

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE FUZZY
EM CLP INDUSTRIAL**

Jhonantans Moraes Rocha



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE FUZZY EM CLP INDUSTRIAL

Jhonantans Moraes Rocha

*Trabalho de Graduação submetido como requisito parcial de obtenção do grau de Engenheiro de
Controle e Automação.*

Banca Examinadora

Prof. Eduardo Stockler Tognetti, ENE/UnB
Orientador

Prof. Eugênio Fortaleza, ENM/UnB
Examinador Externo

Prof. Luis Felipe Cruz Figueredo, ENE/UnB
Examinador Externo

Brasília, 07 de dezembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

ROCHA, JHONANTANS MORAES

Implementação de Controle FuzzyEm CLP Industrial [Distrito Federal] 2016.
xi, 60p., 210 x 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2016).
Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

1. Fuzzy

2. Controle

3. Quatro-Tanques

4. CLP

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROCHA, J.M. (2016). Implementação de Controle FuzzyEm CLP Industrial, Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação TG-002/2016, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 60p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jhonantans Moraes Rocha

TÍTULO: Implementação de Controle FuzzyEm CLP Industrial.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Jhonantans Moraes Rocha

Faculdade de Tecnologia - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória do autor 1

AGRADECIMENTOS

Primeira página de agradecimentos

RESUMO

Plantas descritas matematicamente por sistemas não-lineares apresentam desafios para modelagem de sistemas e para aplicação de técnicas de controle convencionais. O procedimento mais simples nestas situações é aproximá-los à um estado local, linearizado, e assumir este comportamento pontual como global do sistema. Sabe-se que esta abordagem fornece resultados que se afastam dos reais à medida que o estado do sistema distoa daquele ponto de referência. Abordagens fuzzy, como os modelos propostos por Takagi-Sugeno, são alternativas geralmente mais eficazes para solução deste problema, uma vez que fazem uma interpolação de várias modelagens em diversos pontos locais.

Este trabalho faz uso da lógica fuzzy, utilizando modelos Takagi-Sugeno, para desenvolver controladores para uma planta de quatro-tanques, um sistema não-linear com vários graus de acoplamento entre suas variáveis. O objetivo é implementar este controlador em um CLP industrial e observar seu desempenho.

ABSTRACT

Plants mathematically described by non-linear systems present challenges for system modeling and for applying conventional control techniques. The simplest procedure in these situations is to approximate these systems to a linear local state and assume this punctual behavior as a global system. It is known that this approach yields results that deviate from the real ones as the state of the system moves away from that reference point. Fuzzy approaches, such as the models proposed by Takagi-Sugeno, are generally more effective alternatives to solve this problem, since they interpolate several models in several local points.

This work makes use of fuzzy logic, using Takagi-Sugeno models, to develop controllers for a four-tank plant, a nonlinear system with several degrees of coupling between its variables. The goal is to implement this controller in an industrial PLC and observe its performance.

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	1
2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	3
2.1	SISTEMA DE QUATRO-TANQUES	3
2.2	CLP ROCKWELL 1756-L62.....	4
2.2.1	INSTALAÇÃO	5
2.2.2	INTEGRAÇÃO	7
2.3	RSLINX E RSLOGIX	8
2.3.1	LINGUAGEM LADDER	8
2.3.2	BLOCOS FUNCIONAIS	9
2.3.3	TEXTO ESTRUTURADO	10
3	SISTEMAS FUZZY.....	11
3.1	CONJUNTOS FUZZY	11
3.1.1	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	11
3.2	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	12
3.3	APLICAÇÃO	13
3.3.1	REGRAS SE-ENTÃO	14
3.4	INFERÊNCIA.....	15
3.5	MODELO FUZZY TAKAGI-SUGENO	15
3.5.1	CONJUNTOS FUZZY.....	16
3.5.2	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	17
4	MODELAGEM.....	18
4.1	MODELO NÃO LINEAR	18
4.2	LINEARIZAÇÃO	18
4.3	MODELAGEM FUZZY TAKAGI-SUGENO	19
4.3.1	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	19
4.3.2	PERTINÊNCIA.....	19
4.3.3	REGRAS SE-ENTÃO	20
4.3.4	ATIVACÃO	21
4.3.5	MODELO FINAL	21
4.3.6	CONTROLADOR FUZZY.....	21
5	CONTROLE FUZZY	23
5.1	CONCEITOS DE LMIS	23
5.2	ESTABILIDADE FUZZY.....	23
5.3	PROJETO	23

6	IMPLEMENTAÇÃO	24
6.1	IDENTIFICAÇÃO	24
6.2	CONTROLADOR FUZZY	24
6.3	RESULTADOS	24
7	RESULTADOS	25
7.1	SIMULAÇÕES	25
7.1.1	FASE MÍNIMA	25
7.1.2	FASE NÃO-MÍNIMA	26
7.2	IMPLEMENTAÇÃO	29
8	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

2.1	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES E PLANTA DIDÁTICA.	3
2.2	PLANTA DE QUATRO-TANQUES NO LARA.....	4
2.3	ESTAÇÃO DE TRABALHO.....	5
2.4	INTERIOR DO PAINEL.....	6
2.5	MÓDULOS DO PAINEL.....	7
2.6	EXEMPLO DE DIAGRAMA LADDER.....	8
2.7	EXEMPLO DE DIAGRAMA LADDER.....	9
2.8	EXEMPLO DE DIAGRAMA DE BLOCOS.....	9
2.9	EXEMPLO DE DIAGRAMA DE BLOCOS.....	10
3.1	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.	12
3.2	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.	13
3.3	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES E PLANTA DIDÁTICA.	17
4.1	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.	20
4.2	ESPAÇO DE ESTADOS DA PLANTA CONTROLADA	22
7.1	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 5, \bar{h}_2 = 5$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: $\bar{h}_1 = [10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [10 \ 15]$	26
7.2	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: $\bar{h}_1 = [10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [10 \ 15]$	26
7.3	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: $\bar{h}_1 = [10 \ 15 \ 20]$ $\bar{h}_2 = [10 \ 15 \ 20]$	27
7.4	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 5, \bar{h}_2 = 5$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: $\bar{h}_1 = [5 \ 10]$ $\bar{h}_2 = [5 \ 10]$	28
7.5	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 5, \bar{h}_2 = 5$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: $\bar{h}_1 = [5 \ 10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [5 \ 10 \ 15]$	28
7.6	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: $\bar{h}_1 = [5 \ 10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [5 \ 10 \ 15]$	29
7.7	LINEARIZAÇÃO CONVENCIONAL: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. LINEARIZAÇÕES FUZZY: UMA LINEARIZAÇÃO A CADA 1 CENTÍMETRO PARA AMBOS OS NÍVEIS.	29

LISTA DE TABELAS

2.1	ESPECIFICAÇÕES INICIAIS DA PLANTA.....	4
2.2	MÓDULOS 1756 INSTALADOS.	6
2.3	IPS DOS DISPOSITIVOS.....	7
3.1	TABELA DE EXEMPLOS	13

Símbolos Latinos

CLP Controlador Lógico Programável

Símbolos Gregos

θ Ângulo

Neste trabalho utiliza-se as denominações lógica fuzzy, lógica nebulosa e lógica difusa como sinônimos.

