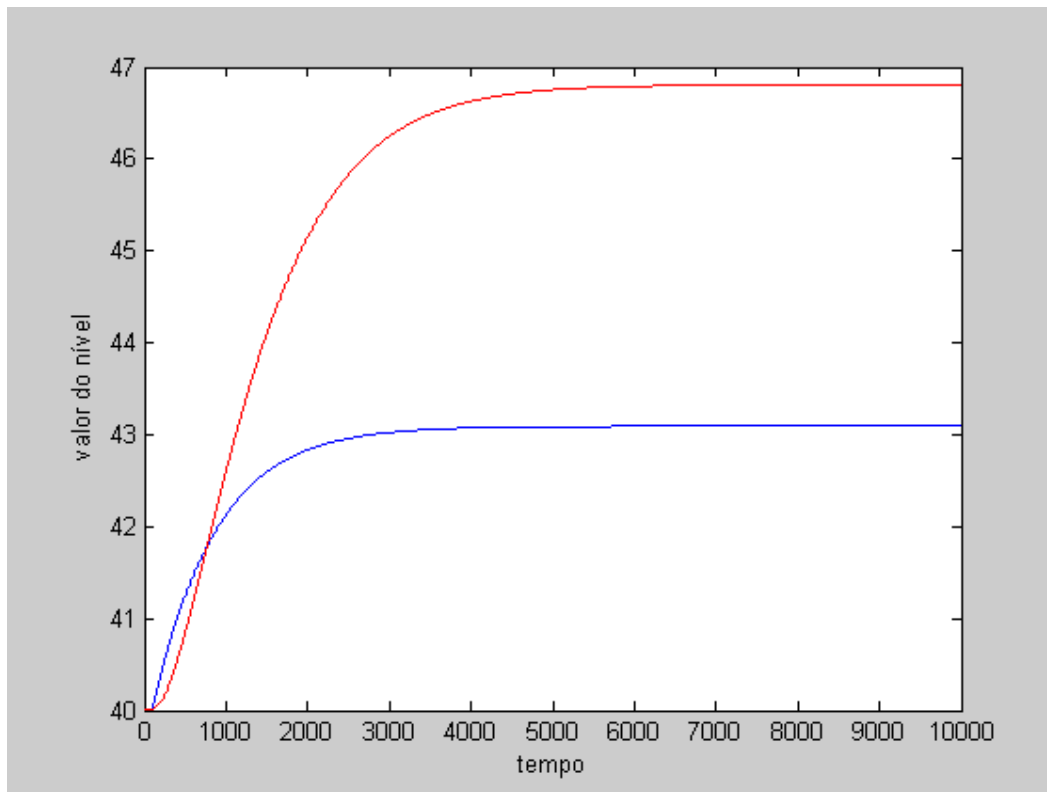
Para se analisar a interação será feita uma identificação direta utilizando o processo em malha aberta.

Primeiro será aplicado um degrau unitário em  $F_1$ , mantendo  $F_2$  constante em todo o período, temos então, FIG. 3.10:



**FIG. 3.10 Estrutura do processo onde aplicamos um degrau em  $F_1$  e mantemos  $F_2$  constante**

A FIG. 3.11, abaixo, mostra o gráfico da variação dos níveis  $h_1$  (em azul) e  $h_2$  (em vermelho), para a estrutura da FIG. 3.10.



**FIG. 3.11 Gráfico de  $h_1$  e  $h_2$  para  $F_1$  recebendo o degrau**

A primeira análise que pode-se fazer é que o sistema é estável, visto que o nível tende para um novo valor de regime permanente.

Para calcular o valor de  $K_{11}$  do gráfico faz-se o seguinte:

$$K_{ij} = \frac{\Delta h_i}{\Delta u_j} \text{ sendo } K_{11} = \frac{\Delta h_1}{\Delta u_1}$$

Onde  $\Delta h$  é a variação do nível e  $\Delta u$  é o degrau, que é unitário. A variação do nível é:

$$\text{Nível no fim da simulação} - \text{nível do início da simulação} = 43,092 - 40 = 3,092$$

$$\text{Logo, } K_{11} \text{ será } \left( \frac{3,092}{1} \right) = 3,092$$

$$K_{11} = 3,092$$

O procedimento é repetido para calcular o valor de  $K_{12}$ :

$$K_{12} = \frac{\Delta h_2}{\Delta u_1} = \frac{46,807 - 40}{1} = 6,807$$

$$K_{12}=6,807$$

O processo é simétrico, todos os tanques são iguais, a posição das válvulas  $X_1$  e  $X_2$  também. Com isso,  $K_{11}$  é igual a  $K_{22}$  e  $K_{12}$  é igual a  $K_{21}$ .

Como:

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{21} \cdot K_{12}}$$

Logo:

$$\lambda_{11} = -0,26$$

Os valores de  $K_{21}$  e de  $K_{22}$  podem ser obtidos também por um gráfico. Faz-se  $F_2$  receber a entrada de um degrau unitário e  $F_1$  é mantido constante, no valor de regime permanente. Porém, como o processo é simétrico, o seu cálculo se tornou desnecessário.

A matriz RGA será então:

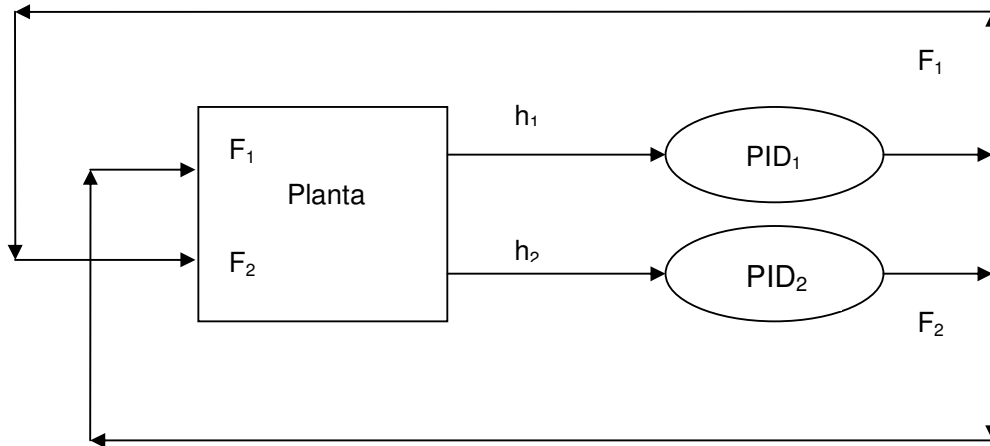
$$RGA = \begin{bmatrix} -0,26 & 1,26 \\ 1,26 & -0,26 \end{bmatrix}$$

Quando  $\lambda$  é negativo na matriz RGA, significa que as variáveis  $F_i$  e  $h_j$  têm sinais dos ganhos contrários quando em malha aberta e fechada e não devem formar pares para controle, pois o sistema pode ficar instável quando se usa controladores

lineares como o PID. Ou seja,  $(F_1-h_1)$  e  $(F_2-h_2)$  não formam pares para o controle das malhas. A matriz RGA aponta como pares de controle  $(F_1-h_2)$  e  $(F_2-h_1)$

### 3.7 NOVA ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Mudando os pares de controle do sistema,  $(F_1-h_2)$  e  $(F_2-h_1)$  obtém-se o processo mostrado na FIG. 3.12.

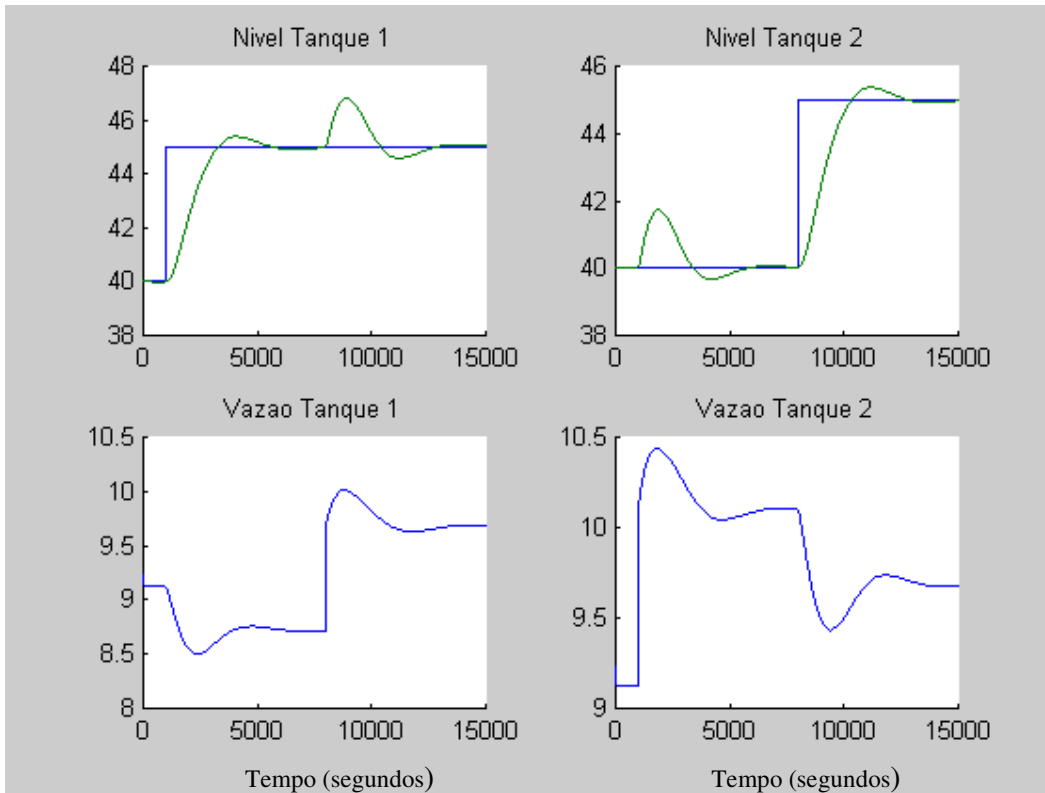


**FIG. 3.12 Processo com novos pares de controle**

O princípio para ajuste dos PIDs foi o mesmo realizado para obter a sintonia do controlador PID para o parâmetro  $X$  em 0,7, ou seja, tentativa e erro. Altera-se nos blocos dos tanques 1 e 2 os valores respectivamente de  $X_1$  e de  $X_2$  para 0,3. O "setpoint" para o tanque 1 será inicialmente em 40 e passará para 45 em 2000 segundos e do tanque 2 será inicialmente 40 passando para 45 em 8000 segundos.

Os valores dos parâmetros do controlador PID encontrados são, para o termo proporcional,  $K_p = -1$ , para o termo integral,  $\left(\frac{1}{T_i}\right) = -0,001$ , e para o termo derivativo,  $T_D = 0$ , para ambos os controladores PIDs, o controlador PID<sub>1</sub> e o controlador PID<sub>2</sub>.

O resultado obtido é mostrado na FIG. 3.13.



**FIG. 3.13 Resposta do processo para o parâmetro X em 0,3 com os novos pares de controle**

A configuração do controlador é a mesma mostrada na FIG. 3.5, apenas com a variação nos parâmetros do PID, e nos pares das variáveis controladas e manipuladas.

Pode-se perceber que o sistema demora bem mais em relação ao processo com X em 0,7, mas atinge o estado estacionário. A resposta do sistema perante qualquer perturbação é muito mais lenta. A dinâmica do processo se tornou lenta, e isso é facilmente entendido se observado pelo ponto de que anteriormente controlava-se os níveis  $h_1$  e  $h_2$  com uma vazão que “caía” diretamente nesses tanques. Com esta variação do parâmetro X, para o líquido chegar nos tanques 1 e 2, ele passa primeiro pelos tanques 3 e 4 respectivamente. Portanto existe um atraso, devido a esta capacitância (pulmão). Isto porque os tanques 3 e 4 passam a armazenar o líquido em seu interior, somente liberando segundo a sua dinâmica  $R_3\sqrt{h_3}$  e  $R_4\sqrt{h_4}$  respectivamente.

### 3.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo mostrou-se que os controladores PIDs conseguem controlar o processo caso os pares entre as variáveis controladas e manipuladas esteja adequado, segundo a matriz RGA. Caso contrário, o sistema poderá ficar instável.

Este capítulo também mostra a metodologia prática de se levantar os dados necessários à obtenção da matriz de Bristol, RGA (SEBORG, 1989).

## 4 SISTEMA DOS QUATRO TANQUES UTILIZANDO CONTROLADOR NEBULOSO

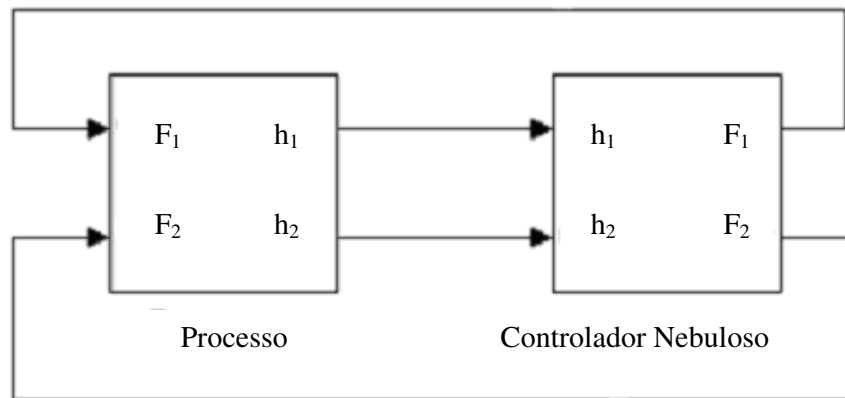
### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo o controlador PID utilizado no capítulo anterior será substituído por um controlador nebuloso. O objetivo é ajustar o controlador nebuloso para controlar este processo. Será também analisada a degradação do desempenho deste controlador frente a variações do parâmetro  $X$  (posição da válvula de três vias) tanto para o controlador nebuloso, quanto para o PID.

### 4.2 CONTROLADOR NEBULOSO COM PARÂMETRO $X$ EM 0,7

Será feita a seguir a análise do controle do processo dos quatro tanques, substituindo o controlador PID por um controlador nebuloso, para os parâmetros  $X_1$  e  $X_2$  em 0,7.

O sistema está montado da forma mostrada na FIG. 4.1.



**FIG. 4.1 Diagrama de blocos do sistema**

O controlador se apresenta como mostrado na FIG. 4.2. As variáveis de entrada são:

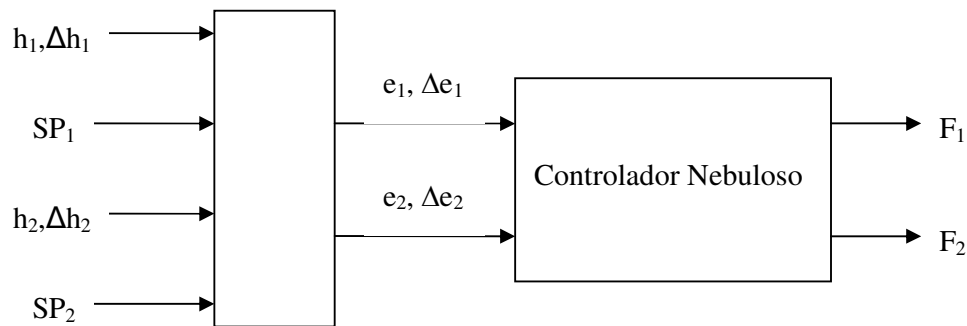
$h_i$  – nível do tanque  $i$

$\Delta h_i$  – variação do nível do tanque  $i$

$SP_i$  – “setpoint” do tanque  $i$

E as variáveis de saída são:

$F_j$  – vazão do ramo j



(Apêndice 8)

**FIG. 4.2 Diagrama de blocos do controlador nebuloso**

Este sistema foi implementado no MATLAB-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999).

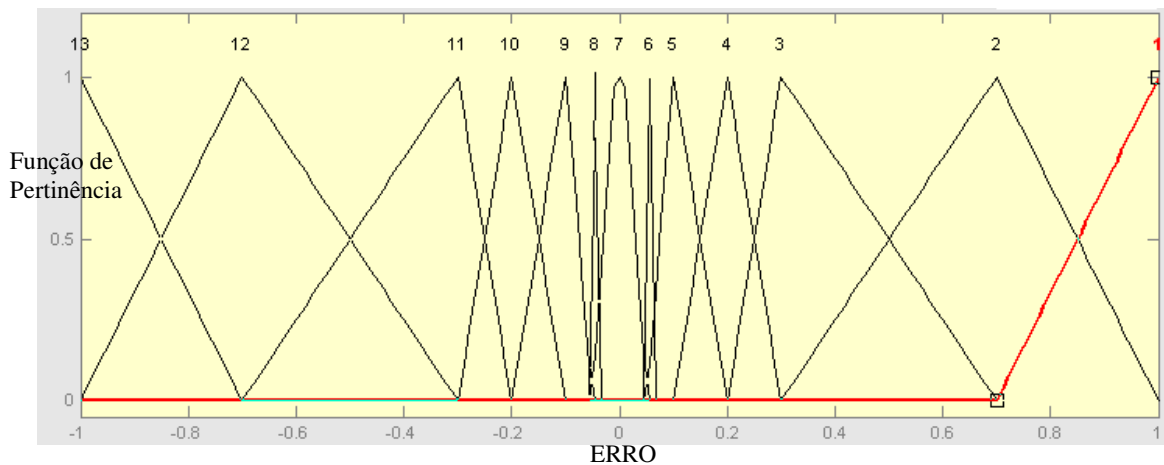
O controlador nebuloso recebe como entradas, o nível do tanque 1, o “setpoint” desejado para o tanque 1 e a variação do nível do tanque 1. Ainda, o nível do tanque 2, o “setpoint” desejado para o tanque 2, e a variação do nível do tanque 2. As variáveis de saída são as vazões das bombas ( $F_1$  e  $F_2$ ), ver FIG.4.2. Com as entradas do nível dos tanques e os “setpoints” desejados são calculados o erro E e a variação do erro DE, que são as variáveis de entrada do controlador.