1 INTRODUÇÃO

Desenvolver controladores para sistemas não-lineares é quase sempre uma tarefa dispendiosa e complexa. Para plantas multivariáveis este desafio é ainda maior. Por este motivo que é prática comum recorrer-se à linearização das equações que as descrevem, o que fornece uma aproximação do sistema inicial num formato que se encaixa às teorias de controle convencionais.

A linearização simples, realizada por meio da série de Taylor, resulta uma aproximação excelente localmente. No entanto, à medida que as variáveis controladas e manipuladas se afastam do ponto de operação, condição na qual foi realizada a linearização, o modelo passa a se afastar da planta real.

Neste cenário, a abordagem fuzzy figura como excelente ferramenta para solução destes desvios. Aparecendo pela primeira vez em [1], foi aplicada à modelagem de sistemas em [2]. Seus métodos consistem na linearização simples do sistema em mais de um ponto, baseados em um conjunto de métricas relevantes para o problema em questão. Desenvolve-se então um conjunto de regras para determinar o grau de pertinência do estado do sistema à cada um dos pontos pré-modelados. Utiliza-se então como modelo a soma ponderada das linearizações por estes coeficientes de pertinência.

O objeto de estudo deste trabalho será o sistema de quatro tanques, desenvolvido por Karl Johansson [3] com o objetivo didático de demonstrar de forma ilustrativa conceitos e propriedades de sistemas com múltiplas entradas e saídas (MIMO, do inglês *multiple input, multiple output*). Ele consiste em quatro tanques interconectados, um reservatório inferior, quatro válvulas esferas e duas bombas de corrente contínua que bombeiam o fluido do reservatório inferior para os tanques de forma cruzada, de acordo com a razão entre os fluxos definida pela posição das válvulas.

O sistema de quatro tanques é não linear. Seu modelo linearizado apresenta um zero multivariável que pode estar localizado tanto no semi-plano esquerdo quanto no semi-plano direito dependendo da configuração das válvulas. A abertura delas determina se o sistema é de fase mínima ou de fase não-mínima afetando a estratégia de controle a ser adotada.

O objetivo é controlar os níveis do fluido nos tanques inferiores 1 e 2. As entradas do processo são as tensões de entrada das bombas, e as saídas são os estes níveis. As demais variáveis de processo são os níveis do fluido nos tanques 3 e 4, os fluxos da bomba e a razão entre os fluxos para os tanques.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No capítulo 2 são apresentados a planta estudada e o CLP Rockwell onde os algoritmos são implementados. Em seguida, o capítulo 3 apresenta uma introdução aos conceitos da lógica e modelagem fuzzy e como aplicá-los. No capítulo 4 são realizadas as três formas de modelagem do sistema abordadas neste trabalho: não-linear, linear e o modelo Takagi-Sugeno. No capítulo 5 o projeto do controlador é desenvolvido, seguindo os conceitos de estabilidade baseados em desigualdade lineares matriciais. O capítulo 6 apresenta a implementação dos algoritmos no CLP, utilizando as linguagens de programação aceitas por este. No

capítulo 7 são apresentados os resultados das simulações e do sistema real. Por fim as considerações finais são apresentadas no capítulo 8 .

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Sistemas controlados são constituídos essencialmente por uma ou mais plantas e por um dispositivo que implementará os algoritmos de controle aplicados à ela. Neste trabalho o objeto de estudo é uma planta de Quatro-Tanques, descrita na seção a seguir, e o controlador utilizado é um CLP Rockwell 1756-L62, apresentado logo depois na seção homônima.

2.1 SISTEMA DE QUATRO-TANQUES

Em 1999 o Professor Karl Henrick Johansson publicou o artigo "Theaching Multivariable Control Using the Quadruple-Tank System" [3], onde são apresentadas as ideias do sistema de quatro-tanques como utilizado neste trabalho. Trata-se de um laboratório didático de processo multivariável capaz de demonstrar dinâmicas de zeros alocáveis em fases mínima e não-mínima. Além disso, ilustra claramente os problemas de controle MIMO (Multiples Inputs Multiples Outputs) e de sistemas não lineares.

Seu diagrama esquemático é apresentado na Figura 2.1 a seguir. Ele consiste em quatro tanques interconectados, um reservatório inferior, quatro válvulas esferas e duas bombas de corrente contínua.

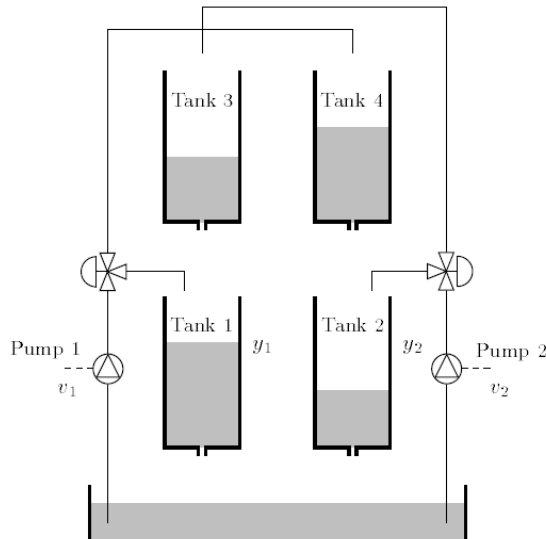


Figure 2.1: Diagrama esquemático do sistema de quatro tanques e planta didática.

As bombas impulsionam fluido por duas rotas: bomba 1 para tanques 1 e 4, bomba 2 para 2 e 3. As válvulas regulam a proporção direcionada entre os tanques inferiores e superiores de cada rota.

A Imagem 2.2 a seguir apresenta a planta utilizada neste experimento, localizada no LARA (Laboratório de Automação e Robótica) - SG-11 (UnB) .

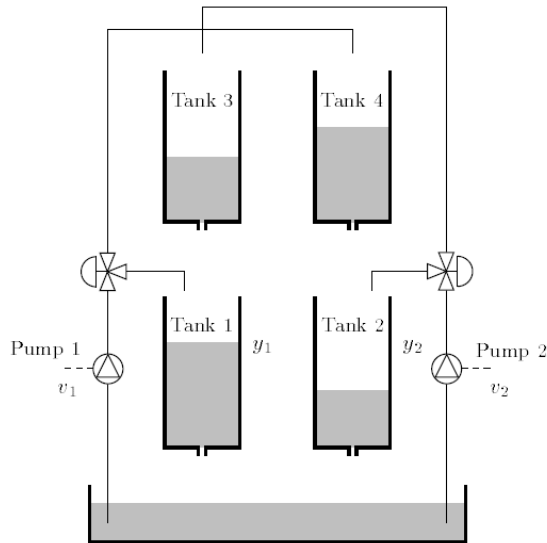


Figure 2.2: Planta de Quatro-Tanques no LARA.

Suas dimensões aferidas são apresentadas na Tabela 2.1, onde A_i e a_i representa a área da secção transversal da base do tanque i e a área de secção transversal do orifício de saída do tanque i , respectivamente. A constante de proporcionalidade fluxo-tensão na bomba j é dada por k_j . O parâmetro γ_1 é a razão entre os fluxos para os tanques 1 e 4 e γ_2 é a razão entre os fluxos para os tanques 2 e 3 e g é a aceleração da gravidade.

Table 2.1: Especificações Iniciais da Planta.

Especificações Iniciais da Planta	
A1, A3	28
A2, A4	32
a1	0.071
a2	0.071
a3	0.071
a4	0.057
g	981
k1	3,33
k2	3.35
γ_1	0.70
γ_2	0.60

2.2 CLP ROCKWELL 1756-L62

Controladores Lógico Programáveis (CLP) são largamente utilizados para controle de processos e automação industrial atualmente. Trata-se de um equipamento eletrônico digital com hardware e software adaptados para as condições industriais. Utilizam uma memória programável para armazenar

instruções de controle e conexões com diversos módulos para interface com processos externos, entrada e saída de dados, comunicação digital, entre diversas outras funções.

2.2.1 Instalação

Neste trabalho realizou-se a montagem de toda a estação de controle. Assim, escolheu-se primeiramente um local adequado para a disposição do painel de controle: próximo à planta e ao microcomputador ao qual se conecta, porém afastado de fiações elétricas ou locais úmidos. Outro cuidado deve de ser observado durante a instalação da fonte junto ao chassi, observando a compatibilidade com as tensões de entrada e saída do controlador. Seguiu-se fixação do painel no local escolhida, instalação do microcomputador à ser utilizado e instalação da fiação elétrica. Observa-se na figura 2.3 o resultado instalado.



Figure 2.3: Estação de trabalho.

A figura 2.4 a seguir ilustra o interior do painel, já com o chassi do controlador instalado e as trilhas utilizadas distribuídas no espaço restante para conexão dos bornes a serem utilizados no projeto.



Figure 2.4: Interior do painel.

Os módulos de entrada e saída foram instalados conforme a Tabela 2.2 abaixo.

Table 2.2: Módulos 1756 instalados.

Especificação	Descrição	Posição no chassi
1756-A7/B	Chassi	.
1756-L62	Controlador	0
1756-ENBT/A	EtherNetIp	1
1756-IF8/A	Entradas Analógicas	2
1756-OF8/A	Saídas Analógicas	3
1756-IB16/A	Entradas DC	4
1756-OB8I/A	Saídas DC	5

Observa-se na Figura 2.5 a seguir a configuração instalada.



Figure 2.5: Módulos do painel.

2.2.2 Integração

Seguiu-se a configuração dos módulos de comunicação com o CLP. Dois modos são disponíveis com os módulos utilizados: serial, realizada diretamente com o controlador, e Ethernet, através do módulo EtherNetIP. Ambas foram implementadas e testadas.

Para comunicação serial, basta configurar a entrada serial no computador a ser utilizado e em seguida configurar o controlador no software RSLinx [4]. Para utilizar a comunicação EtherNetIp é necessário antes configurar o módulo EtherNetIp [5]. O software BOOTP/DHCP torna possível assinar um endereço IP para o módulo recém instalado. Para que a comunicação em uma rede EtherNetIp ocorra corretamente todos os dispositivos dela precisam possuir endereços IP seguindo o padrão definido pela máscara de sub-rede, neste caso, 255.255.255.0. Isso significa, basicamente, que os pontos comunicantes da rede devem possuir ids únicos apenas nos último octeto de seus endereços. A tabela a seguir apresenta os endereços utilizados, bem como a configuração padrão da rede.

Table 2.3: IPs dos dispositivos

Dispositivo	Endereço
PC (RSLinx)	192.168.0.10
1756-ENBT/A (CLP)	192.168.0.22
Geral	192.168.0.xxx

Um **importante** cuidado de segurança observado foi o aterramento de diversos elementos do

equipamento. É conhecida sua capacidade de operação em condições adversas, mesmo assim, como precaução houve o cuidado de aterrar o chassi, a placa onde foi instalado e o painel exterior.

2.3 RSLINX E RSLOGIX

Os principais softwares utilizados para implementação do controlador são o RSLinx e o RSLogix. O primeiro é responsável por estabelecer a comunicação com o CLP Rockwell e sua ampla variedade de aplicativos e módulos. A imagem 2.6 apresenta sua interface, onde é possível visualizar o controlador e os módulos instalados. A partir deste menu são acessíveis diversas funções de configuração e exibição das informações dos dispositivos.

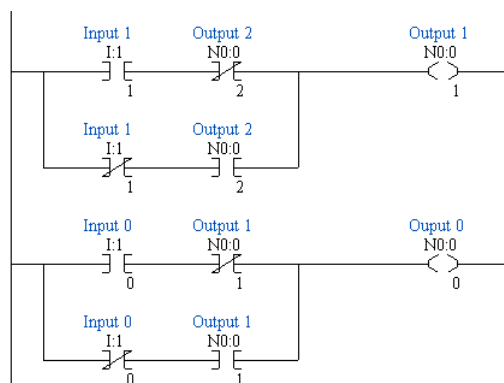


Figure 2.6: Exemplo de Diagrama Ladder.

O RSLogix 5000 é o ambiente de desenvolvimento proprietário da Rockwell (Allen-Bradley). Neste trabalho, os controladores foram desenvolvidos no RSLogix e enviados (Download) para o CLP em conjunto com o RSLinx. As seções a seguir apresentam as linguagens de desenvolvimento disponibilizadas pelo RSLogix, a saber linguagem Ladder, blocos de funções e texto estruturado.