Foram utilizados treze valores lingüísticos para codificação do erro, e dispostos como funções de pertinência como mostrado na FIG. 4.3, sendo cada um destes valores representados por uma função de pertinência. Os valores lingüísticos empregados são (índices de 1 à 13):

1.  $E_P\_GGG$  → Erro positivo muito muito grande
2.  $E_P\_GG$  → Erro positivo muito grande
3.  $E_P\_G$  → Erro positivo grande
4.  $E_P\_M$  → Erro positivo médio
5.  $E_P\_P$  → Erro positivo pequeno
6.  $E_P\_PP$  → Erro positivo muito pequeno
7.  $E_Z$  → Erro zero

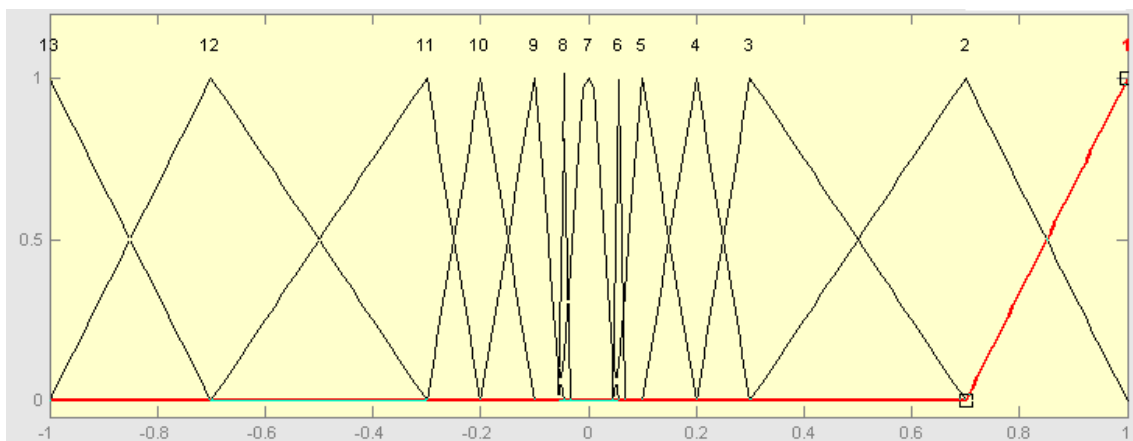


8.  $E_{N\_PP}$  → Erro negativo muito pequeno
9.  $E_{N\_P}$  → Erro negativo pequeno
10.  $E_{N\_M}$  → Erro negativo médio
11.  $E_{N\_G}$  → Erro negativo grande
12.  $E_{N\_GG}$  → Erro negativo muito grande
13.  $E_{N\_GGG}$  → Erro negativo muito muito grande



**FIG. 4.3 Funções de pertinência do erro**

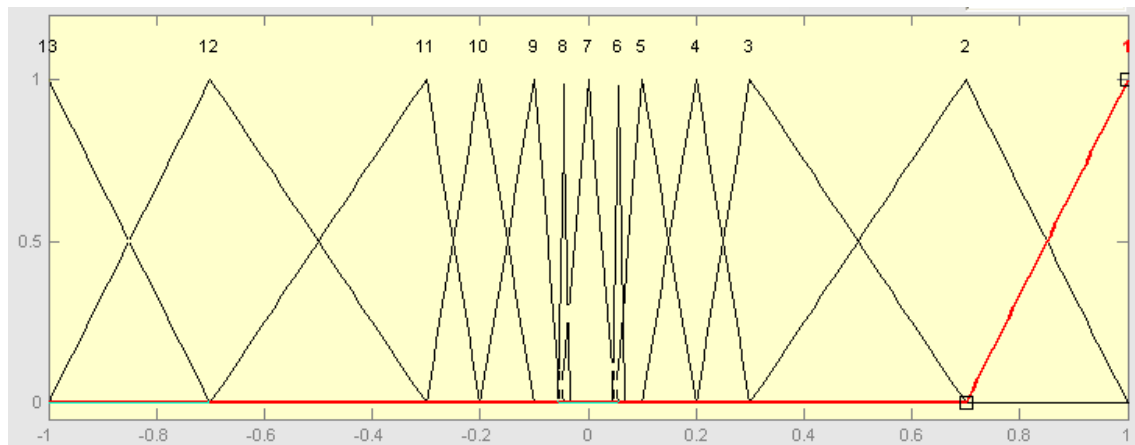
O mesmo foi feito para codificar a variação do erro nas suas respectivas variáveis lingüísticas com os mesmos índices empregados para o erro, ( $DE_{N\_GGG}$ ,  $DE_{N\_GG}$ ,  $DE_{N\_G}$ ,  $DE_{N\_M}$ ,  $DE_{N\_P}$ ,  $DE_{N\_PP}$ ,  $DE_Z$ ,  $DE_{P\_PP}$ ,  $DE_{P\_P}$ ,  $DE_{P\_M}$ ,  $DE_{P\_G}$ ,  $DE_{P\_GG}$ ,  $DE_{P\_GGG}$ ), que ficou disposto conforme a FIG. 4.4.



**FIG. 4.4 Funções de pertinência da variação do erro**

Já a decodificação de saída foi realizada com as funções de pertinência centradas da seguinte forma, e disposta como mostra a FIG. 4.5:

1.  $C\_PGGG = 1$ ;
2.  $C\_PGG = 0.7$ ;
3.  $C\_PG = 0.3$ ;
4.  $C\_PM = 0.2$ ;
5.  $C\_PP = 0.1$ ;
6.  $C\_PPP = 0.05$ ;
7.  $C\_Z = 0$ ;
8.  $C\_NPP = -0.05$ ;
9.  $C\_NP = -0.1$ ;
10.  $C\_NM = -0.2$ ;
11.  $C\_NG = -0.3$ ;
12.  $C\_NGG = -0.7$ ;
13.  $C\_NGGG = -1$ ;



**FIG. 4.5 Funções de pertinência de saída**

Conforme visto no capítulo 2, a estrutura de um controlador nebuloso deve possuir um conversor das variáveis analógicas para variáveis nebulosas, uma máquina de inferência e um conversor para as variáveis numéricas de saída. O conversor para variáveis nebulosas é a parte do controlador que irá calcular o valor dos graus de pertinência das funções de pertinência do erro  $E$  e da variação do erro  $DE$  associados às grandezas de entrada. A máquina de inferência nebulosa irá gerar as ativações das funções de pertinência de saída através das regras do controlador. Já o conversor para variáveis numéricas é o responsável por transformar as variáveis lingüísticas de saída geradas pela máquina de inferência

nebulosa em um valor bem definido da variável de saída, que neste caso é a vazão para o tanque.

As regras empregadas pelo controlador nebuloso para controle do processo dos quatro tanques, montadas no Matlab-Simulink, (MATLAB USER`S GUIDE, 1999), são em número de vinte e seis regras conforme descrito abaixo, cabe ressaltar que o número possível de regras para este processo é de 169, que corresponde ao número de variáveis linguísticas, 13, elevado a dimensão do espaço de entradas, 2,  $13^2$  :

Regras para o erro “E”

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| DU_PGGG = DU_PGGG + E_PGGG; | %regra 1  |
| DU_PGG = DU_PGG + E_PGG;    | %regra 2  |
| DU_PG = DU_PG + E_PG;       | %regra 3  |
| DU_PM = DU_PM + E_PM;       | %regra 4  |
| DU_PP = DU_PP + E_PP;       | %regra 5  |
| DU_PPP = DU_PPP + E_PPP;    | %regra 6  |
| DU_Z = DU_Z + E_Z;          | %regra 7  |
| DU_NPP = DU_NPP + E_NPP;    | %regra 8  |
| DU_NP = DU_NP + E_NP;       | %regra 9  |
| DU_NM = DU_NM + E_NM;       | %regra 10 |
| DU_NG = DU_NG + E_NG;       | %regra 11 |
| DU_NGG = DU_NGG + E_NGG;    | %regra 12 |
| DU_NGGG = DU_NGGG + E_NGGG; | %regra 13 |

Regras para a variação do erro “DE”

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| DU_PGGG = DU_PGGG + DE_PGGG; | %regra 14 |
| DU_PGG = DU_PGG + DE_PGG;    | %regra 15 |
| DU_PG = DU_PG + DE_PG;       | %regra 16 |
| DU_PM = DU_PM + DE_PM;       | %regra 17 |
| DU_PP = DU_PP + DE_PP;       | %regra 18 |
| DU_PPP = DU_PPP + DE_PPP;    | %regra 19 |
| DU_Z = DU_Z + DE_Z;          | %regra 20 |
| DU_NPP = DU_NPP + DE_NPP;    | %regra 21 |
| DU_NP = DU_NP + DE_NP;       | %regra 22 |

DU\_NM = DU\_NM + DE\_NM; %regra 23

DU\_NG = DU\_NG + DE\_NG; %regra 24

DU\_NGG = DU\_NGG + DE\_NGG; %regra 25

DU\_NGGG = DU\_NGGG + DE\_NGGG; %regra 26

Outra maneira de visualizar esta base de conhecimentos é a mostrada na TAB.

4.1.

**TAB. 4.1 Regras do controlador nebuloso**

| $\Delta E$<br>E | NGGG | NGG | NG | NM | NP | NPP | Z    | PPP | PP | PM | PG | PGG | PGGG |
|-----------------|------|-----|----|----|----|-----|------|-----|----|----|----|-----|------|
| NGGG            |      |     |    |    |    |     | NGGG |     |    |    |    |     |      |
| NGG             |      |     |    |    |    |     | NGG  |     |    |    |    |     |      |
| NG              |      |     |    |    |    |     | NG   |     |    |    |    |     |      |
| NM              |      |     |    |    |    |     | NM   |     |    |    |    |     |      |
| NP              |      |     |    |    |    |     | NP   |     |    |    |    |     |      |
| NPP             |      |     |    |    |    |     | NPP  |     |    |    |    |     |      |
| Z               | NGGG | NGG | NG | NM | NP | NPP | Z    | PPP | PP | PM | PG | PGG | PGGG |
| PPP             |      |     |    |    |    |     | PPP  |     |    |    |    |     |      |
| PP              |      |     |    |    |    |     | PP   |     |    |    |    |     |      |
| PM              |      |     |    |    |    |     | PM   |     |    |    |    |     |      |
| PG              |      |     |    |    |    |     | PG   |     |    |    |    |     |      |
| PGG             |      |     |    |    |    |     | PGG  |     |    |    |    |     |      |
| PGGG            |      |     |    |    |    |     | PGGG |     |    |    |    |     |      |

Pode-se ainda representar as regras da seguinte forma:

**SE** {E é PGGG} **ENTÃO** { $\Delta U$  é PGGG}

**SE** {E é PGG} **ENTÃO** { $\Delta U$  é PGG}

**SE** {E PG} **ENTÃO** { $\Delta U$  é PG}

**SE** {E PM} **ENTÃO** { $\Delta U$  é PM}

**SE** {E PP} **ENTÃO** { $\Delta U$  é PP}

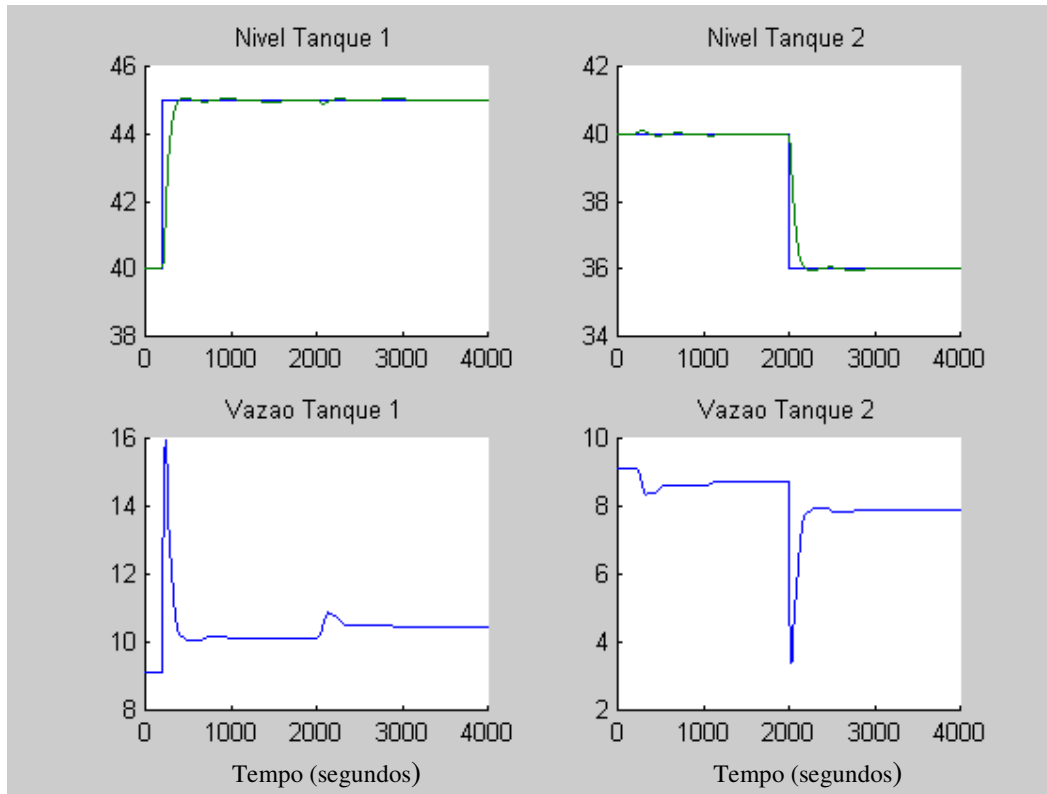
**SE** {E PPP} **ENTÃO** {ΔU é PPP}  
**SE** {E Z} **ENTÃO** {ΔU é Z}  
**SE** {E NPP} **ENTÃO** {ΔU é NPP}  
**SE** {E NP} **ENTÃO** {ΔU é NP}  
**SE** {E NM} **ENTÃO** {ΔU é NM}  
**SE** {E NG} **ENTÃO** {ΔU é NG}  
**SE** {E NGG} **ENTÃO** {ΔU é NGG}  
**SE** {E NGGG} **ENTÃO** {ΔU é NGGG}

**SE** {ΔE é PGGG} **ENTÃO** {ΔU é PGGG}  
**SE** {ΔE é PGG} **ENTÃO** {ΔU é PGG}  
**SE** {ΔE PG} **ENTÃO** {ΔU é PG}  
**SE** {ΔE PM} **ENTÃO** {ΔU é PM}  
**SE** {ΔE PP} **ENTÃO** {ΔU é PP}  
**SE** {ΔE PPP} **ENTÃO** {ΔU é PPP}  
**SE** {ΔE Z} **ENTÃO** {ΔU é Z}  
**SE** {ΔE NPP} **ENTÃO** {ΔU é NPP}  
**SE** {ΔE NP} **ENTÃO** {ΔU é NP}  
**SE** {ΔE NM} **ENTÃO** {ΔU é NM}  
**SE** {ΔE NG} **ENTÃO** {ΔU é NG}  
**SE** {ΔE NGG} **ENTÃO** {ΔU é NGG}  
**SE** {ΔE NGGG} **ENTÃO** {ΔU é NGGG}

A regra um significa que se o erro for positivo muito muito grande (PGGG) então a saída do controlador deverá variar de forma positiva muito muito grande.

As variáveis erro e variação do erro são normalizadas entre [-1, 1]. Esta normalização cria implicitamente fatores de escala para as variáveis associadas. Implementou-se, de forma explícita, um ganho que representa estes fatores de escala e multiplica a entrada, com isso criou-se um grau de flexibilidade maior para a sintonia do sistema. Desta forma, esses fatores de escala passaram a ser parâmetros de sintonia do controlador nebuloso, fazendo com que se excursionem mais ou menos sobre as funções de pertinência.

Os resultado do controlador nebuloso para os parâmetros  $X_1$  e  $X_2$  em 0,7, é apresentada na FIG. 4.6. As mudanças nos “setpoints” são as mesmas descritas no item 3.3 desta dissertação.

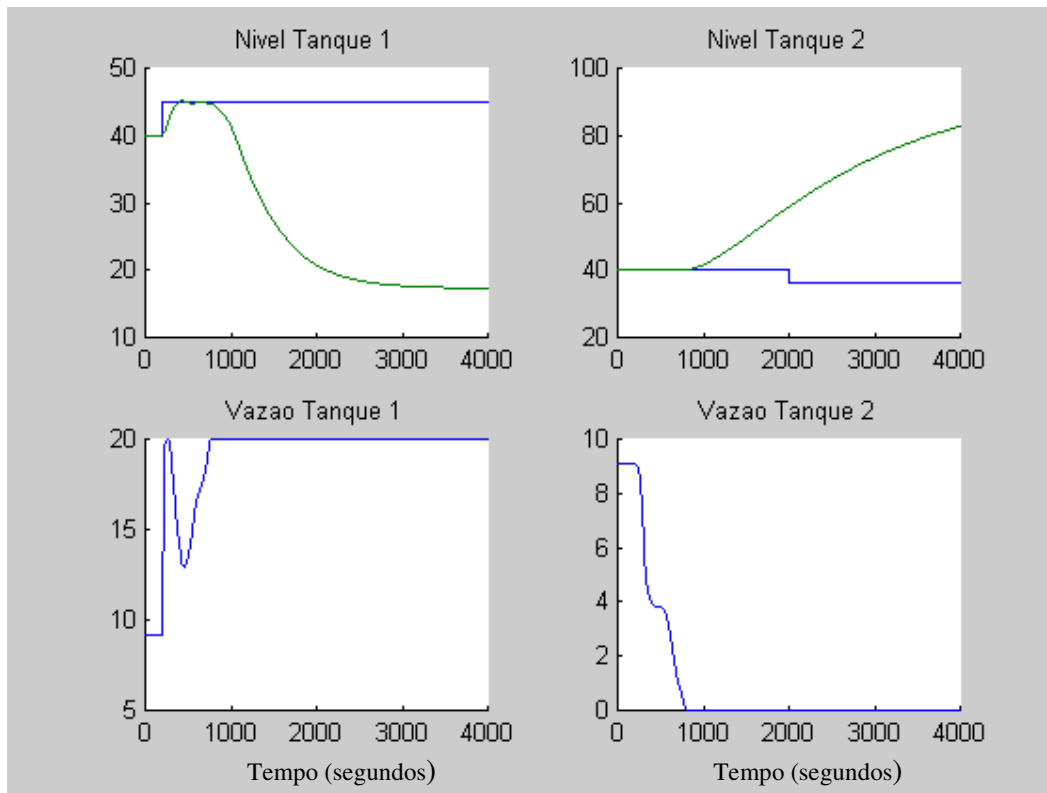


**FIG. 4.6 Resposta do controlador nebuloso com parâmetro X em 0,7**

Comparando o desempenho do sistema utilizando o controlador PID (FIG. 3.6), com este sistema utilizando o controlador nebuloso, observa-se que ambos têm um bom comportamento e controlam o processo quando o parâmetro X está em 0,7.

#### 4.3 CONTROLADOR NEBULOSO PARA O PARÂMETRO X EM 0,3

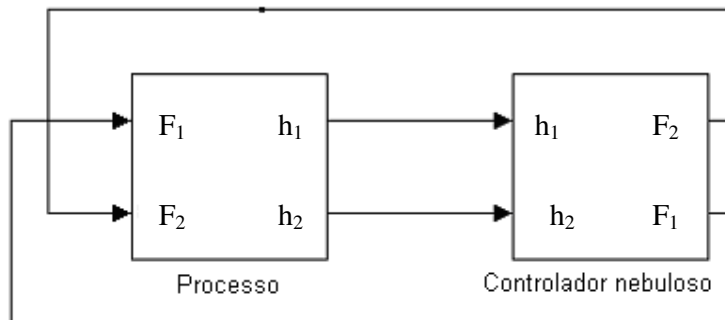
Com o parâmetro X posicionado em 0,3 obteve-se a resposta descrita pelo gráfico da FIG. 4.7, para as mesmas variações de “setpoint” utilizadas para simulação do processo com parâmetro X posicionado em 0,7.