2.3.1 Linguagem Ladder

A linguagem Ladder é a pioneira dos CLPs por se tratar de uma evolução natural de diagramas elétricos, utilizados antes da chegada dos controladores digitais. Seu ambiente de desenvolvimento utiliza o posicionamento de símbolos e blocos para implementação da lógica de controle. O ambiente inicial é formado por duas linhas verticais, que representam nível lógico alto (à esquerda) e baixo (à direita) de um sistema. Entre essas linhas são desenhados ramos horizontais que representam representados os estados do CLP.

Uma forma de compreender essa linguagem seria como uma série de conexões de contatos e bobinas. Se for possível traçar um caminho da esquerda para direita, conectando-se à uma bobina de saída ao final, então o valor dessa bobina será verdadeiro. Trabalhando-se com controladores digitais, são criadas variáveis no programa que representam diretamente os valores presentes nos módulos de saída e entrada. Essas variáveis recebem o nome de TAGs. Assim, as variáveis de entradas são assinaladas às tags utilizadas como chaves e as variáveis de saídas às tags associadas às bobinas de saída.

Percorrendo-se o caminho da esquerda para direita em um ramo, ao se chegar à uma chave, observa-se se o valor assinalado à ela é verdadeiro. Caso seja, continua-se o caminho até uma bobina de saída. Se está for alcançada, seu valor é setado para verdadeiro, consequentemente a saída associada a ela recebe a tensão associado à este nível lógico no controlador.

A figura 2.7 à seguir ilustra um exemplo.

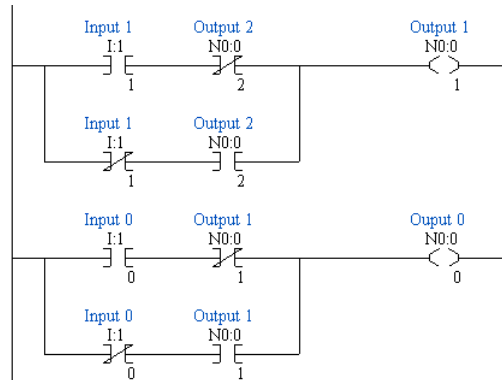


Figure 2.7: Exemplo de Diagrama Ladder.

2.3.2 Blocos Funcionais

Trata-se de outra linguagem de programação gráfica disponível aos CLPs Rockwell. É bastante semelhante à observada em vários outros softwares comuns ao meio acadêmico, como o MATLAB. Para sua utilização, assinala-se tags às entradas e saídas dos módulos já adicionados ao projeto. O desenvolvimento utiliza blocos de entradas e saídas associados à essas variáveis. Conexões entre os blocos, por meio de linhas representam passagem dos valores por esses fios. A lógica de controle é feita por meio de blocos de funções, estes possuem uma ou mais entradas e uma ou mais saídas. Os valores assinalados à suas saídas são determinados pelas funções às quais estão associados e que utilizam os valores de entrada como argumentos.

A figura 2.8 à seguir ilustra um exemplo.

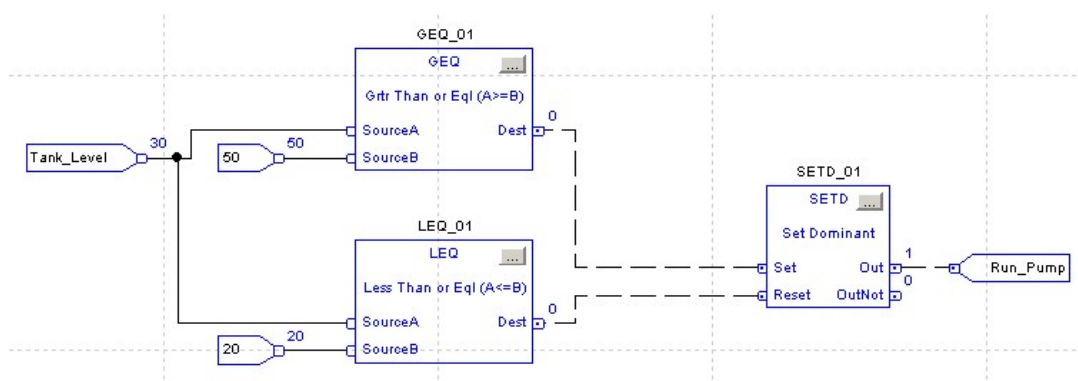


Figure 2.8: Exemplo de diagrama de blocos.

Observa-se o caso do bloco GEQ_01. Suas entradas são o nível do tanque (SourceA = Tank_Level) e um valor constante (SourceB = 50). Sua saída (dest) será assinalada com nível lógico verdadeiro

apenas quando $SourceA \geq SourceB$, ou seja, $Dest = 1$ se $Tank_Level \geq 50$, sendo $Dest = 0$ caso contrário.

2.3.3 Texto Estruturado

A linguagem texto estruturado é muito semelhante às linguagens estruturais C e Pascal. Como elas, é baseada no uso simples de comandos que são executados sequencialmente em seu desenvolvimento. Da mesma forma que as anteriores, esta linguagem utiliza Tags como variáveis e é a partir delas que se faz a leitura das entradas e definem-se as saídas.

A figura 2.9 à seguir ilustra um exemplo.

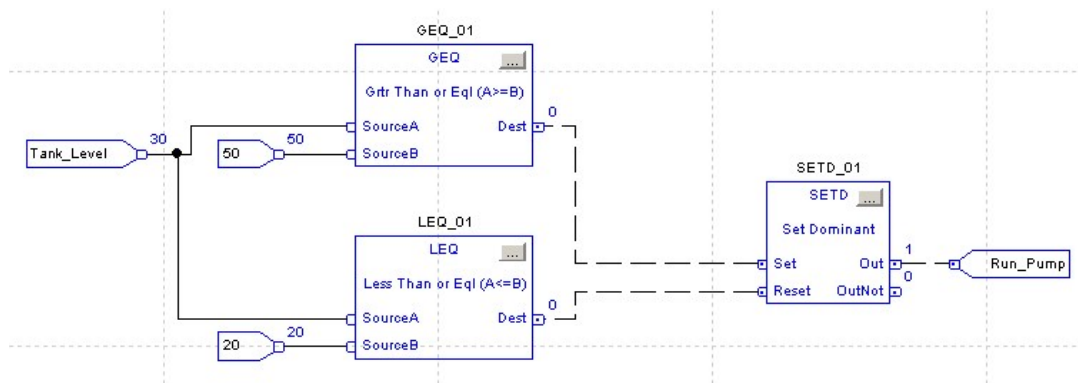


Figure 2.9: Exemplo de diagrama de blocos.

3 SISTEMAS FUZZY

A lógica fuzzy, ou difusa, foi introduzida originalmente por Lofti A. Zadeh, em seu artigo "Fuzzy sets and systems" [1]. Sua teoria diverge da lógica booleana convencional no tratamento da pertinência das variáveis, podendo assumir qualquer valor entre todos os possíveis de um intervalo. Essa abordagem é mais eficaz na descrição de alguns sistemas reais, uma vez que é praticamente eliminar incertezas nos modelos que os representam. Este capítulo apresenta os fundamentos desse paradigma bem como sua aplicação na modelagem, proposta por Takagi e Sugeno [2].

3.1 CONJUNTOS FUZZY

De acordo com a teoria de conjuntos clássica, um elemento x qualquer, pode pertencer ou não à um conjunto universo de discurso U , $x \in U$. Ou seja, para qualquer conjunto determinado, pode-se estar completamente dentro ou completamente fora dele. Como exemplo, $f_u(x)$ a função de pertinência de x ao conjunto U , tem-se:

$$f_u(x) : U \rightarrow \{0, 1\} \qquad f_u(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in U \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.1)$$

Essa definição binária se encaixa bem em problemas restritos, cujo caráter dos sistemas reflita essa separação clara de estados, por exemplo a paridade ou não de uma da soma dos bits de uma mensagem binária. Este valor ou é "completamente" ímpar ou par. No entanto, grande parte dos sistemas estudados nas teorias de controle trabalha com grandezas que não possuem limites tão claros assim, como exemplo a sensação térmica. Apesar de a temperatura ser matematicamente bem definida, existem descrições como "frio" e "quente" que não podem ser representadas com este conjunto binário, uma vez que são conceitos vagos e imprecisos.

A abordagem fuzzy aparece como uma alternativa muito capaz de tratar estes casos. Conjuntos fuzzy são caracterizados por uma função de pertinência fuzzy, que relaciona cada elemento do universo discurso à sua conformidade no conjunto de forma contínua, podendo abranger todos os valores no intervalo de pertinência.

3.1.1 Variáveis Linguísticas

As variáveis linguísticas são objetos que constituem os conjuntos nebulosos. Tratam-se de traduções das variáveis reais na forma de valores linguísticos, não números. Assim, prosseguindo o exemplo anterior, a temperatura seria a variável linguística e "quente", "frio", "muito quente" e "muito frio" seus valores linguísticos. Estes últimos são os conjuntos difusos e possuem, cada um deles, uma função de pertinência mapeando a adequação de uma determinada temperatura a eles.

3.2 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

O conceito chave de toda a abordagem fuzzy são as funções de pertinência. Em exemplo, dados os conjuntos fuzzy U_1 , U_2 e U_3 , cada qual possui sua função de pertinência $f_1(x)$, $f_2(x)$ e $f_3(x)$, para todo elemento pertencente ao universo de discurso.

$$f_i(x) : i \rightarrow [0, 1] \quad (3.2)$$

Onde $f_i(x) = 0$ implica que o elemento x é "completamente não" U_i e $f_i(x) = 1$ indica que x é "completamente" U_i .

Apesar de traduzir operar sobre grandezas linguísticas, é importante notar que normalmente os elementos são variáveis numéricas, portanto as funções de pertinência precisam ser bem definidas no intervalo do conjunto. Os formatos mais comuns para elas são apresentados na Figura 3.1 a seguir:

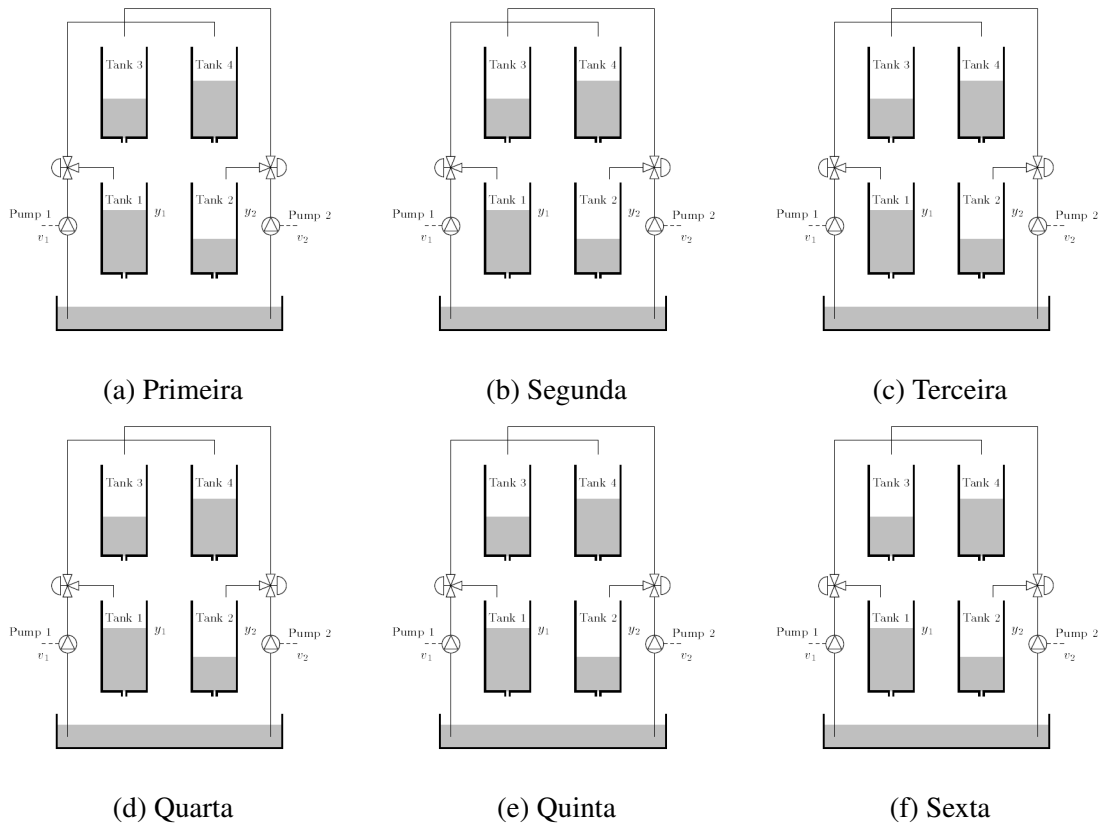


Figure 3.1: Funções de Pertinência.

Voltando ao exemplo temperatura, segue-se abaixo o procedimento para definição:

- **Definir os conjuntos fuzzy:** {"muito frio"}, {"frio"}, {"quente"}, {"muito quente"}
- **Definir os limites de cada conjunto:** $[-10^{\circ}C, 5^{\circ}C]$, $[5^{\circ}C, 15^{\circ}C]$, $[15^{\circ}C, 30^{\circ}C]$, $[30^{\circ}C, 45^{\circ}C]$
- **Definir as funções de pertinência:** Funções triangulares, com picos nos centros dos intervalos e zeros fora deles.