**FIG. 4.7 Resposta ao controlador nebuloso com parâmetro X em 0,3**

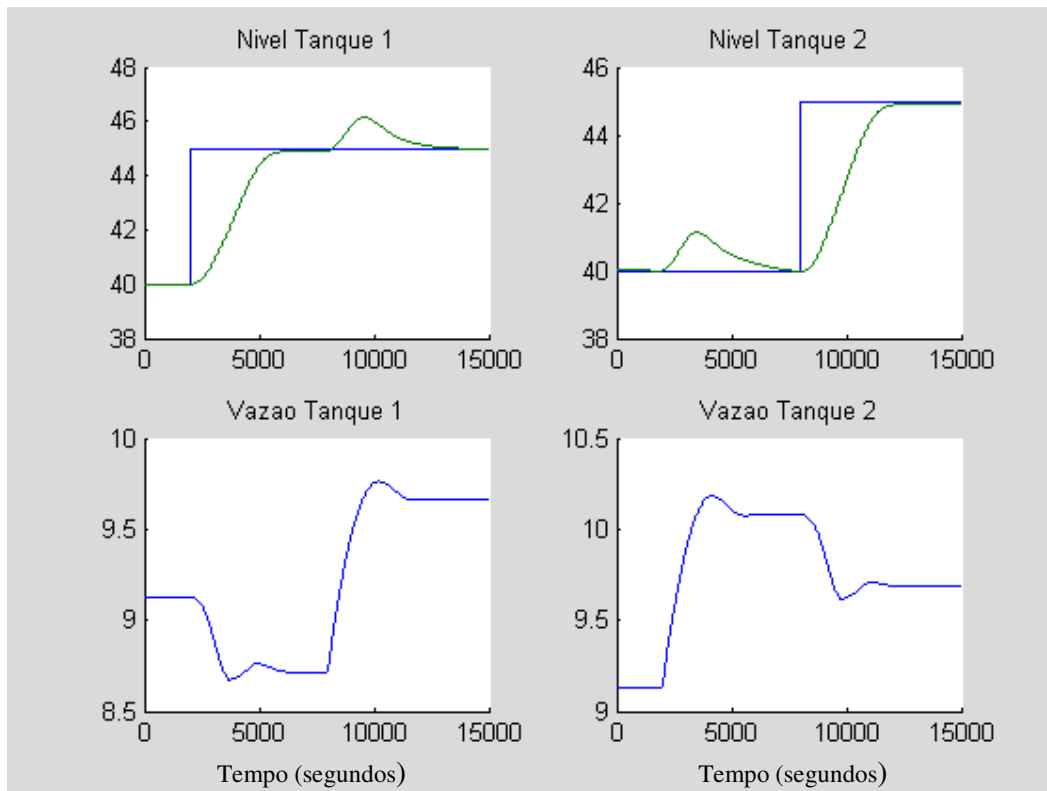
Pode-se perceber que o sistema utilizando o controlador nebuloso possui o mesmo comportamento que o sistema utilizando o controlador PID. Para parâmetro X ajustado em 0,3, o controlador não conseguiu controlar o processo, quando se usa o ajuste e a estrutura obtida para o parâmetro X=0,7.

No capítulo anterior foi visto que para parâmetro X ajustado em 0,3, os pares de controle deveriam ser trocados para garantir a estabilidade, ou seja,  $F_1$  com  $h_2$  e  $F_2$  com  $h_1$ , FIG.4.8.



**FIG. 4.8 Processo com pares de controle trocados**

Com os pares de controle corretos, e reajustando o controlador, com as mesmas variáveis de entrada e de saída, obteve-se o resultado disposto na FIG. 4.9. Pode-se perceber que o processo possui uma dinâmica mais lenta, como já foi constatado com o controlador PID, mas o processo consegue chegar ao seu equilíbrio.



**FIG. 4.9** Resposta ao controlador nebuloso com parâmetro X em 0,3 e com pares  $(F_1-h_2)$  e  $(F_2-h_1)$

#### 4.4 ÍNDICES DE DESEMPENHO DOS CONTROLADORES (ISE E ITAE)

Foram utilizados dois índices para análise da degradação do desempenho dos controladores quando ocorre uma perturbação ou variação no parâmetro X do processo, o ISE e o ITAE (OGATA, 1998, p.752). Estes índices são:

$$ISE = \int e^2 dt ; \text{Integral square error, ou simplesmente integral do erro quadrático.}$$

e,

$$ITAE = \int |e| dt ; \text{Integral time absolute error}$$



#### 4.4.1 ROBUSTEZ DO CONTROLADOR PID

Primeiramente, será analisada a variação dos índices para o controlador PID. As tabelas TAB. 4.2 e TAB. 4.3 mostram os resultados, quando os parâmetros X do processo variam. A mudança de “setpoint” e os tempos de simulação são os mesmos mostrados anteriormente.

TAB. 4.2 Valores ISE e ITAE para o PID ajustado com parâmetro X em 0,3

|         | Valor de X | ISE 1                                  | ITAE 1                                 | ISE 2                                  | ITAE 2                                 |
|---------|------------|--|--|--|--|
|         | 0,0        | $1,5171 \times 10^4$                   | $1,7556 \times 10^7$                   | $1,5169 \times 10^4$                   | $4,9970 \times 10^7$                   |
|         | 0,1        | $1,5704 \times 10^4$                   | $2,7749 \times 10^7$                   | $1,5678 \times 10^4$                   | $5,2153 \times 10^7$                   |
| PID 0,3 | 0,2        | $1,7727 \times 10^4$                   | $3,7797 \times 10^7$                   | $1,7374 \times 10^4$                   | $5,6212 \times 10^7$                   |
|         | <b>0,3</b> | <b><math>2,2358 \times 10^4</math></b> | <b><math>4,9192 \times 10^7</math></b> | <b><math>2,1477 \times 10^4</math></b> | <b><math>6,3898 \times 10^7</math></b> |
|         | 0,4        | $3,7103 \times 10^4$                   | $7,7943 \times 10^7$                   | $3,5464 \times 10^4$                   | $9,4462 \times 10^7$                   |
|         | 0,5        | $12,466 \times 10^4$                   | $1,5301 \times 10^8$                   | $9,3545 \times 10^4$                   | $1,2842 \times 10^8$                   |

TAB. 4.3 valores ISE e ITAE para o PID ajustado com parâmetro X em 0,7

|         | Valor de X | ISE 1           | ITAE 1                                 | ISE 2           | ITAE 2                                 |
|---------|------------|-----------------|--|-----------------|--|
|         | 0,5        | 1.115,1         | $1,9698 \times 10^6$                   | 809,215         | $1,9424 \times 10^6$                   |
|         | 0,6        | 786,8534        | $3,7201 \times 10^5$                   | 511,9637        | $6,9785 \times 10^5$                   |
| PID 0,7 | <b>0,7</b> | <b>678,3206</b> | <b><math>2,6159 \times 10^5</math></b> | <b>436,9374</b> | <b><math>6,0638 \times 10^5</math></b> |
|         | 0,8        | 599,4809        | $2,0318 \times 10^5$                   | 384,6233        | $5,5599 \times 10^5$                   |
|         | 0,9        | 537,3276        | $1,4486 \times 10^5$                   | 343,7363        | $4,9750 \times 10^5$                   |
|         | 1,0        | 486,5561        | $8,8088 \times 10^4$                   | 310,6749        | $4,444 \times 10^5$                    |

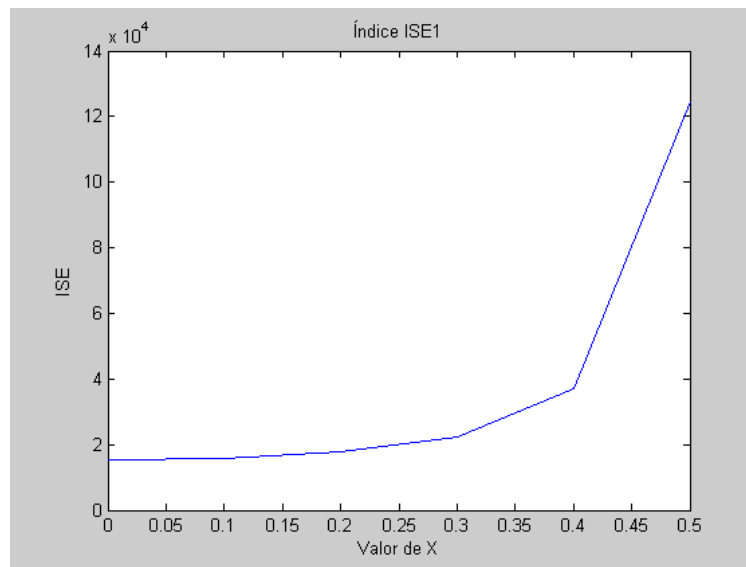
Como existem dois controladores independentes onde cada um controla uma malha de vazão, foram instituídos um índice ISE e um índice ITAE para cada malha. Para a malha do controlador 1, obteve-se os índices ISE1 e ITAE1, e para a malha do controlador 2, obteve-se os índices ISE2 e ITAE2. Ou seja, ISE1 e ITAE1 são os índices de desempenho do controlador 1, enquanto ISE2 e ITAE2 são os índices de desempenho para o controlador 2.

Serão vistos a seguir alguns gráficos que demonstrarão a variação dos índices em relação ao valor do parâmetro X.

O teste feito é o mesmo experimento realizado anteriormente, variação do “setpoint” da malha 1 em 2000 segundos e do “setpoint” da malha 2 em 8000

segundos, com tempo total de simulação de 15000 segundos para o PID ajustado para 0,3 e variação do “setpoint” da malha 1 em 200 segundos e do “setpoint” da malha 2 em 2000 segundos com tempo total de simulação de 4000 segundos para o PID ajustado para 0,7. Durante este tempo são calculados os valores dos índices. O mesmo teste, mudança de “setpoint”, é feito para vários valores do parâmetro X.

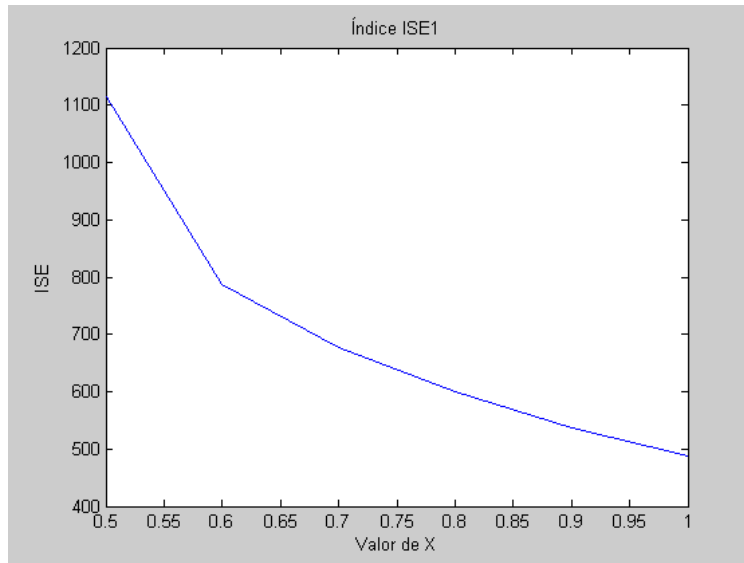
A FIG. 4.10 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ISE1, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.10 Índice ISE1 para o PID ajustado com parâmetro X em 0,3**

Observa-se que o desempenho até melhora quando o parâmetro X sai de 0,3 e se aproxima de 0,0, isto acontece porque o percentual da vazão 1 que vai para o tanque 4 aumenta, bem como também aumenta o percentual da vazão 2 que vai para o tanque 3. Isto facilita o controle, pois, não há acoplamento entre as malhas. O inverso pode ser observado quando se varia o valor do parâmetro X de 0,3 até 0,5, percebe-se uma degradação no desempenho. Isto é, para uma mesma sintonia, quando o processo muda, variação do parâmetro X, o desempenho do controlador se deteriora.

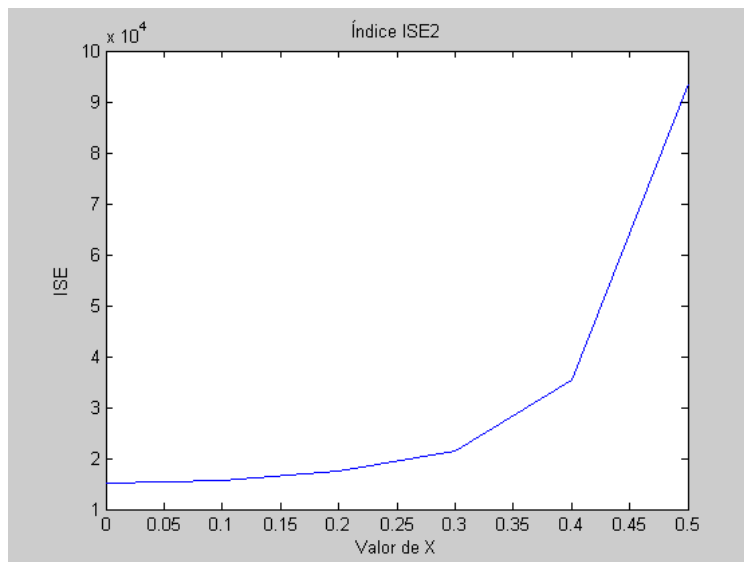
A FIG. 4.11 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ISE1, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.11 Índice ISE1 para o PID ajustado com parâmetro X em 0,7**

Observa-se que o desempenho melhora conforme o parâmetro X vai se aproximando de 1,0, e piora conforme o parâmetro X vai se aproximando de 0,5. Quando o parâmetro X está em 1,0, a vazão 1 vai em sua totalidade para o tanque 1, e a vazão 2 vai em sua totalidade para o tanque 2. Conforme o parâmetro X diminui, aumenta a interação entre as malhas, dificultando o seu controle, pois, aumenta o acoplamento entre as malhas.

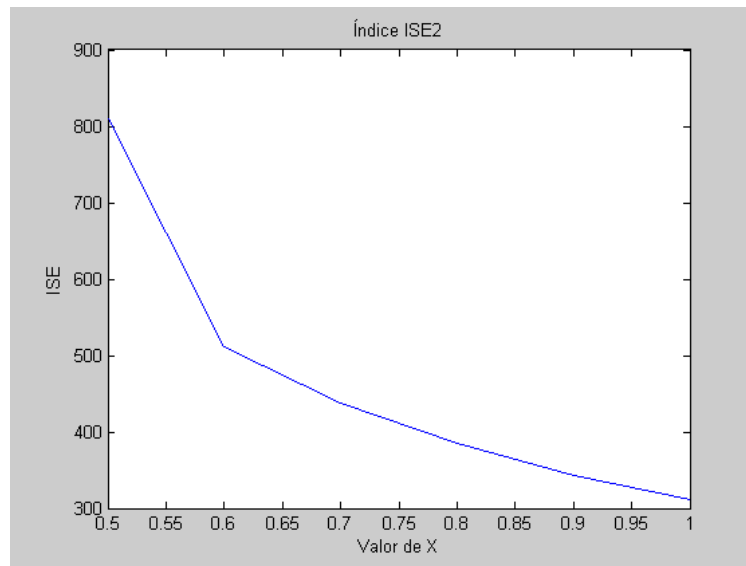
A FIG. 4.12 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ISE2, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.12 Índice ISE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,3**

Observa-se, como para o índice ISE1, que conforme o parâmetro X se afasta de 0,3 em direção de 0,0, o desempenho melhora, e conforme o parâmetro X vai em direção de 0,5, o desempenho degrada.

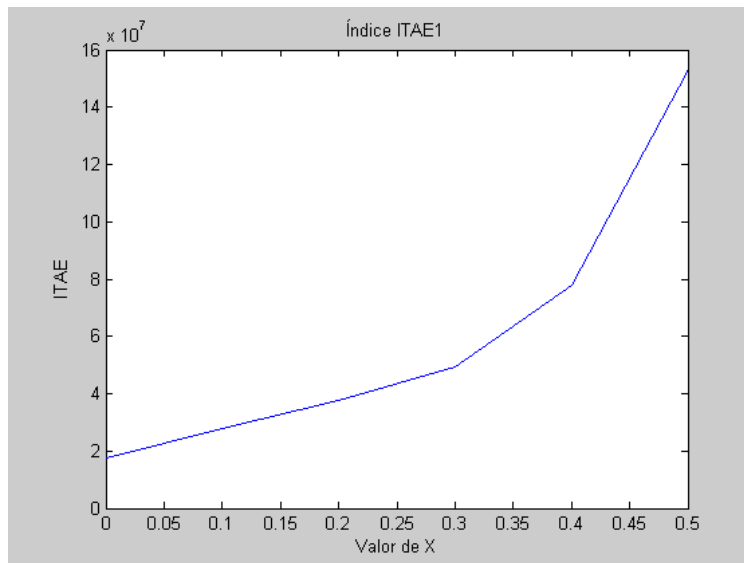
A FIG. 4.13 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ISE2, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.13 Índice ISE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,7**

Como para o índice ISE1, percebe-se que para valores do parâmetro X variando de 0,7 até 1,0, o desempenho melhora, enquanto que, variando o parâmetro X de 0,7 até 0,5, o seu desempenho degrada.

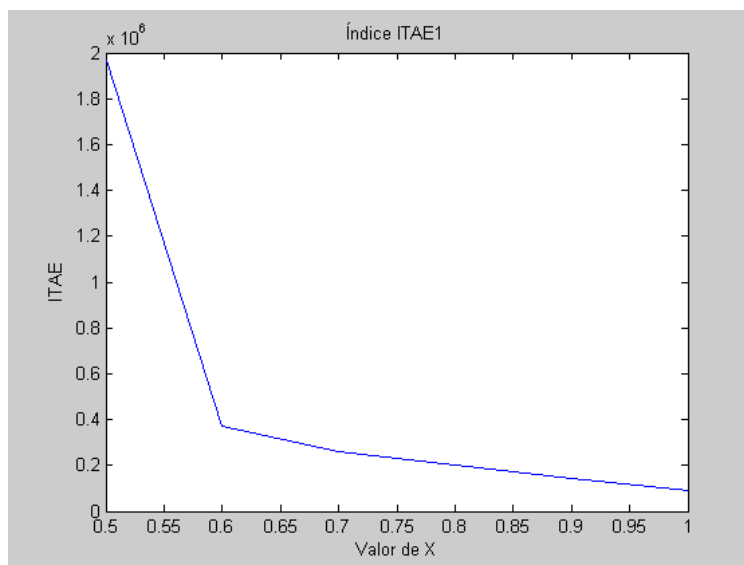
A FIG. 4.14 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ITAE1, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.14 Índice ITAE 1 para PID ajustado com parâmetro X em 0,3**

Conforme visto no índice ISE1 do PID ajustado para o parâmetro X em 0,3, o desempenho do controlador PID melhora conforme o parâmetro X varia de 0,3 até 0,0, e degrada conforme o parâmetro X varia de 0,3 até 0,5.

A FIG. 4.15 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ITAE1, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.