Os resultados do exemplo são apresentados na Figura 3.2 a seguir:

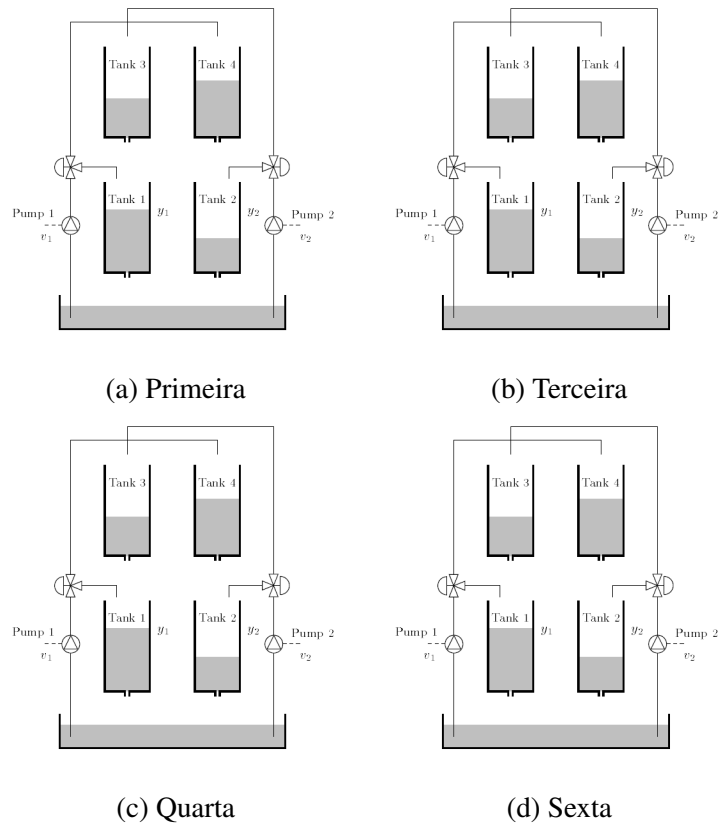


Figure 3.2: Funções de Pertinência.

Table 3.1: Tabela de Exemplos

Temperatura	Muito Frio	Frio	Quente	Muito Quente
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

É importante notar que a soma final dos valores de todas as pertinências de um elemento precisa ser 1, para que haja coerência entre o modelo dos conjuntos e o real.

3.3 APLICAÇÃO

A aplicação da lógica fuzzy na teoria de controle se dá através da utilização de regras que definem o modelo final baseando-se no grau de pertinência do estado do sistema a cada um dos conjuntos

difusos.

De maneira similar à tradicional, a lógica fuzzy baseia-se no paradigma de implicações, ou *modus ponens*. De acordo com esta linha de raciocínio, definem afirmações premissas que quando verdadeiras determinam a autenticidade de afirmações conclusões. Por exemplo:

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \text{ Se está chovendo então é perigoso dirigir} \\ (2) \text{ Está chovendo} \\ (3) \text{ É perigoso dirigir} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

No exemplo 3.3 a afirmação (1) é chamada de regra de implicação, ou regra Se-Então, e é ela quem rege o comportamento da conclusão (3) de acordo com a premissa (2).

3.3.1 Regras Se-Então

Como visto no exemplo 3.3 as regras Se-Então são as premissas que definem os resultados das afirmações. Regras Se-Então e o raciocínio fuzzy formam o cerne da vasta gama de sistemas fuzzy encontrados na literatura (Jang et al., 1997). Uma regra Se-Então (também conhecida como regra fuzzy, implicação fuzzy ou proposição condicional fuzzy) tem a seguinte forma $R : \text{Se } x \text{ é } A \text{ Então } y \text{ é } B$ (2.4) onde R identifica a regra; A e B são variáveis linguísticas; x , y são elementos dos universos de discurso X , Y , respectivamente. Normalmente, denomina-se a proposição $x \text{ é } A$ como antecedente, enquanto $y \text{ é } B$ é chamado conseqüente (ou conclusão); x é chamada de variável premissa. Na concepção tradicional, ativa-se (dispara-se) uma regra Se-Então somente quando a variável premissa x é exatamente igual ao antecedente. Neste caso, a inferência produzida será: y é exatamente igual ao conseqüente

Regra i:

$$\text{SE: } v_1(t) \text{ é } M_{i1} \text{ e } v_2(t) \text{ é } M_{i2} \text{ e } \dots \text{ e } v_n(t) \text{ é } M_{in}, \quad (3.4)$$

$$\text{ENTÃO : } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Regra i:

$$\text{SE: } h_1(t) \text{ é } P_{1,i} \text{ e } h_2(t) \text{ é } P_{2,i}, \quad (3.6)$$

$$\text{ENTÃO: } \dot{h}(t) = A_i \Delta h_i(t) + B_i \Delta u_i(t) \quad (3.7)$$

Cada regra definida implica um sistema linear diferente, que melhor representa a dinâmica da planta em cada região. Essas linearizações são baseadas nas variáveis de desvio, assim, para cada regra i , temos:

$$\Delta h_i(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) - \bar{h}_{1i} \\ h_2(t) - \bar{h}_{2i} \\ h_3(t) - \bar{h}_{3i} \\ h_4(t) - \bar{h}_{4i} \end{bmatrix} \quad \Delta u_i(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) - \bar{u}_{1i} \\ u_2(t) - \bar{u}_{12} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.4 INFERÊNCIA

Sistemas de inferência são ferramentas computacionais utilizadas nas mais diversas áreas da Engenharia e agregam os conceitos de conjuntos fuzzy, variáveis lingüísticas e raciocínio aproximado, processando dados por meio de mecanismo de inferência. A estrutura básica de um sistema de inferência é mostrada na Figura 2.4. Sistemas de inferência normalmente, embora não seja obrigatório, recebem como entrada valores precisos⁵. Isto ocorre pois, na prática, os dados de entrada são obtidos por meio de medições ou observações. É necessário portanto a etapa chamada fuzzificação, que transforma entradas precisas em conjuntos fuzzy. Após a interpretação das entradas pelo mecanismo de inferência, etapa identificada como inferência na Figura 2.4, é necessário fornecer uma informação precisa. No caso de um sistema 5Também chamadas entradas “crisp” 2. Fundamentos Fuzzy 11 PSfrag replacemen Entradas Precisas Precisas Saídas Conjuntos Conjuntos ou Funções Fuzzy Fuzzy Fuzzificação Regras Defuzzificação Inferência Figura 2.4: Diagrama esquemático do sistema de inferência. No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos fuzzy ao longo de regras Se-Então para processar, por meio de um mecanismo de inferência, as informações da entrada e produzir uma conclusão. A inferência pode ser resumida em quatro etapas (Jang et al., 1997). Em uma primeira instância, são avaliados os graus de compatibilidade das variáveis premissas com seus respectivos antecedentes nas regras Se-Então. Considerando o caso da regra (2.4), isto significa atribuir uma pertinência da variável x no conjunto A . Em seguida, é necessário determinar a força (grau) de ativação de uma regra. O grau de ativação da regra é dado pela combinação dos graus de compatibilidade das variáveis premissas com seus antecedentes. Na regra (2.5) cada antecedente (x é A), (z é C), produz um grau de compatibilidade, $f_A(x)$, $f_C(z)$. De acordo com os conectivos lógicos presente na premissa da regra e do tipo de norma adotada, obtém-se um grau de ativação para a regra R , veja na Figura 2.5 denotado por α . Caso em (2.5), por exemplo, fosse utilizado o conectivo “ou” o resultado produzido seria diferente. Com base no grau de ativação determina-se o consequente produzido por uma determinada regra, chamado consequente induzido. Considere novamente a regra (2.5). Se o grau de ativação desta regra é 1, significa que o consequente produzido é o próprio B . Ademais, de acordo com o grau de ativação, o consequente terá um grau de pertinência em B , i.e, y é B . Não raro um sistema de inferência possui mais de uma regra. Cada regra produz um consequente e o resultado global da etapa inferência dependerá da combinação desses consequentes. Esta etapa é chamada de agregação, a qual tem por resultado um conjunto fuzzy (função de pertinência) ou uma função.

3.5 MODELO FUZZY TAKAGI-SUGENO

$$\begin{aligned}w_1(t) &= M_1(h_1(t)) * N_1(h_2(t)) \\w_2(t) &= M_1(h_1(t)) * N_2(h_2(t)) \\w_3(t) &= M_2(h_1(t)) * N_1(h_2(t)) \\w_4(t) &= M_2(h_1(t)) * N_2(h_2(t))\end{aligned}\tag{3.9}$$

$$\dot{h}(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i(h(t))(A_i \Delta h_i(t) + B_i \Delta u_i(t))}{\sum_{i=1}^4 w_i(h)} \quad (3.10)$$

Na concepção fuzzy, a regra Se-Então é disparada quando houver um grau de similaridade não nulo entre a variável premissa e o antecedente. Como resultado, infere-se uma conclusão que mantenha algum grau de similaridade com o conseqüente da regra. Nota-se, mais uma vez, que os conceitos tradicionais estão embutidos na teoria fuzzy. Se a variável premissa x possui total similaridade com o antecedente A então a conclusão será que y é o próprio B . Uma regra fuzzy pode possuir mais de um antecedente. Um exemplo simples é dado a seguir: $R : \text{Se } x \text{ é } A \text{ e } z \text{ é } C \text{ Então } y \text{ é } B$ (2.5) Neste caso, a maneira de inferir uma conclusão é bem mais elaborada. A conclusão depende tanto da similaridade de x em A , quanto da similaridade de z em C . Além disso, depende da relação entre ambos antecedentes, bem como da relação deles com o conseqüente. Por exemplo, considere um veículo trafegando em uma estrada. Uma regra com múltiplos antecedentes para inferir sobre a velocidade adequada do carro pode ser: “se a curva é fechada ou a pista está molhada, então dirija em baixa velocidade”. No caso de pista seca, quanto mais fechada for a curva, menor deve ser a velocidade. Em outras palavras, quanto maior for a pertinência da variável “curva” no conjunto fuzzy “fechada”, maior deverá ser a pertinência da “velocidade” no conjunto “baixa”. Se o carro viaja pela mesma curva porém com pista molhada, por questão de segurança, a velocidade deverá ser ainda menor. Neste caso a pertinência da “velocidade” no conjunto “baixa” será afetada também pelo valor lingüístico da variável “pista”. Existem diversas configurações que definem como os antecedentes interagem entre si e com o conseqüente da regra para produzir uma conclusão. Tais configurações são chamadas mecanismos de inferência e podem ser vistos com maiores

A Teoria Fuzzy tem seu princípio cunhado por [?]. Os trabalhos seguintes, como o [?] abordaram sua utilização para a modelagem de sistemas complexos por meio de aproximações, utilizando uma teoria de conjuntos diferente da convencional.

3.5.1 Conjuntos Fuzzy

A teoria de conjuntos convencional utiliza lógica booleana para definir os valores lógicos das funções de pertinências dos conjuntos. Assim, dado X o universo de discurso de um determinado conjunto C , um elemento genérico x tem sua função de pertinência ao conjunto C dado por:

$$f_C(x) : X \rightarrow \{0, 1\}$$

$$f_C(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in C \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin C \end{cases}$$

Existem, no entanto, situações em que a definição dos conjuntos de seus limites se tornam muito subjetivos. Nestas situações, a utilização da lógica difusa apresenta vantagens para a modelagem de sistemas.

Considere-se como exemplo a temperatura de uma sala. Pode-se definir dois conjuntos de estados {quente, frio}. No entanto, torna-se um pouco confuso e arbitrário decidir em qual destes conjuntos

um estado específico se encaixa. Utilizando funções de pertinências não binárias, observa-se o **quanto** determinada temperatura se encaixa em cada um dos conjuntos. Funções de pertinências fuzzy são definidas da forma:

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

3.5.2 Funções De Pertinência

Existem várias normas e regras disponíveis para funções de pertinência. Este trabalho considera a norma triangular. Seguindo o exemplo dado, dada uma temperatura x verifica-se o quão pertencente aos conjuntos *quente* e *fria* ela é utilizando a função do gráfico a seguir:

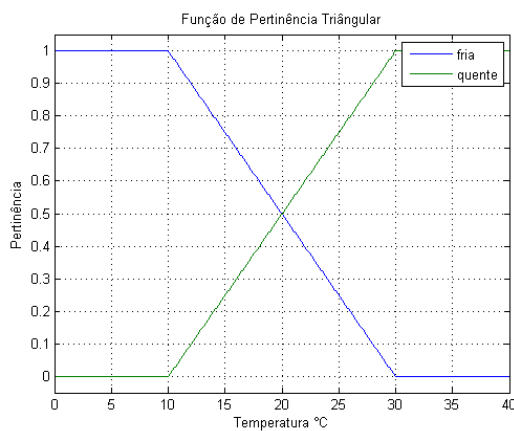


Figure 3.3: Diagrama esquemático do sistema de quatro tanques e planta didática.