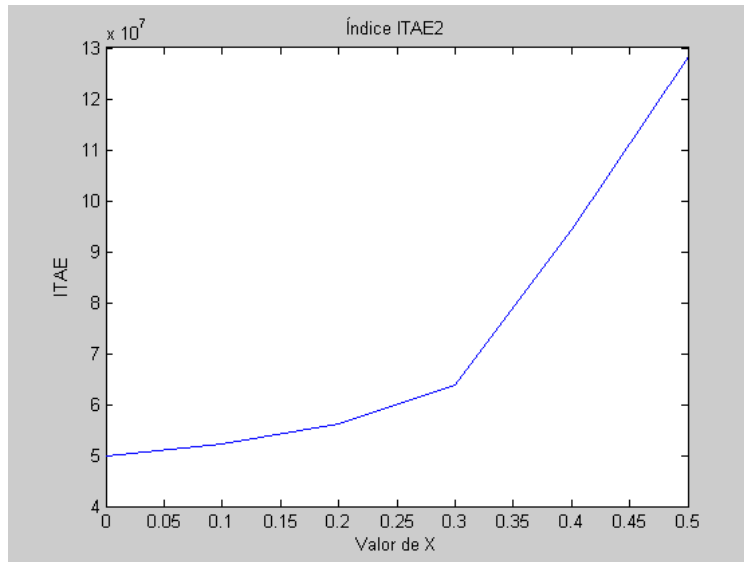


**FIG. 4.15 Índice ITAE 1 para PID ajustado com parâmetro X em 0,7**

A mesma conclusão obtida para o controlador PID, pelo índice ISE1, de parâmetro X em 0,7 pode ser observada com o índice ITAE1. Conforme o parâmetro

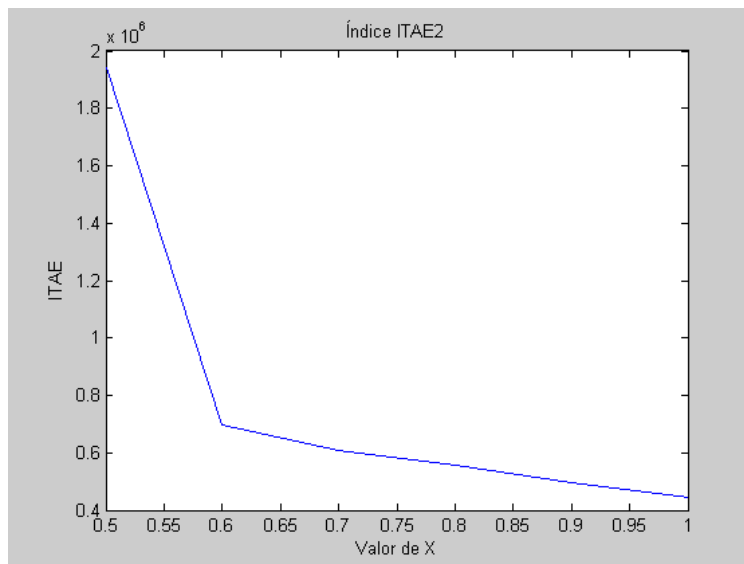
X excursiona de 0,7 até 1,0, o desempenho melhora, e quando o parâmetro X excursiona de 0,7 até 0,5, o desempenho degrada.

A FIG. 4.16 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ITAE2, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.16 Índice ITAE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,3**

A FIG. 4.17 mostra o desempenho do controlador PID, pelo índice ITAE2, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.17 Índice ITAE 2 para PID ajustado com parâmetro X em 0,7**

Novamente percebe-se que quando o parâmetro X varia de 0,7 para 1,0, o desempenho melhora, e de 0,7 para 0,5, o desempenho degrada.

Como se pode perceber quanto mais próximo o parâmetro X está de 0,5, os índices ISE e ITAE sobem drasticamente e quanto mais perto de 1,0 para o PID ajustado para o parâmetro X em 0,7 e 0,0 para o PID ajustado para o parâmetro X em 0,3 os índices diminuem. Isto é explicado pelo fato de em 0 e em 1 só existe um caminho para o controle do nível, ou seja, as vazões não se dividem, ou melhor, não há acoplamento.

#### 4.4.2 ROBUSTEZ DO CONTROLADOR NEBULOSO

Será analisada a seguir a variação dos índices para o controlador nebuloso. As tabelas TAB. 4.4 e TAB. 4.5 mostram os resultados, quando os parâmetros X do processo variam. A mudança de “setpoint” e os tempos de simulação são os mesmos mostrados anteriormente.

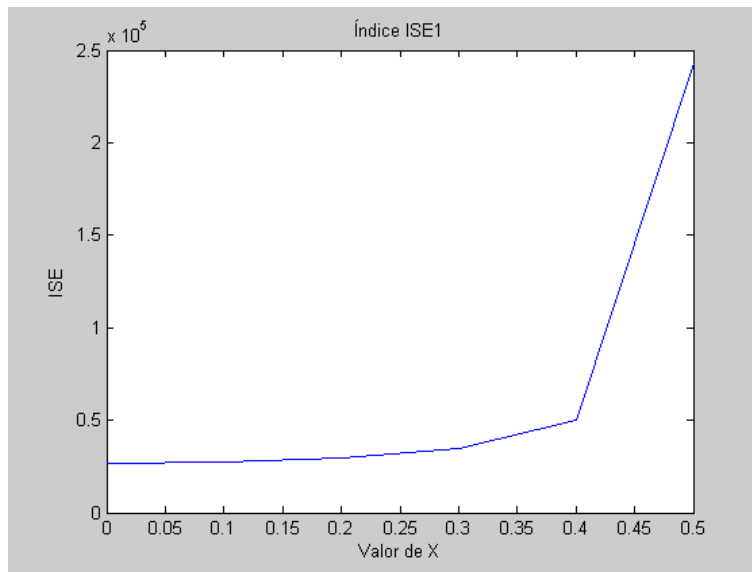
**TAB. 4.4 Valores ISE E ITAE para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3**

|             | Valor de X | ISE 1                 | ITAE 1                       | ISE 2                  | ITAE 2                       |
|-------------|------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
|             | 0,0        | 26656                 | 1,6047X10 <sup>7</sup>       | 26785                  | 7,9641 X10 <sup>7</sup>      |
|             | 0,1        | 27749                 | 2,3796X10 <sup>7</sup>       | 27588                  | 8,4251X10 <sup>7</sup>       |
| Controlador | 0,2        | 29817                 | 2,9204X10 <sup>7</sup>       | 29537                  | 8,7688X10 <sup>7</sup>       |
| Nebuloso    | <b>0,3</b> | <b>34495</b>          | <b>4,0654X10<sup>7</sup></b> | <b>35181</b>           | <b>9,6594X10<sup>7</sup></b> |
|             | 0,4        | 49980                 | 6,7757X10 <sup>7</sup>       | 47792                  | 1,2221 X10 <sup>8</sup>      |
|             | 0,5        | 2,428X10 <sup>5</sup> | 1,4766X10 <sup>8</sup>       | 2,2165X10 <sup>5</sup> | 1,9169X10 <sup>8</sup>       |

**TAB. 4.5 valores ISE E ITAE para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7**

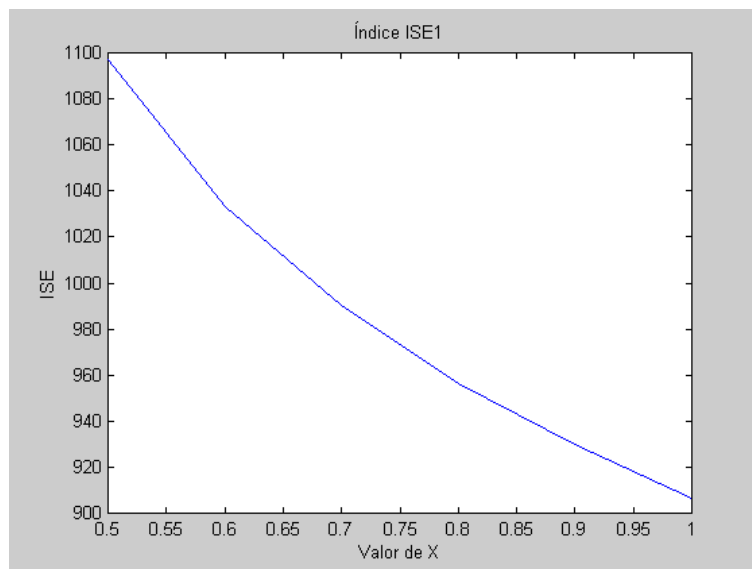
|             | Valor de X | ISE 1         | ITAE 1                       | ISE 2         | ITAE 2                       |
|-------------|------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
|             | 0,5        | 1097,2        | 4,4867X10 <sup>5</sup>       | 728,75        | 9,1326X10 <sup>5</sup>       |
|             | 0,6        | 1033,4        | 3,0059X10 <sup>5</sup>       | 622,68        | 6,9086X10 <sup>5</sup>       |
| Controlador | <b>0,7</b> | <b>990,23</b> | <b>2,7952X10<sup>5</sup></b> | <b>602,43</b> | <b>6,8282X10<sup>5</sup></b> |
| Nebuloso    | 0,8        | 956,42        | 2,3403X10 <sup>5</sup>       | 593,36        | 6,736X10 <sup>5</sup>        |
|             | 0,9        | 929,98        | 2,6012X10 <sup>5</sup>       | 563,15        | 6,6318X10 <sup>5</sup>       |
|             | 1,0        | 906,71        | 1,9439X10 <sup>5</sup>       | 560,1         | 6,1512X10 <sup>5</sup>       |

A FIG. 4.18 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ISE1, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.18 Índice ISE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3**

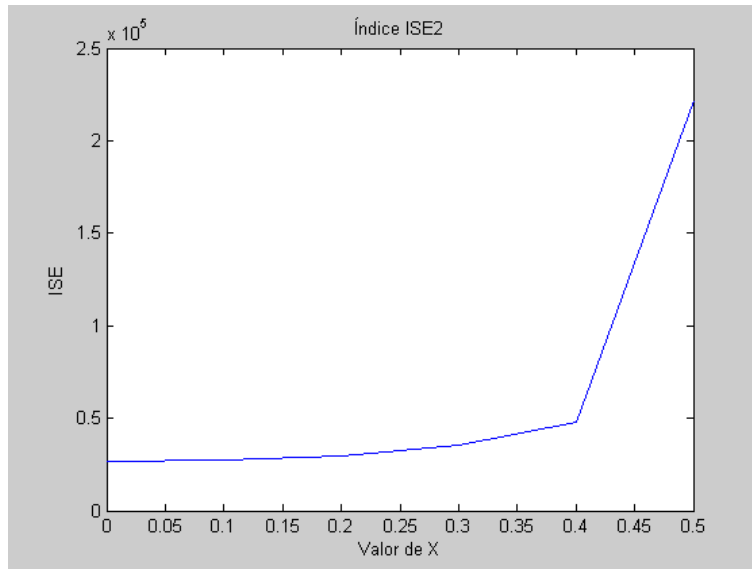
A FIG. 4.19 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ISE1, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.19 Índice ISE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7**

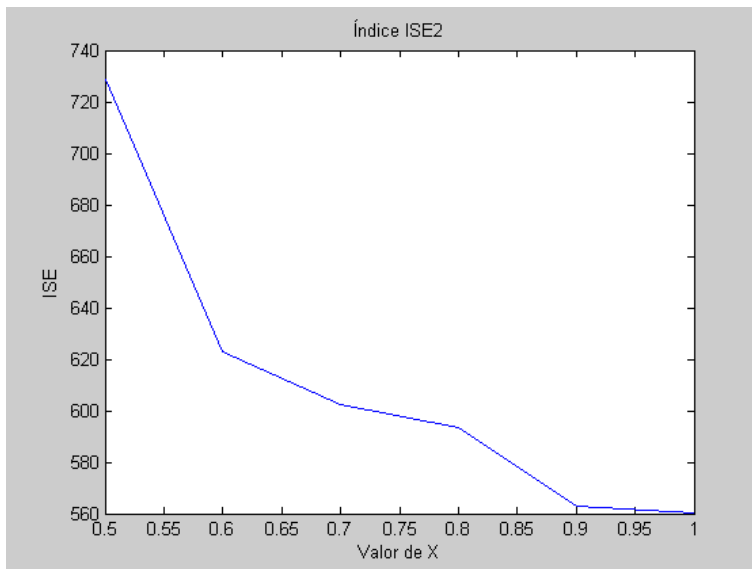


A FIG. 4.20 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ISE2, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



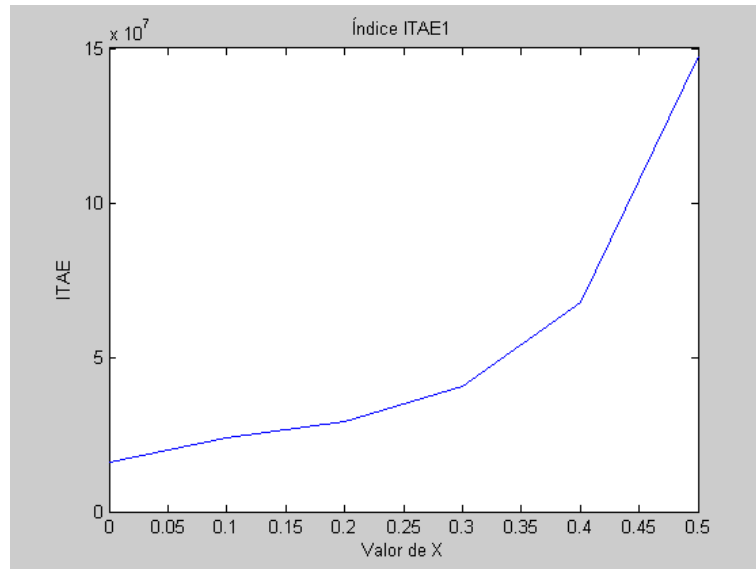
**FIG. 4.20 Índice ISE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3**

A FIG. 4.21 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ISE2, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.



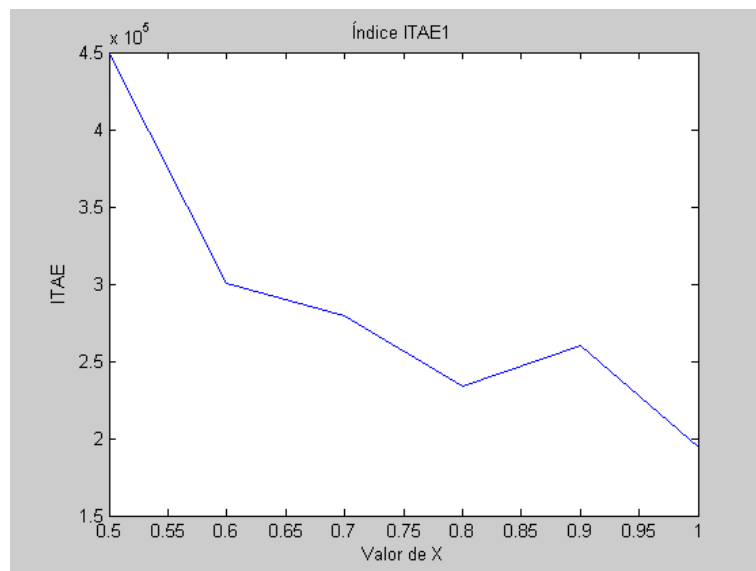
**FIG. 4.21 Índice ISE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7**

A FIG. 4.22 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ITAE1, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.22 Índice ITAE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3**

A FIG. 4.23 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ITAE1, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.

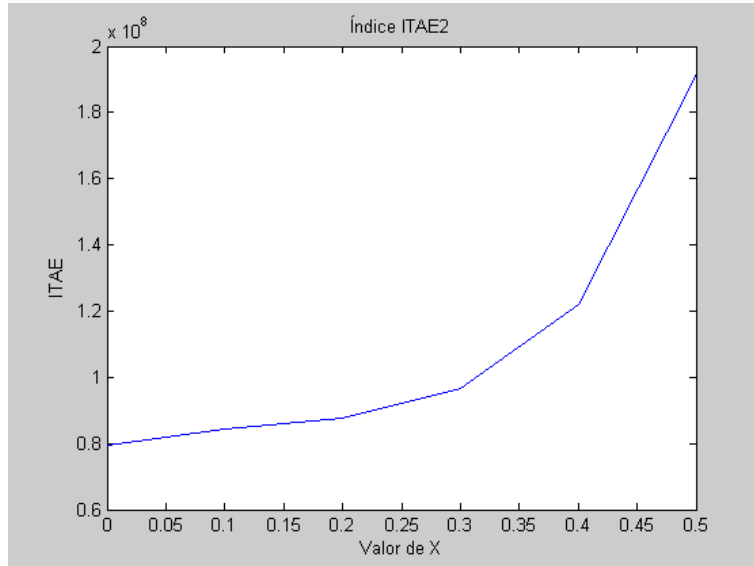


**FIG. 4.23 Índice ITAE1 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7**

A Variação encontrada na FIG. 4.23 para o parâmetro X entre 0,8 e 1,0 é devido ao fato do controlador nebuloso não ser linear. Era esperado que entre 0,8 e 1,0 o

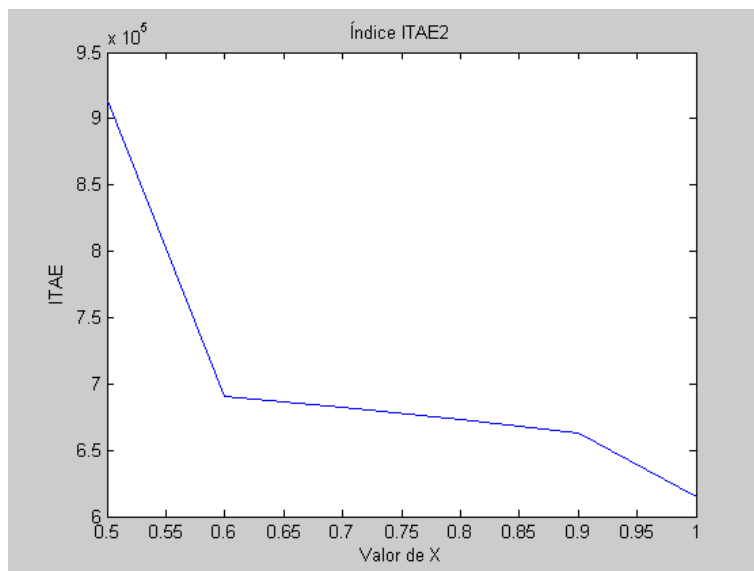
desempenho do controlador fosse melhorando conforme o parâmetro X fosse se aproximando de 1,0.

A FIG. 4.24 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ITAE2, ajustado para o parâmetro X em 0,3, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.24 Índice ITAE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,3**

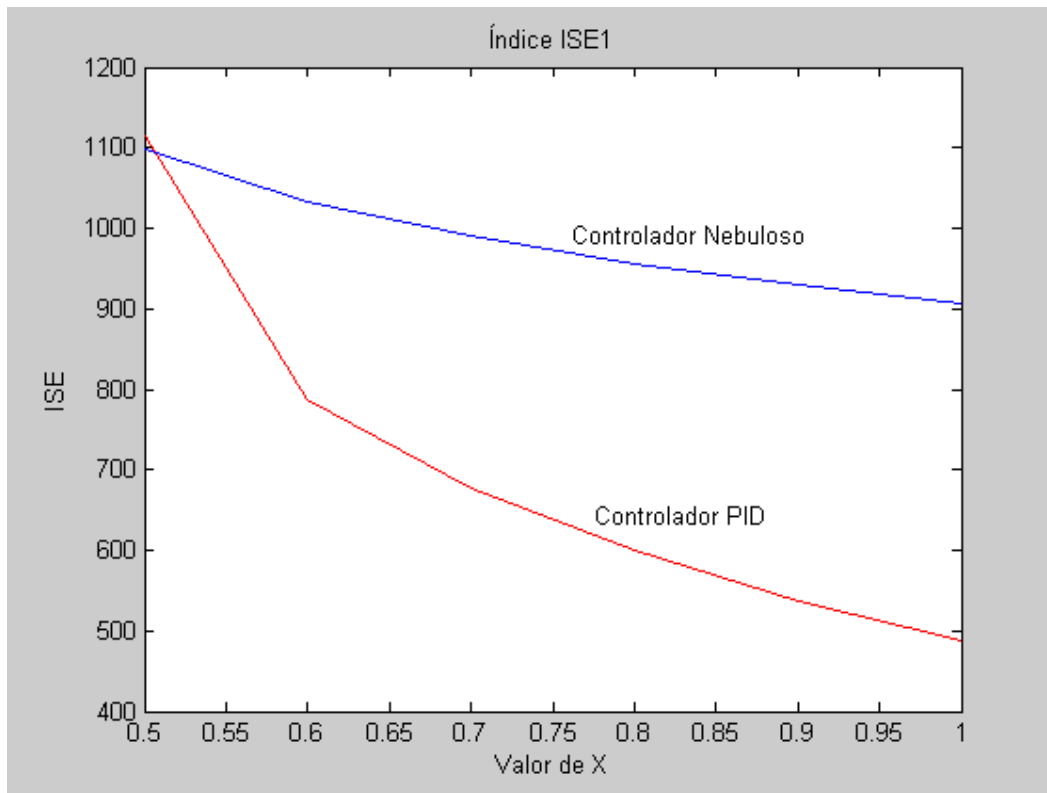
A FIG. 4.25 mostra o desempenho do controlador nebuloso, pelo índice ITAE2, ajustado para o parâmetro X em 0,7, quando este parâmetro é variado.



**FIG. 4.25 Índice ITAE2 para o controlador nebuloso ajustado com parâmetro X em 0,7**

Neste caso dos controladores nebulosos, percebe-se o mesmo comportamento dos índices que foi encontrado para o controlador PID. Quando se varia o parâmetro X, se trabalhando com o controlador ajustado para 0,7, de 0,7 até 1, o desempenho melhora, e de 0,7 em direção de 0,5, existe uma degradação. Para o controlador ajustado em 0,3, de 0,3 até 0,0, o desempenho melhora, e de 0,3, até 0,5 existe uma degradação.

Comparando a robustez do controlador PID com o controlador nebuloso, pelo índice ISE1, por exemplo, para controlador ajustado para o parâmetro X em 0,7, FIG. 4.26, pode-se perceber que existe uma variação maior de valores do controlador PID em relação ao controlador nebuloso, isso demonstra a maior robustez do controlador nebuloso, que sofre menos variação ou degradação de desempenho quando o processo varia. O valor absoluto da curva do índice ISE1 para o controlador nebuloso é superior ao do controlador PID devido ao fato do controlador nebuloso tender a uma resposta transitória ao redor do "setpoint". Isto é, o PID elimina o erro mais rapidamente, e o nebuloso oscila mais e é penalizado no índice.



**FIG 4.26 Comparação de robustez entre os controladores PID e nebuloso**

#### 4.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo mostrou-se que o controlador nebuloso pode ser ajustado para ter um bom desempenho para cada valor do parâmetro X do processo. Como no caso do PID, o controlador nebuloso ajustado para o parâmetro X igual a 0,7 não consegue operar quando este parâmetro é variado para 0,3. Torna-se necessário mudar a estrutura ou o pareamento ente as variáveis.

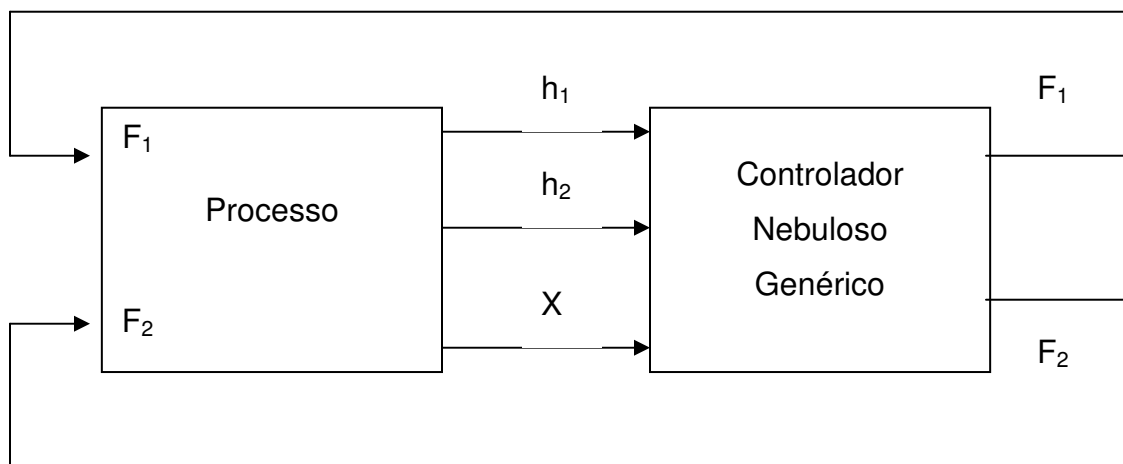
Foi analisada a robustez dos controladores PID e nebulosos para variações do parâmetro X, e observou-se que o nebuloso se degrada de forma mais lenta, sendo portanto mais robusto.

## 5 SISTEMA DOS QUATRO TANQUES UTILIZANDO DOIS CONTROLADORES NEBULOSOS

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será estudada uma forma de manter o sistema estável frente à variações do parâmetro  $X$ . Para tal serão utilizados os dois controladores nebulosos estudados anteriormente, o controlador ajustado para parâmetro  $X$  em 0,7 e o controlador ajustado para parâmetro  $X$  igual a 0,3.

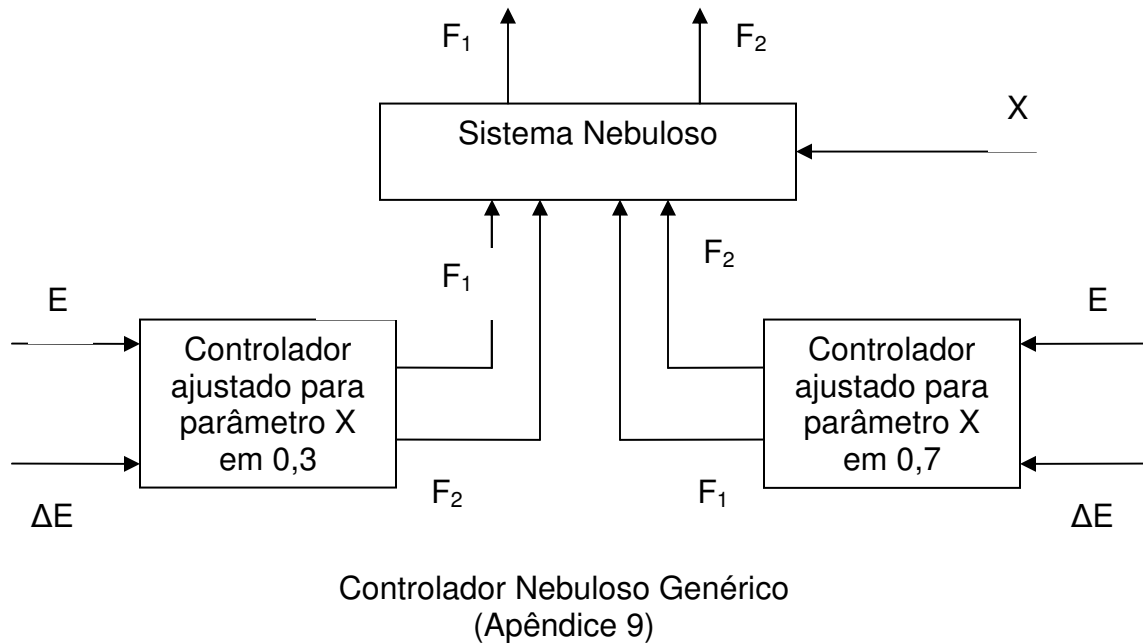
### 5.2 SISTEMA COM DOIS CONTROLADORES



**FIG. 5.1** Esquema do processo com dois controladores nebulosos

A esquematização do processo é a mesma mostrada no capítulo 3, apenas acrescenta-se como saída do bloco do processo, o parâmetro  $X$ , que será entrada do bloco "controlador genérico". Isto é, será medida a posição " $X$ " das válvulas de três vias, que será uma entrada do controlador. O bloco do "controlador nebuloso genérico" possui os dois controladores projetados no capítulo 4, o controlador ajustado para o parâmetro  $X$  em 0,7 e o controlador ajustado para o parâmetro  $X$  em 0,3. Os níveis  $h_1$  e

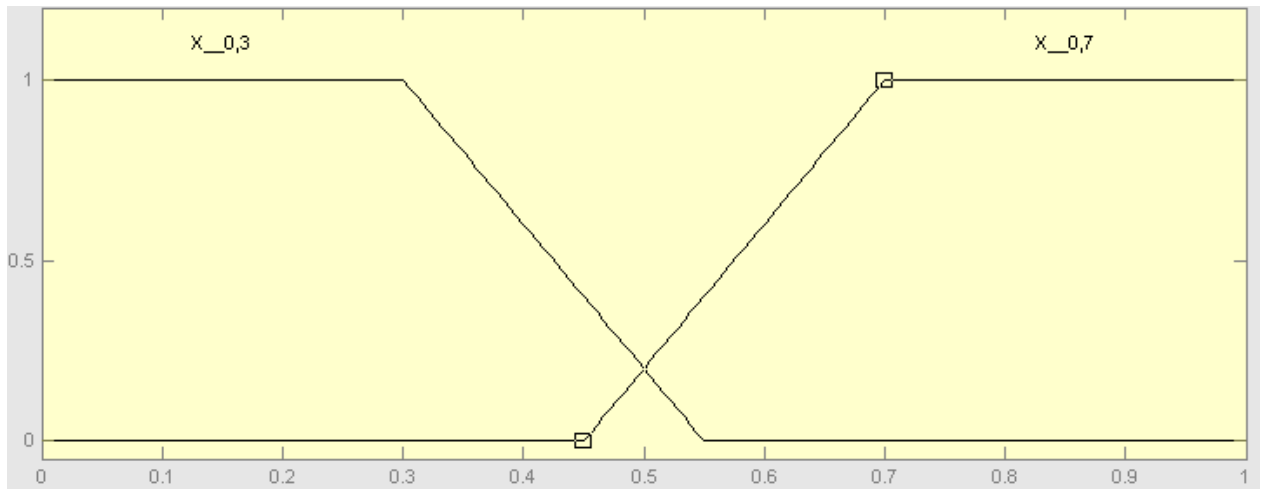
$h_2$  são entradas do bloco “controlador genérico”, da mesma forma que para o controlador nebuloso único do capítulo 4.



**FIG. 5.2 Esquema do controlador nebuloso genérico com os dois controladores nebulosos**

Os níveis  $h_1$  e  $h_2$  e o parâmetro  $X$  são as entradas do controlador nebuloso genérico. Com o valor dos níveis  $h_1$  e  $h_2$ , os controladores ajustados para parâmetro  $X$  em 0,3 e 0,7 irão calcular a resposta necessária para atingir os “setpoints” desejados. Estas respostas darão entrada em um bloco denominado sistema nebuloso, juntamente com o parâmetro  $X$ . De acordo com o valor do parâmetro  $X$ , ou seja, a posição da válvula de três vias  $X$ , é calculado o percentual da resposta de cada controlador que será usado como saída do controlador nebuloso genérico.

O sistema nebuloso possui as funções de pertinência para o parâmetro  $X$  mostrados na FIG. 5.3.



**FIG. 5.3 Funções de pertinência do parâmetro X**

De acordo com o valor do parâmetro X, o sistema nebuloso irá calcular o percentual da vazão que será utilizada de cada controlador nebuloso, o controlador ajustado para parâmetro X em 0,3 e o controlador ajustado para parâmetro X em 0,7, segundo as EQ. 5.1 e EQ. 5.2.

$$\Delta F_1 = \Delta F_{11}X_{0,3} + \Delta F_{12}X_{0,7} \quad (\text{EQ. 5.1})$$

$$\Delta F_2 = \Delta F_{21}X_{0,3} + \Delta F_{22}X_{0,7} \quad (\text{EQ. 5.2})$$

Onde:

$\Delta F_1$  – variação da vazão do ramo 1 sugerida pelo controlador

$\Delta F_2$  – variação da vazão do ramo 2 sugerida pelo controlador

$\Delta F_{11}$  – variação da vazão  $F_1$  do controlador ajustado para parâmetro X em 0,3

$\Delta F_{12}$  – variação da vazão  $F_1$  do controlador ajustado para parâmetro X em 0,7

$\Delta F_{21}$  – variação da vazão  $F_2$  do controlador ajustado para parâmetro X em 0,3

$\Delta F_{22}$  – variação da vazão  $F_2$  do controlador ajustado para parâmetro X em 0,7

$X_{0,3}$  – valor do parâmetro X em relação a função de pertinência  $X_{0,3}$

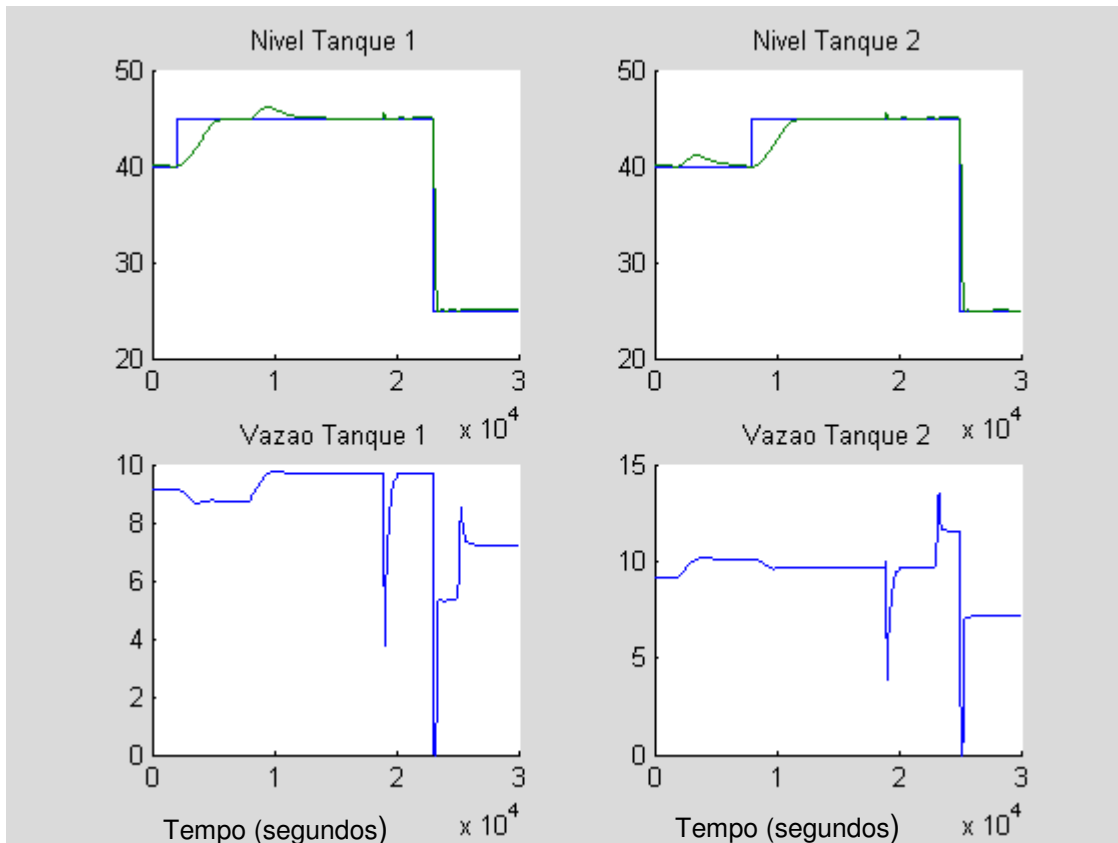
$X_{0,7}$  – valor do parâmetro X em relação a função de pertinência  $X_{0,7}$



Como os valores do parâmetro X serão variados nos valores de 0,3 e de 0,7, o que acontece é o seguinte:

- 1) Se o parâmetro X está em 0,3 a vazão  $F_1$  será igual a  $F_{11}$  já que  $X_{0,3}$  será igual a 1 e o  $X_{0,7}$  será igual a 0. O mesmo acontece para o valor de  $F_2$  que será igual a  $F_{21}$ . Ou seja, o controlador nebuloso que irá controlar o processo será o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,3.
- 2) Quando o valor do parâmetro X for igual 0,7, a vazão  $F_1$  será igual a  $F_{12}$  já que  $X_{0,7}$  será igual a 1 e o  $X_{0,3}$  será igual a 0. O mesmo acontece com  $F_2$  que será igual a  $F_{22}$ . Ou seja, o controlador nebuloso que irá controlar o processo será o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,7.

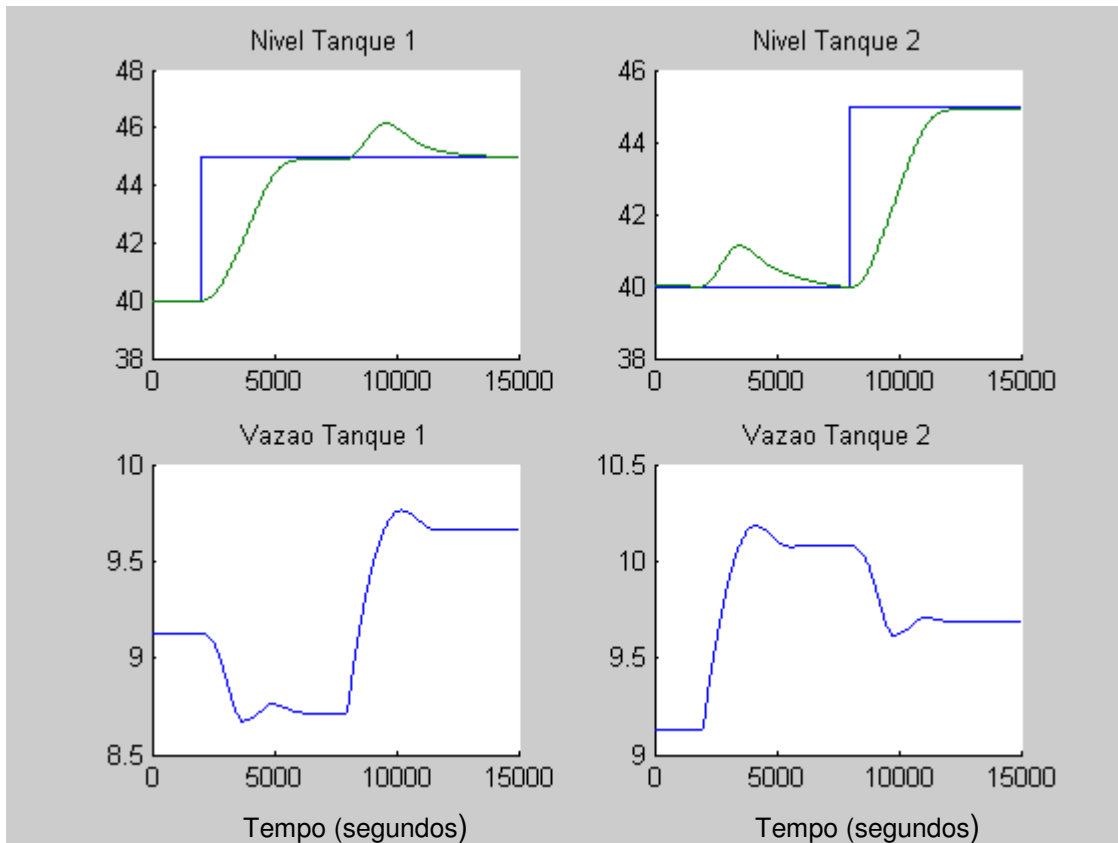
Primeiramente será testado o desempenho do sistema frente a entradas bem conhecidas. O parâmetro X em 0,3 será mantido até o tempo de 19000 onde foi visto anteriormente que o sistema era estável e após este tempo será colocado o parâmetro X em 0,7 até completar o tempo 30000. O primeiro “setpoint”, mudança de 40 para 45, acontece no tempo de 2000 segundos no tanque 1, o primeiro “setpoint” para o tanque 2, mudança de 40 para 45, acontece no instante de 8000 segundos. O segundo “setpoint” para o tanque 1, mudança de 45 para 25, acontece em 23000 segundos e o segundo “setpoint” do tanque 2, mudança de 45 para 25, em 25000 segundos. A resposta frente a esses valores de X pode ser observada na FIG. 5.4.



**FIG. 5.4 Resposta do controlador genérico para parâmetro X em 0,3 e depois em 0,7**

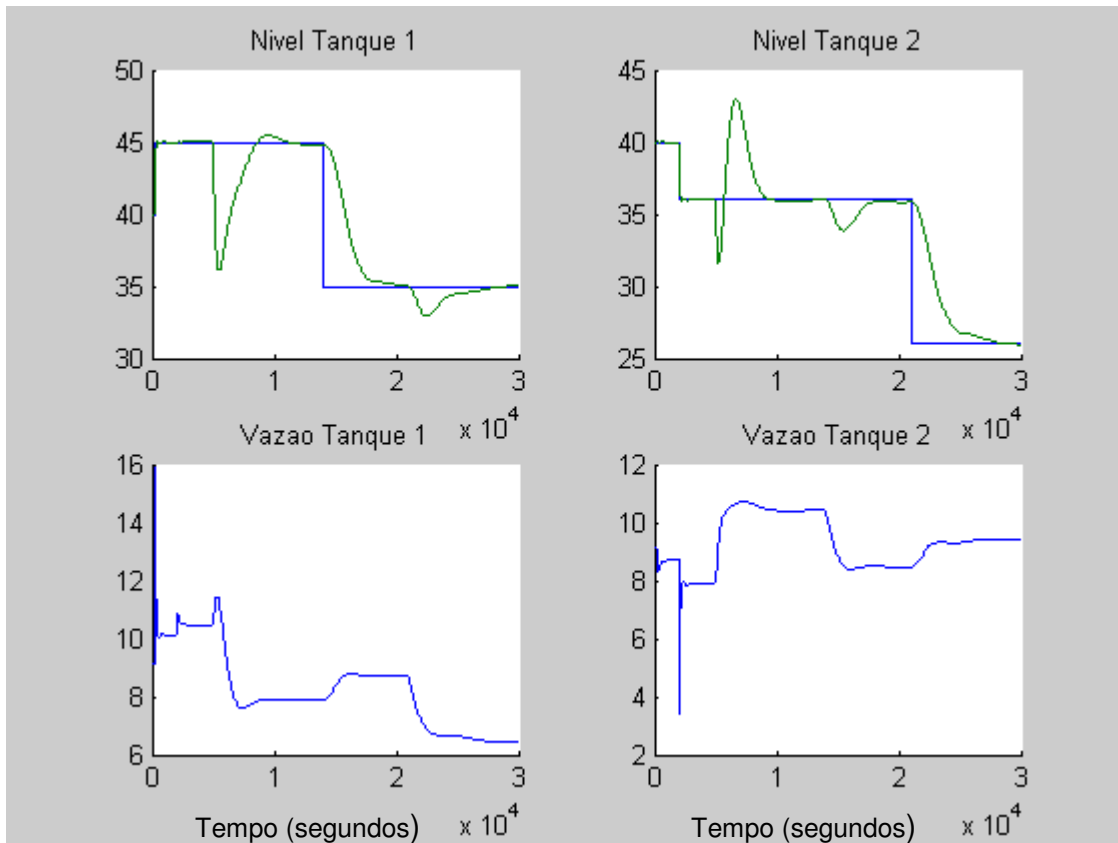
Pode-se perceber que ao se passar o valor do parâmetro X de 0,3 para 0,7, cria-se um instante onde existe um certo “nervosismo” na resposta do controlador. Esta perturbação é causada pelo processo, e não pelo controlador. Porém, vê-se que ao final da simulação, os “setpoints” que se queria alcançar foram todos alcançados.

A FIG. 5.5 mostra a resposta do controlador genérico para os primeiros 15000 segundos, mesma simulação realizada no item 4.3. Pode-se perceber que a resposta encontrada é a mesma resposta do controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,3 mostrada na FIG. 4.9.



**FIG 5.5 Resposta do controlador genérico usando o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,3**

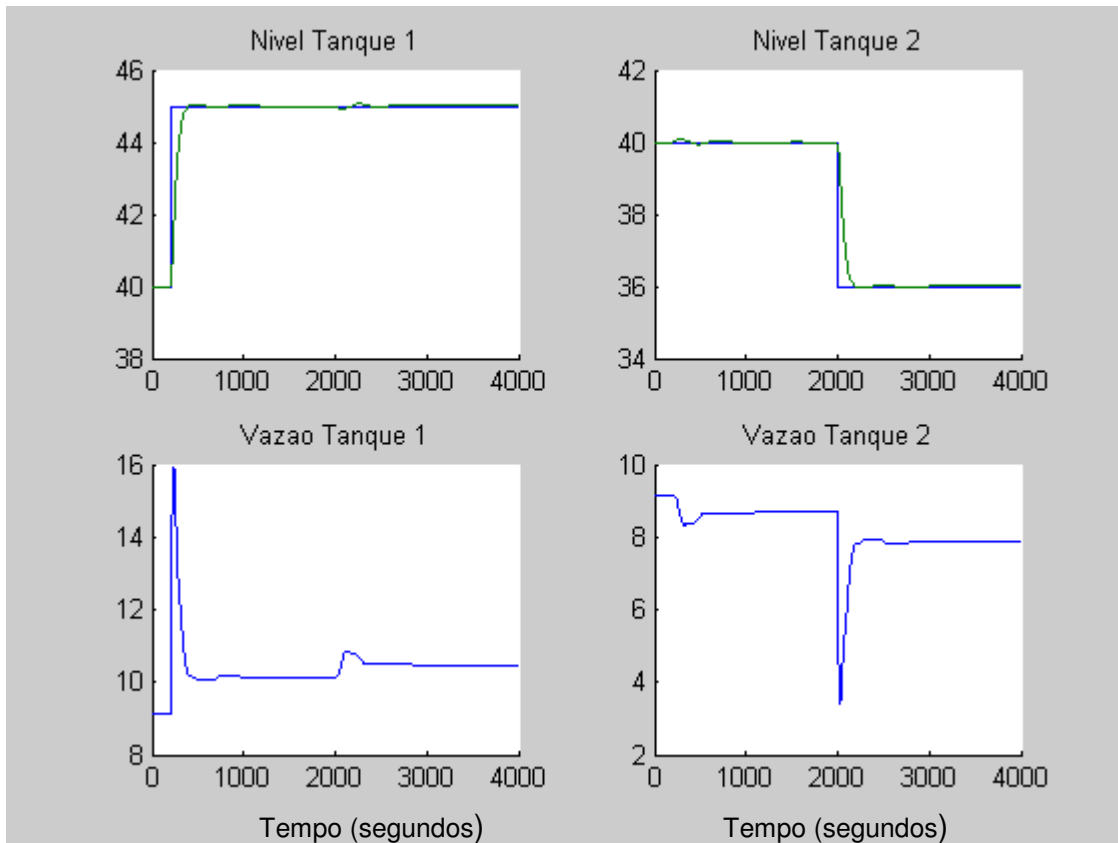
Pode-se ainda inverter a simulação e começar com o parâmetro X em 0,7 até o tempo de 5000 segundos e então colocar o parâmetro X em 0,3, com simulação total de 30000 segundos. O primeiro “setpoint”, mudança de 40 para 45, acontece no tempo de 200 segundos no tanque 1, o primeiro “setpoint” para o tanque 2, mudança de 40 para 36, acontece no instante de 2000 segundos. O segundo “setpoint para o tanque 1, mudança de 45 para 35, acontece em 14000 segundos e o segundo “setpoint” do tanque 2, mudança de 36 para 26, em 21000 segundos. A resposta frente a esses valores de X pode ser observada na FIG. 5.6.



**FIG. 5.6 Resposta do controlador genérico para parâmetro X em 0,7 e depois em 0,3**

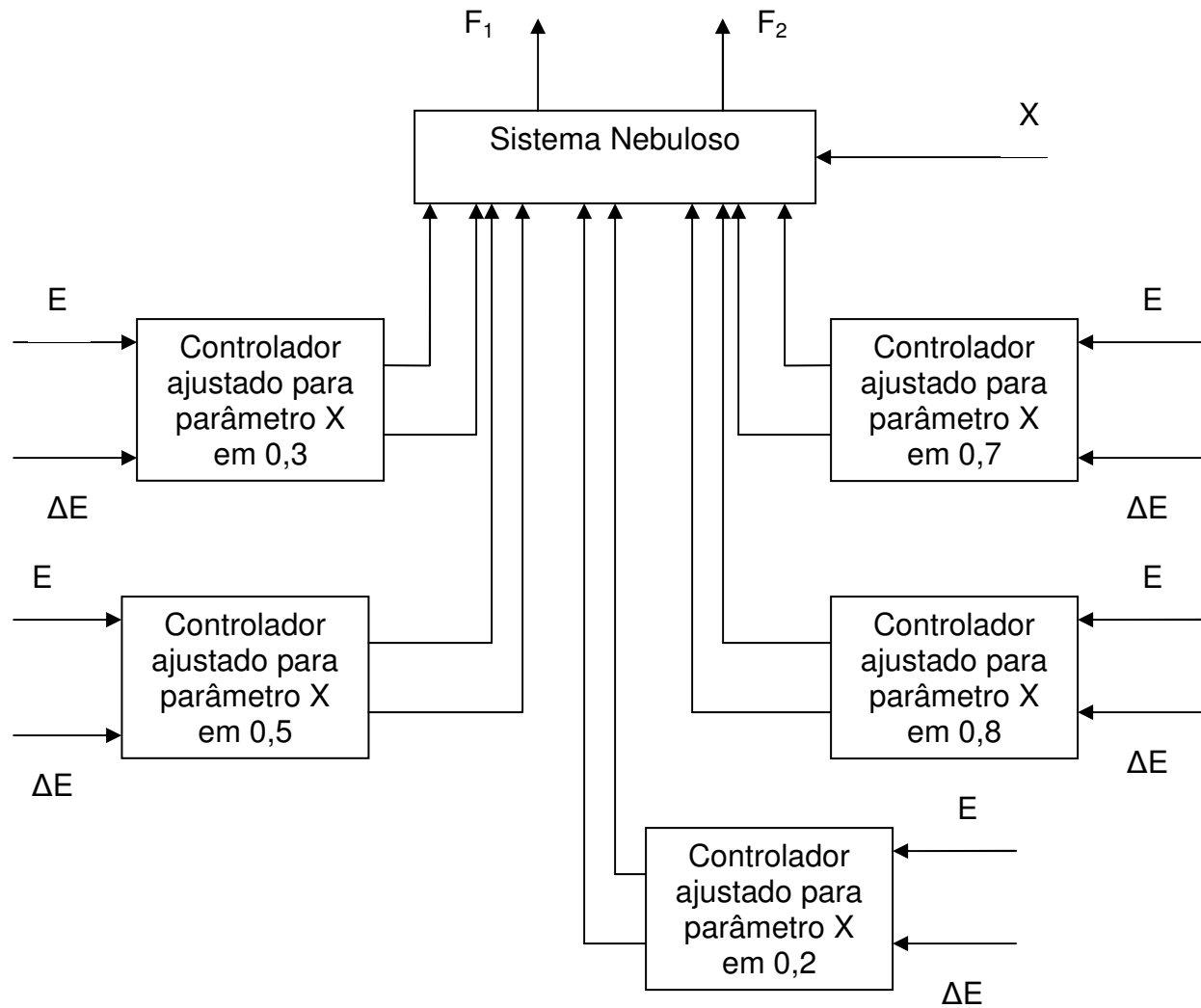
Pode-se perceber que ao se passar o valor do parâmetro X de 0,7 para 0,3, cria-se um instante onde existe um certo “nervosismo” na resposta do controlador, que é maior do que o ocorrido quando se variou o parâmetro X de 0,3 para 0,7, isso pode ser explicado pela dinâmica mais lenta do processo. Esta perturbação é causada pelo processo, e não pelo controlador. Porém, vê-se que ao final da simulação, os “setpoints” que se queria alcançar foram todos alcançados.

A FIG. 5.7 mostra a resposta do controlador genérico para os primeiros 4000 segundos, mesma simulação realizada no item 4.2. Pode-se perceber que a resposta encontrada é a mesma resposta do controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,7 mostrada na FIG. 4.6.



**FIG 5.7 Resposta do controlador genérico usando o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,7**

Pôde-se perceber que para os pontos escolhidos para o parâmetro X, 0,3 e 0,7, os controladores nebulosos estudados no capítulo 4 conseguiram controlar o processo frente as mudanças de “setpoint” apresentadas. Isso leva a conclusão que pode-se criar vários controladores nebulosos ajustados para valores variados do parâmetro X e utilizar um sistema nebuloso para “chaveá-los” quando necessário, de acordo com o posicionamento das válvulas de três vias X. A FIG.5.8 mostra a arquitetura proposta.



Controlador Nebuloso Genérico com vários controladores

**FIG. 5.8 Esquema do controlador nebuloso genérico utilizando vários controladores nebulosos**

### 5.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo substituiu-se o controlador nebuloso projetado no capítulo 4 por um controlador nebuloso genérico. Este controlador nebuloso genérico possui os dois controladores nebulosos projetados no capítulo 4, o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,3, e o controlador nebuloso ajustado para parâmetro X em 0,7.

Foi ainda projetado um sistema nebuloso que pondera o percentual dos controladores nebulosos que será utilizado para controlar o processo, sendo assim responsável por “chavear” o controlador nebuloso que será utilizado para controlar o processo.

Foi ainda proposta uma estrutura de um novo controlador nebuloso genérico possuindo vários controladores nebulosos, ajustados para parâmetros X diversos, que seria capaz de controlar o processo frente a vários valores o parâmetro X.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

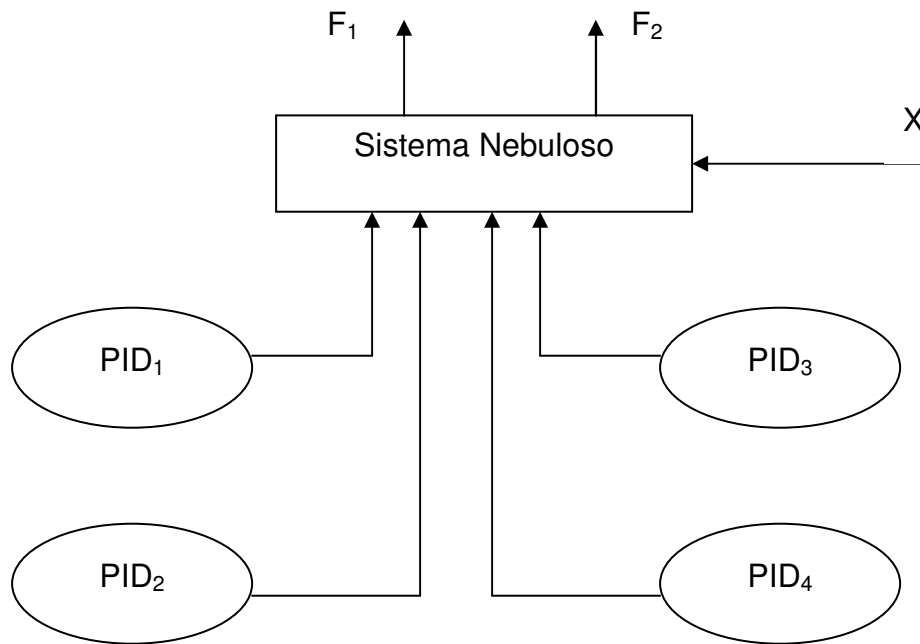
### 6.1 CONCLUSÕES

No capítulo 3, foi detalhado o processo dos quatro tanques, que é um processo que apresenta uma grande variação de dinâmica em função do parâmetro X. Mostrou-se que o controlador PID consegue fazer o controle do processo como apresentado nos itens 3.3 e 3.5. Porém, quando sujeito a grandes variações do parâmetro X, o desempenho do controlador PID sofre degradação muito acentuada como visto no item 3.5.

No capítulo 4 o controlador PID foi substituído por um controlador nebuloso que também é projetado para valores bem determinados do parâmetro X, porém, como visto no item 4.4.2, sofre muito menos degradação que o controlador PID. Esta é uma característica própria dos controladores nebulosos, a sua própria não-linearidade facilita o trabalho do controlador principalmente quando aplicado a um processo que é não-linear e que apresenta grandes variações de dinâmica como o processo dos quatro tanques.

No capítulo 5 foi implementado um controlador nebuloso genérico, que pode utilizar controladores previamente ajustados para determinados valores do parâmetro X, que é a posição da válvula de três vias. A grande vantagem deste controlador é que ele pode utilizar inúmeros controladores previamente ajustados para valores variados do parâmetro X, e ponderar de acordo com o valor lido do parâmetro X. O controlador nebuloso genérico define qual proporção de cada controlador deve ser utilizado para manter o processo estável. Esta facilidade pode ser atribuída ao controlador nebuloso pelo fato deste controlador ser computacional, podendo-se fazer um “chaveamento” de controladores nebulosos dentro do programa que controla o processo. Este fato também é possível para um controlador PID, conforme a FIG. 6.1.





Controlador Nebuloso Genérico com vários controladores PID

**FIG 6.1 Esquema do controlador nebuloso genérico utilizando vários controladores PID's**

## 6.2 PERSPECTIVAS

Pela observação dos resultados obtidos, sugere-se que sejam implementados inúmeros controladores nebulosos que possam ser utilizados acoplados a um controlador genérico, podendo assim ser testado para outros valores de posição da válvula de três vias X. Ou ainda a obtenção de um único controlador nebuloso, multivariável, capaz de controlar o processo frente a variações do parâmetro X.

Sugere-se estudar o uso do Sistema Nebuloso associado a outros controladores como por exemplo, controladores PIDs.

Sugere-se ainda a implementação física de um processo com estas características e conseqüente verificação dos resultados na prática.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, O. M. e COELHO, A. A. R., “**Projeto de desacoplamento em sistemas MIMO: abordagens convencional e nebulosa**”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, 2002.

BOLTON, W., “**Engenharia de controle**”, Makron Books, 1995.

BRISTOL, E. H., “**On a new Measure of Interactions for Multivariable Process Control**”, IEEE Trans. Auto. Control AC-11, 133, 1966.

CAMPOS, M. C., “**La simulation Dynamique et L’ Intelligence Artificielle Delaboration de Strategies de Controle-Commande Multivariable Flou. Aplication a une Unite de Cracage Catalytique en Phase Fluide**”, Tese de doutorado, Paris, 1997.

CAMPOS, M. C., “**Sistemas Inteligentes para Controle e Automação de Processos**”, Notas de Aula, IME, 2000.

CARVALHO, J. L. M. de C., “**Sistemas de controle automático**”, LTC, 2000.

COELHO, L. S., “**Metodologias da inteligência artificial aplicadas ao projeto de sistemas de controle e automação industrial**”, ISA SHOW Brasil 2001, 2001.

DOYLE, F. J., GATZKE, R. V., MAHADEDEVAN, R., WHITMYRE, G., SAFFER, D. R., “**Innovative control education using a 4-tank experiment and the www**”, ACE 200, IFAC/IEEE Symposium on Advances in control education, Gold Coast, Australia, Dec. 2000.

FARENZENA, M., TRIERWEILER, J. O. e SECCHI, A. R., “**The quintuple-tank laboratory plant: A challenge control problem**”, ECC 7 th European Control Conference, 2003.

FILHO, F. M. L., GOSMANN, H. L. e BAUCHSPIESS, A., “**Controle fuzzy para sistemas de nível de líquidos**”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, pp. 3017-3022, 2002.

GATZKE, D. R., MEADOWS, E. S., DOYLE, F. J., SAFFER, D. R., HERNJAK, N. e VADIGEPALLI, R., “**Teaching multivariable control with a 4-tank experimental process**”, poster at AIChE Annual Meeting, Los Angeles, CA, Nov. 2000.

GOSMANN, H. L., “**Linearização Exata de um Processo de Tanques Acoplados**”, UNB, fevereiro de 2002.

HELLENDORM, H. e DRIANKOV, D., “**Fuzzy Model Identification**”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.

HENRIKSSON, D., CERVIN, A., AKESSON, J. e ARZÉN, K., “**Feedback Scheduling of Model Predictive Controllers**”, Lund Institute of Technology, Sweden, 2003.

JOHANSSON, K. H., “**The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero**”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 8 (3), pp. 456 – 465, 2000.

JÚNIOR, O. e AGUIAR, H., “**Lógica difusa: aspectos práticos e aplicações**”, Rio de Janeiro: Interciência, 1999.

LEITÃO, F.O, “**Metodologia para Implementação de Controladores Fuzzy em Processos Petroquímicos Utilizando Redes Neurais**”, Tese de Mestrado, IME, 2000.

MATLAB USER`S GUIDE, Mathworks Inc, 1999.

MEADOWS, E. S., DOYLE, F. J., SAFFER, D. R., “An interdisciplinary control engenniring laboratory course”, presented at ACE 2000, IFAC/IEEE Symposium on Advances in control education, Gold Coast, Australia, Dec. 2000.

MENDEL, J. M., “**Fuzzy Logic Systems for Engeneering: A Tutorial**”, Proceedings of the IEEE, vol. 83, nº 3, 1995.

MARCON, M. S., TRIERWEILER, J.O., SECCHI, A.R., “**EKF e CEKF: comparação entre duas formulações do filtro de Kalman estendido**”, CBA, 2002.

OGATA, K., “**Engenharia de controle moderno**”, Prentice-Hall do Brasil, 1998.

PADILHA, P. C. C., “**Desenvolvimento de uma metodologia de sintonia de controladores “fuzzy” utilizando redes neurais: aplicações em processos petroquímicos**”, Tese de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2001.

PADILHA, P. C. C., CAMPOS, M. C. M. M. e PINHEIRO, G. M., “**Aplicação de controladores neuro-fuzzy para processos industriais**”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, 2002.

PINHEIRO, C. e GOMIDE, F., “**Sintonia de sistemas de controle fuzzy em processos não lineares**”.

PHILLIPS, C. L. e HARBOR, R. D., “**Sistemas de controle e realimentação**”, Makron Books, 1996.

RAPOSO, Thays de Almeida, “**Aplicação de Algoritmos Genéticos para o Otimização de Controladores Fuzzy em Processos Petroquímicos**”, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2000.

SEBORG, D. E., EDGARD, T. F. e MELLICHAMP, D. A., “**Process dynamics and control**”, John Wiley & Sons, 1989.

SHINSKEY, F. G., “**Process control systems: application, design and tuning**”, McGraw-Hill, 1996.

TAKAGI, T. e SUGENO, M., “**Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control**”, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, vol 15, pp 116 – 132, 1985.

TORRES, B. S., AQUINO, R. D., FILHO, J. M. V. D., JOTA, F. G. PENA, R. T., “**Otimização de estratégias de controle em sistemas multivariáveis**”.

TORRES, B. S., JOTA, F. G. e PENA, R. T., “**Estratégias de desacoplamento em sistemas multimalha no controle de nível, vazão e temperatura**”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, pp. 991-997, 2002.

YONEYAMA, T. e NASCIMENTO JÚNIOR, C. L., “**Inteligência artificial em controle e automação**”, São Paulo, Edgard Blucher, 2000.

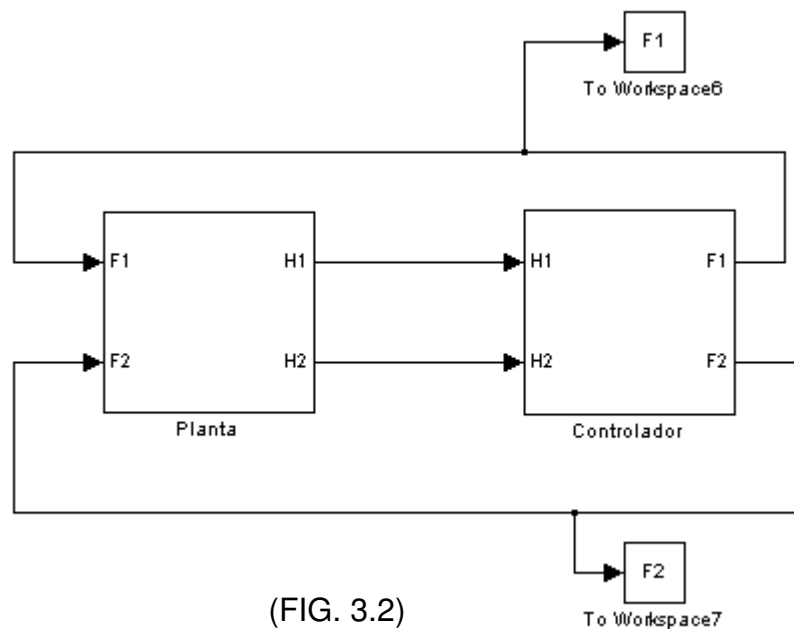
ZADEH, L. A., “**Fuzzy Sets**”, Information and Control, 8, 338-353, 1965.

ZADEH, L. A., “**Outline of a New Approach to the analysis of Complex Systems and Decision Process**”, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 3, 28–44, 1973.

ZENG, X., ZHOU, J. e VASSEUR, C., “**A strategy for controlling nonlinear systems using a learning automaton**”, Automática, pp. 1517 – 1524, 2000.

## **8 APÊNDICES**

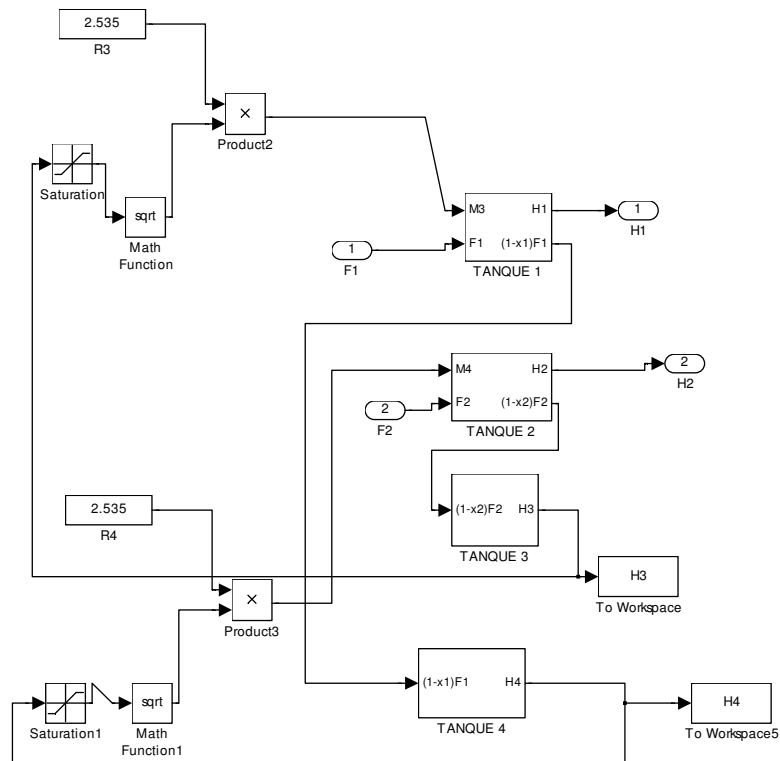
## 8.1 APÊNDICE 1: PROCESSO DOS QUATRO TANQUES MONTADO NO SIMULINK



**FIG. 8.1** Processo dos quatro tanques montado no simulink, conforme diagrama de blocos da FIG. 3.2

O processo foi montado no Matlab-Simulink (MATLAB USER`S GUIDE, 1999) como apresentado no diagrama de blocos da FIG. 3.2. Foi montado um bloco chamado “Planta” onde foi montada a estrutura matemática dos tanques 1, 2, 3 e 4, conforme EQ. 3.1, EQ. 3.2, EQ. 3.3 e EQ. 3.4. As saídas do bloco “Planta” são os níveis  $h_1$ , do tanque 1, e  $h_2$ , do tanque 2, que são entradas do bloco denominado “Controlador” que possui os controladores PIDs projetados no capítulo 3 ou o controlador nebuloso projetado no capítulo 4. As saídas deste bloco denominado “Controlador” são as vazões  $F_1$ , vazão do ramo 1, e  $F_2$ , vazão do ramo 2, que são entradas do bloco “Planta”.

## 8.2 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO BLOCO “PLANTA” COM A MODELAGEM MATEMÁTICA DOS QUATRO TANQUES FEITA NO MATLAB-SIMULINK



$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = X_1 F_1 + R_3 \sqrt{h_3} - R_1 \sqrt{h_1}$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = X_2 F_2 + R_4 \sqrt{h_4} - R_2 \sqrt{h_2}$$

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = (1 - X_2) F_2 - R_3 \sqrt{h_3}$$

$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = (1 - X_1) F_1 - R_4 \sqrt{h_4}$$

**FIG. 8.2** Estrutura do bloco “Planta” com a modelagem matemática dos quatro tanques



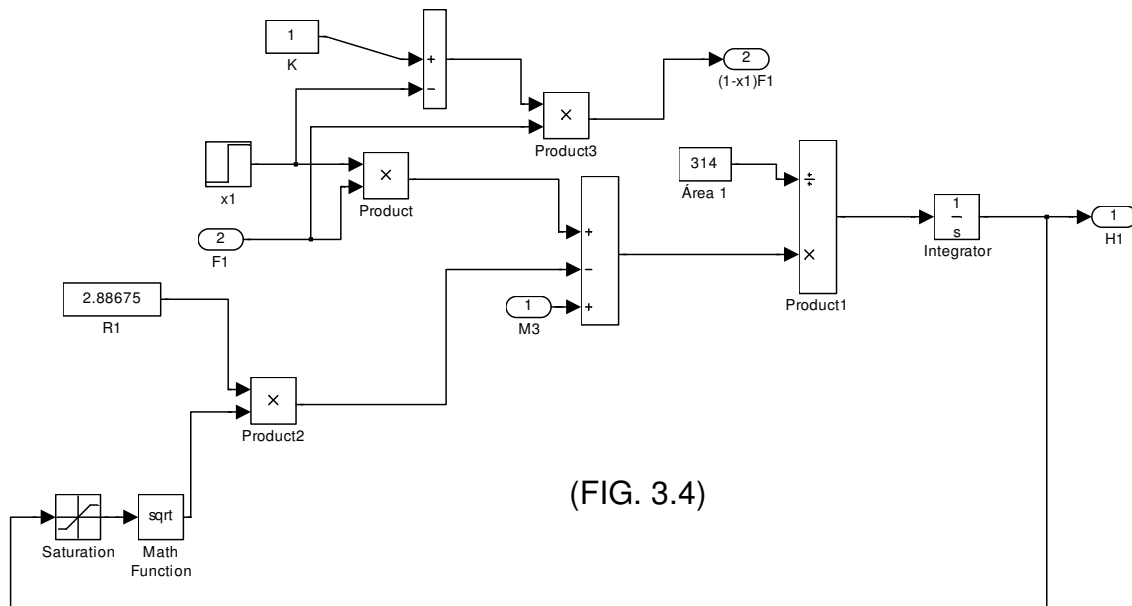
No interior do bloco “Planta” foi montada a estrutura matemática dos quatro tanques segundo EQ. 3.1, EQ. 3.2, EQ. 3.3 e EQ. 3.4. Se for tomado como referência o bloco descrito na FIG. A.2 como “Tanque 1”, este possui como entradas  $F_1$ , vazão do ramo 1, e  $M_3$  que corresponde ao termo  $R_3\sqrt{h_3}$  da EQ. 3.1. As saídas do bloco “Tanque 1” são o nível  $h_1$  e o termo  $(1 - X_1)F_1$  que é entrada do bloco descrito como “Tanque 4”, cuja saída é o nível  $h_4$ .

Por sua vez, o bloco descrito como “Tanque 2” tem como suas entradas a vazão  $F_2$ , vazão do ramo 2, e  $M_4$  que corresponde ao termo  $R_4\sqrt{h_4}$  da EQ. 3.2. As saídas do bloco “Tanque 2” são o nível  $h_2$  e o termo  $(1 - X_2)F_2$  que é entrada do bloco descrito como “Tanque 3”, cuja saída é o nível  $h_3$ .

Foi implementada a saída  $(1 - X_1)F_1$  no bloco “Tanque 1” que é entrada do bloco “Tanque 4” pela sua facilidade de implementação. O bloco “Tanque 1” possui a informação da vazão  $F_1$  na sua entrada e no interior deste bloco foi colocada a válvula de três vias  $X_1$  que regula o percentual de vazão  $F_1$  que fica no “Tanque 1” e o percentual da vazão  $(1 - X_1)F_1$  que vai para o “Tanque 4”.

O mesmo foi implementado no bloco “Tanque 2” onde foi colocada a válvula de três vias  $X_2$  que regula o percentual de vazão  $F_2$  que fica no “Tanque 2” e o percentual de vazão  $F_2$  que vai para o “Tanque 3”.

### 8.3 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO TANQUE 1 FEITA NO SIMULINK



(FIG. 3.4)

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = X_1 F_1 + R_3 \sqrt{h_3} - R_1 \sqrt{h_1}$$

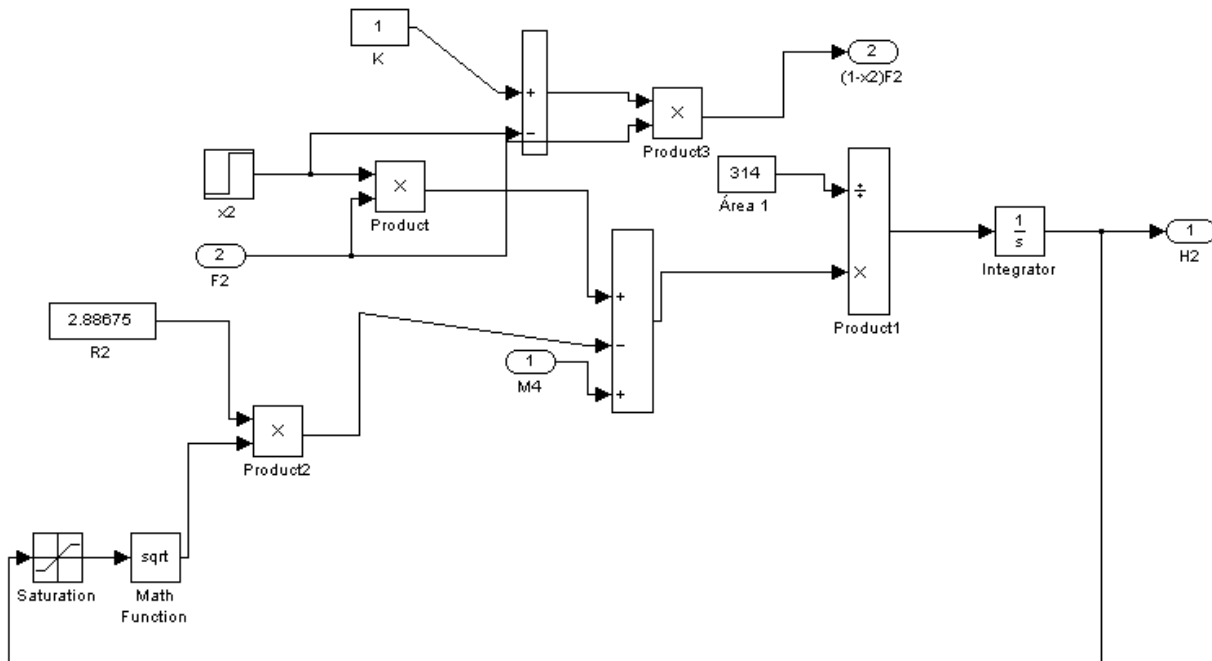
**FIG. 8.3 Estrutura do tanque 1**

No interior do bloco “Tanque 1” foi montada a sua equação EQ. 3.1, conforme mostrado na FIG. 3.4. Pela EQ. 3.1, a variação do nível  $h_1$  depende dos termos  $X_1 F_1$  calculado internamente neste bloco pela multiplicação do bloco descrito como  $X_1$ , posição da válvula de três vias  $X_1$ , pela vazão  $F_1$ , entrada do bloco “Tanque 1”. O termo  $R_3 \sqrt{h_3}$  é entrada do bloco “Tanque 1” e é descrita como  $M_3$ . Foi implementado um bloco somador que recebe como entradas somando os dois termo citados anteriormente e subtraindo, o termo  $R_1 \sqrt{h_1}$ . A saída do bloco somador é entrada de um bloco multiplicador que divide o resultado obtido pela área da base do tanque 1,  $A_1$ . A saída do bloco multiplicador passa por um integrador e é a saída é o nível  $h_1$ . Foi implementado ainda um bloco de saturação para impedir erros numéricos.

Por já possuir no seu interior a informação da vazão  $F_1$  e do valor da válvula de três vias  $X_1$ , decidiu-se que era mais prático calcular o termo  $(1 - X_1) F_1$  no interior do bloco

“Tanque 1” e utilizar o resultado como saída do bloco “Tanque 1” que é entrada do bloco do “Tanque 4”.

#### 8.4 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO TANQUE 2 FEITA NO SIMULINK



$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = X_2 F_2 + R_4 \sqrt{h_4} - R_2 \sqrt{h_2}$$

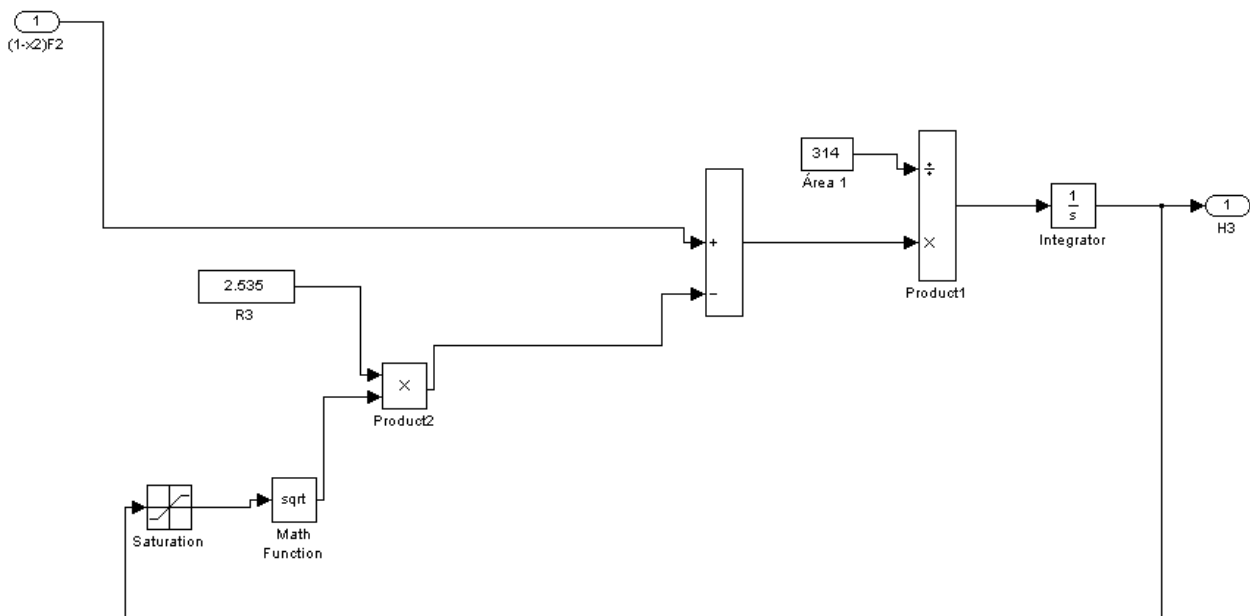
**FIG. 8.4 Estrutura do tanque 2**

No interior do bloco “Tanque 2” foi montada a sua equação EQ. 3.2. Pela EQ. 3.2, a variação do nível  $h_2$  depende dos termos  $X_2 F_2$  calculado internamente neste bloco pela multiplicação do bloco descrito como  $X_2$ , posição da válvula de três vias  $X_2$ , pela vazão  $F_2$ , entrada do bloco “Tanque 2”. O termo  $R_4 \sqrt{h_4}$  é entrada do bloco “Tanque 1” e é descrita como  $M_4$ . Foi implementado um bloco somador que recebe como entradas

somando os dois termo citados anteriormente e subtraindo, o termo  $R_2\sqrt{h_{21}}$ . A saída do bloco somador é entrada de um bloco multiplicador que divide o resultado obtido pela área da base do tanque 2,  $A_2$ . A saída do bloco multiplicador passa por um integrador e é a saída é o nível  $h_2$ . Foi implementado ainda um bloco de saturação para impedir erros numéricos.

Por já possuir no seu interior a informação da vazão  $F_2$  e do valor da válvula de três vias  $X_2$ , decidiu-se que era mais prático calcular o termo  $(1 - X_2)F_2$  no interior do bloco “Tanque 2” e utilizar o resultado como saída do bloco “Tanque 2” que é entrada do bloco do “Tanque 3”.

### 8.5 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO TANQUE 3 FEITA NO SIMULINK

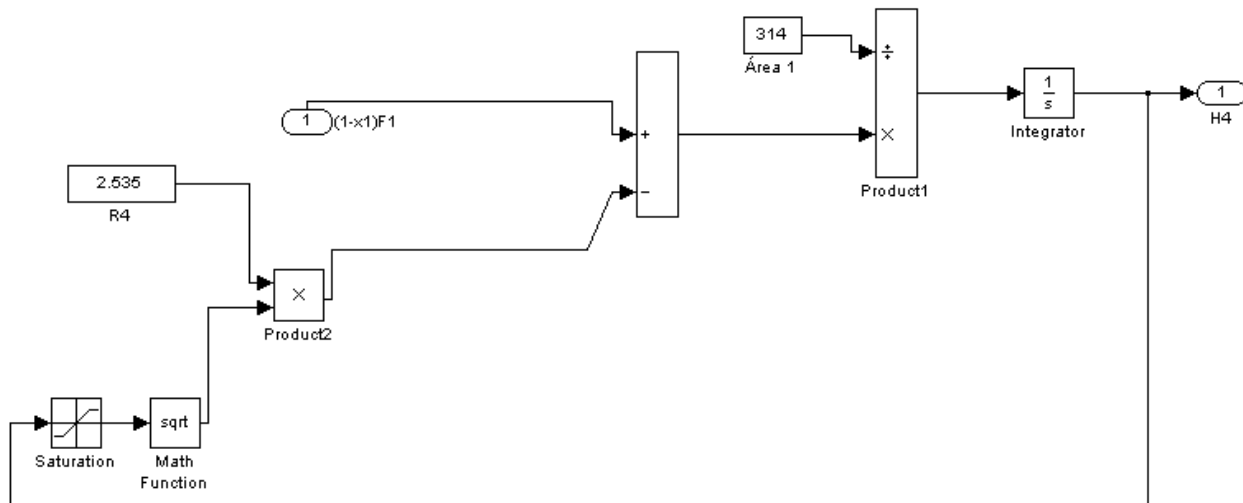


$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = (1 - X_2)F_2 - R_3\sqrt{h_3}$$

**FIG. 8.5 Estrutura do tanque 3**

No interior do bloco “Tanque 3” foi montada a sua equação EQ. 3.3. Pela EQ. 3.3, a variação do nível  $h_3$  depende dos termos  $(1 - X_2)F_2$ , entrada deste bloco, e do termo  $R_3\sqrt{h_3}$ , que são entradas de um bloco somador. O primeiro termo é subtraído do segundo termo e dividido pela área da base do tanque 3,  $A_3$ . O resultado passa por um bloco integrador e a saída é o nível  $h_3$ .

## 8.6 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO TANQUE 4 FEITA NO SIMULINK

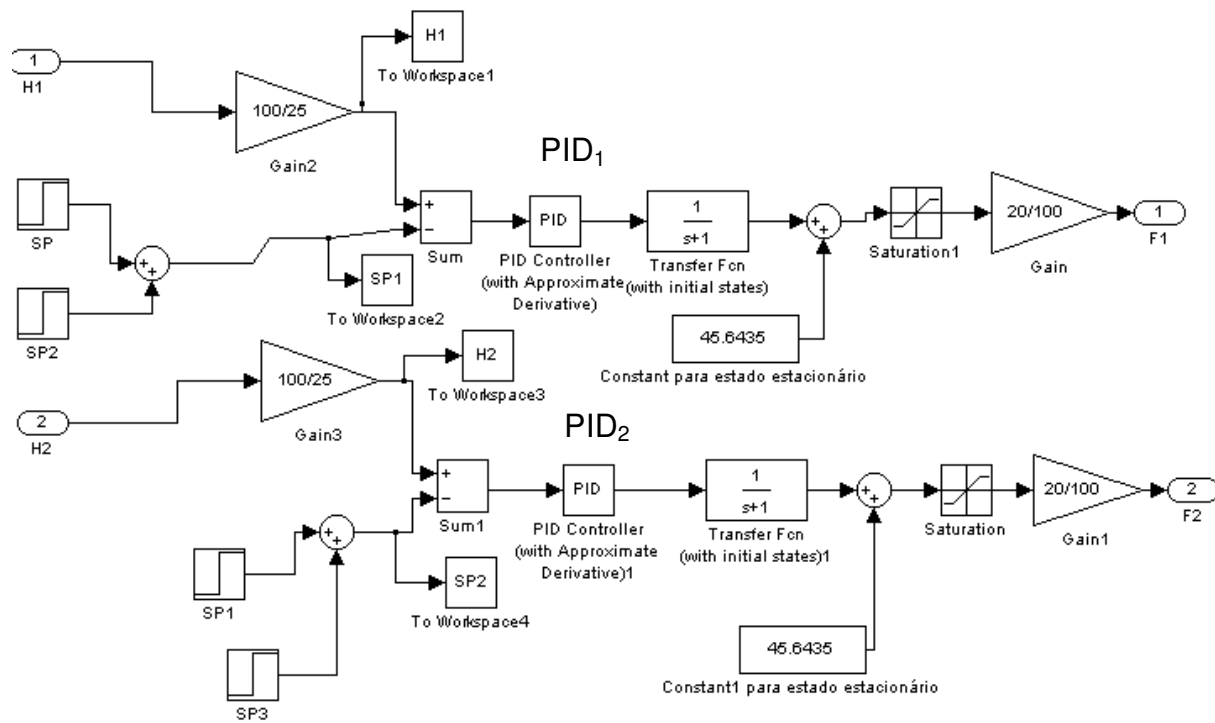


$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = (1 - X_1)F_1 - R_4\sqrt{h_4}$$

**FIG. 8.6 Estrutura do tanque 4**

No interior do bloco “Tanque 4” foi montada a sua equação EQ. 3.4. Pela EQ. 3.4, a variação do nível  $h_4$  depende dos termos  $(1 - X_1)F_1$ , entrada deste bloco, e do termo  $R_4\sqrt{h_4}$ , que são entradas de um bloco somador. O primeiro termo é subtraído do segundo termo e dividido pela área da base do tanque 4,  $A_4$ . O resultado passa por um bloco integrador e a saída é o nível  $h_4$ .

## 8.7 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO CONTROLADOR PID FEITA NO SIMULINK



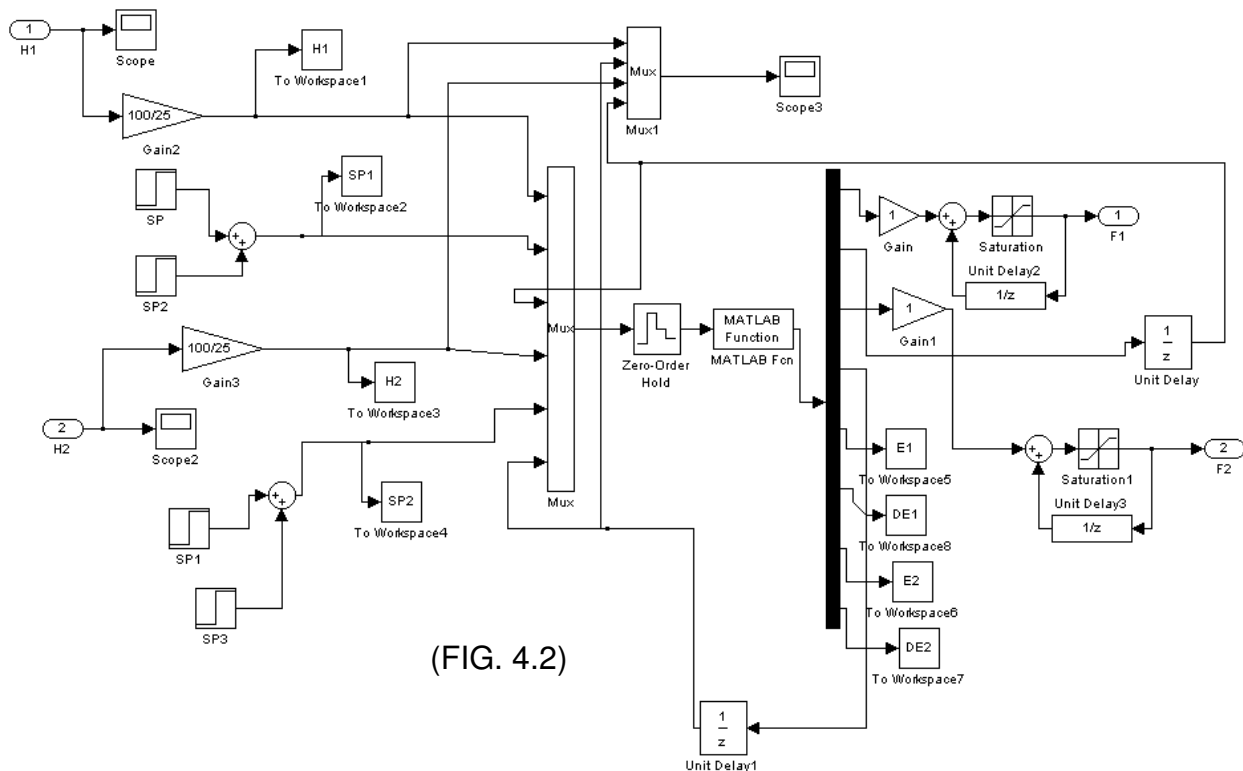
(FIG. 3.5)

**FIG. 8.7 Estrutura do controlador PID**

Os controladores PIDs descritos na FIG. 3.5 possuem a estrutura mostrada na FIG. A.7. O controlador descrito como controlador PID<sub>1</sub> recebe como entrada o erro. Este erro é calculado pelo valor do nível  $h_1$  menos o valor do setpoint desejado. Decidiu-se que por uma razão de melhor visualização do nível do tanque 1, que o nível  $h_1$  passaria por uma normalização, de 0% a 100%, antes de passar pelo controlador PID<sub>1</sub>. A saída do controlador PID<sub>1</sub> passa por um bloco com uma função de transferência que representa a função de transferência da válvula proporcional  $V_1$  que gera com isso uma perturbação no sistema. A saída do bloco da função de transferência da válvula  $V_1$  passa por um bloco de saturação que define a vazão máxima que a válvula  $V_1$  pode suportar e este resultado passa por uma nova normalização que faz o trabalho inverso da primeira normalização colocando o valor da vazão  $F_1$  no seu valor real.

O mesmo foi feito com relação ao controlador  $PID_2$  que deverá gerar o valor da vazão  $F_2$ .

## 8.8 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO CONTROLADOR NEBULOSO FEITA NO SIMULINK



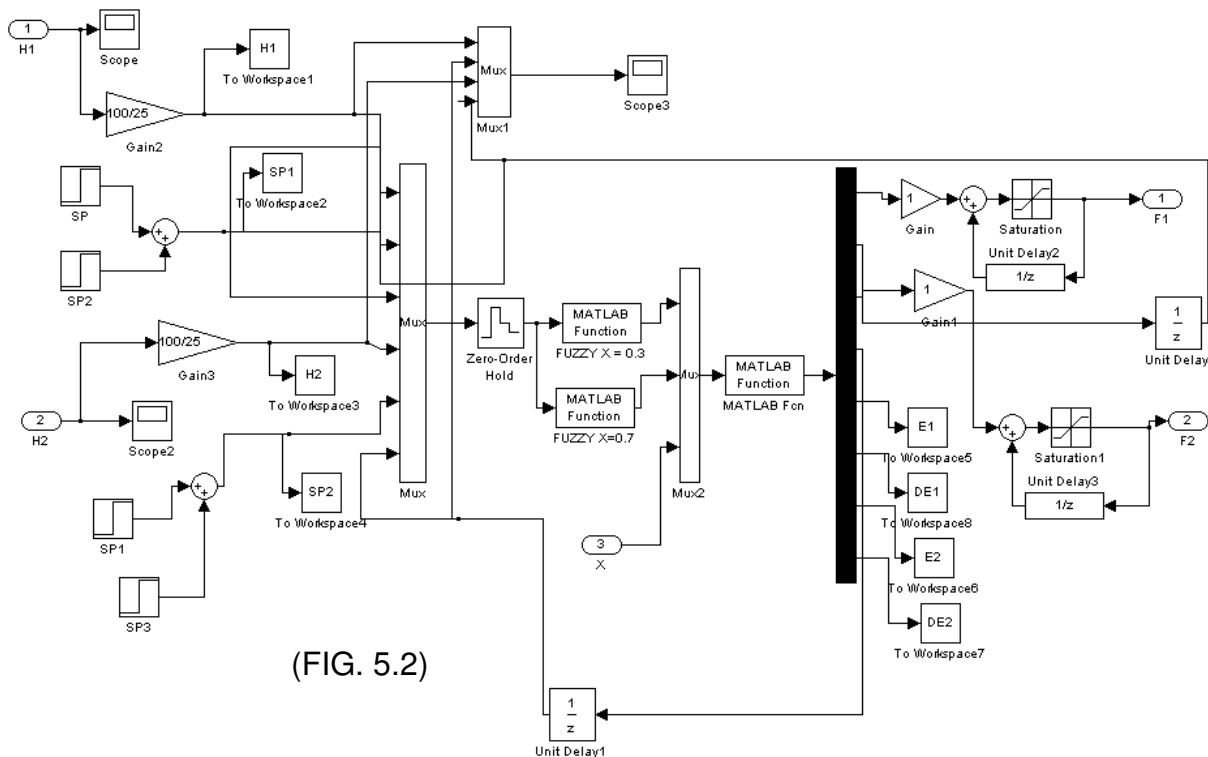
**FIG. 8.8 Controlador nebuloso**

As entradas do bloco controlador nebuloso são os níveis  $h_1$  e  $h_2$ . Os níveis  $h_1$  e  $h_2$ , juntamente com os setpoints desejados para os tanques 1 e 2, e o valor da variação do nível nos tanques 1 e 2, passam por um bloco MUX, por um zero-order hold para discretizar o sinal e dão entrada no controlador nebuloso, que possui o programa com as funções de pertinência de erro  $E$ , variação do erro  $\Delta E$ , a função de pertinência de saída  $\Delta U$  e as regras do controlador nebuloso.

Internamente ao programa, são normalizados o erro  $E$  e a variação do erro  $\Delta E$ . São então calculados os valores das funções de pertinência do erro  $E$  e da variação do erro  $\Delta E$  de acordo com as variáveis lingüísticas associadas. Com estes valores

calculados, e de acordo com as regras estabelecidas, são calculados os valores das funções de pertinência de saída  $\Delta U$ , que será então novamente convertida em variável numérica de saída. As saídas do controlador nebuloso são as vazões  $F_1$  e  $F_2$  dos ramos 1 e 2 respectivamente.

### 8.9 APÊNDICE 1: ESTRUTURA DO CONTROLADOR NEBULOSO GENÉRICO FEITA NO SIMULINK



(FIG. 5.2)

**FIG. 8.9 Esquema do controlador genérico com os dois controladores nebulosos e o sistema nebuloso**

O controlador genérico possui a mesma estrutura de entradas e saídas descritas para o controlador nebuloso FIG. A.1 acrescida de uma nova entrada, o valor nominal do parâmetro X. É substituída a Matlab-Function do apêndice 8, controlador nebuloso, por um conjunto de controladores, os controladores nebulosos ajustados para os parâmetros X em 0,3 e 0,7, um MUX das saídas desses controladores, vazões  $F_1$  e  $F_2$  calculadas pelos controladores nebulosos, e o valor do parâmetro X. Estes valores dão



entrada em uma Matlab-Function que representa o Sistema Nebuloso, que pondera o percentual das respostas de cada controlador nebuloso que deverá ser usado como saída do bloco controlador nebuloso genérico.