Nota-se que se escolhem limites para os conjuntos: toda temperatura abaixo de 10 é fria; toda temperatura acima de 30 é quente. As demais, pertencem mais ou menos à cada um dos conjuntos.

Em lógica Fuzzy, as variáveis definidas de forma subjetiva, com expressões para limites são chamadas variáveis linguísticas.

4 MODELAGEM

Os modelos físicos do sistema de quatro-tanques utilizados neste trabalho são apresentados nas seções a seguir.

4.1 MODELO NÃO LINEAR

Baseado nos princípios de conservação de massa e na lei de Bernoulli para líquidos incompressíveis tem-se o seguinte sistema de equações não lineares que descrevem o processo.

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A_1}(a_3\sqrt{2gh_3} + \gamma_1 k_1 v_1 - a_1\sqrt{2gh_1}) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A_2}(a_4\sqrt{2gh_4} + \gamma_2 k_2 v_2 - a_2\sqrt{2gh_2}) \\ \dot{h}_3 = \frac{1}{A_3}((1 - \gamma_2)k_2 v_2 - a_3\sqrt{2gh_3}) \\ \dot{h}_4 = \frac{1}{A_4}((1 - \gamma_1)k_1 v_1 - a_4\sqrt{2gh_4}) \end{cases} \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1, os termos h_i , A_i e a_i representam o nível de água, a área da secção transversal da base do tanque i e a área de secção transversal do orifício de saída do tanque i , $i = 1, 2, 3, 4$, respectivamente. A constante de fluxo da bomba j e a tensão aplicada sobre ela são dadas por k_j e v_j , $j = 1, 2$. O parâmetro γ_1 é a razão entre os fluxos para os tanques 1 e 4 enquanto γ_2 é a razão entre os fluxos para os tanques 2 e 3 e g é a aceleração da gravidade.

É fácil notar nas equações deste sistema os termos não lineares (as raízes). O aspecto do acoplamento entre as variáveis também pode ser observado ao analisar as equações: o nível h_1 varia conforme o fluxo da bomba 1, dependente de v_1 , e conforme o nível h_3 , que por sua vez depende do fluxo da bomba 2, v_2 . Assim, as variáveis manipuladas, v_1 e v_2 , influem em ambos os níveis simultaneamente, apresentando um desafio considerável para a estabilização dos níveis desejados, h_1 e h_2 , que são as variáveis controladas deste trabalho.

4.2 LINEARIZAÇÃO

Linearizando o sistema em torno do ponto de operação $\bar{h} = (\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{h}_3, \bar{h}_4)$ e $\bar{v} = (\bar{v}_1, \bar{v}_2)$, por expansão em série de Taylor, obtém-se a seguinte representação no espaço de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta h}_1 \\ \dot{\Delta h}_2 \\ \dot{\Delta h}_3 \\ \dot{\Delta h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1\sqrt{2g}}{2A_1\sqrt{h_1}} & 0 & \frac{a_3\sqrt{2g}}{2A_1\sqrt{h_3}} & 0 \\ 0 & \frac{-a_2\sqrt{2g}}{2A_2\sqrt{h_2}} & 0 & \frac{a_4\sqrt{2g}}{2A_2\sqrt{h_4}} \\ 0 & 0 & \frac{-a_3\sqrt{2g}}{2A_3\sqrt{h_3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-a_4\sqrt{2g}}{2A_4\sqrt{h_4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

em que y_i são as saídas medidas do sistema, $\Delta h_i = h_i - \bar{h}_i$, $\Delta v_i = v_i - \bar{v}_i$, e $i = 1, 2, 3, 4$.

E por fim, a matriz função de transferência do sistema obtida é:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{T_1 \gamma_1 k_1}{A_1(1+sT_1)} & \frac{T_1(1-\gamma_2)k_2}{A_1(1+sT_3)(1+sT_1)} \\ \frac{T_2(1-\gamma_1)k_1}{A_2(1+sT_4)(1+sT_2)} & \frac{T_2\gamma_2 k_2}{A_2(1+sT_2)} \\ 0 & \frac{T_3(1-\gamma_2)k_2}{A_3(1+sT_3)} \\ \frac{T_4(1-\gamma_1)k_1}{A_4(1+sT_4)} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

em que $G(s) = \frac{\Delta h(s)}{\Delta v(s)}$ e $T_i = \frac{2A_i\sqrt{h_i}}{a_i\sqrt{2g}}$, $i = 1, 2, 3, 4$.

4.3 MODELAGEM FUZZY TAKAGI-SUGENO

A modelagem via Takagi-Sugeno segue os mesmos passos propostos na Seção 3.5 : escolhem-se as variáveis linguística do sistema e seus conjuntos fuzzy, definem-se as funções de pertinência de cada um deles, as regras Se-Então, a fórmula de ativação e o resultado final do modelo.

4.3.1 Variáveis Linguísticas

Como visto, as regras do modelo são ativadas de acordo com o estado atual do sistema. As variáveis aferidas da planta são os níveis, por este motivo serão as variáveis linguísticas definidas para o modelo fuzzy. Escolhem-se então "Nível do Tanque 1" e "Nível do Tanque 2" e os conjuntos nível baixo, nível alto para cada uma.

4.3.2 Pertinência

Como visto, a linearização é baseada nos estados estacionários do sistema, ou seja, são escolhidos pontos em que $\dot{h}(t) = 0$. Assim, o modelo linear trata do valor de desvio das variáveis e é dado por:

$$\dot{h}(t) = A\Delta h(t) + B\Delta u(t) \quad (4.5)$$

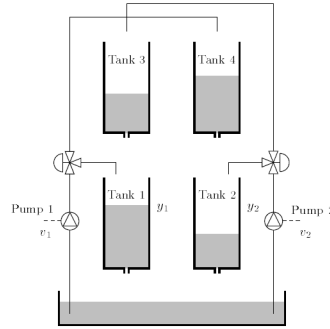
Seguindo os passos descritos na Seção 3.2 definem-se os conjuntos escolhidos. Há quatro vértices para os estados do sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Nível 1 Baixo} \\ \text{Nível 1 Alto} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Nível 2 Baixo} \\ \text{Nível 2 Alto} \\ \text{Nível 2 Baixo} \\ \text{Nível 2 Alto} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

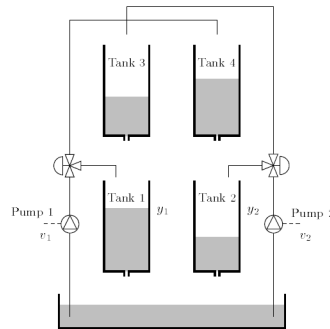
Obtemos um modelo linear em cada um destes vértices:

$$\dot{h}(t) = A_i \Delta h(t) + B_i \Delta u(t) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.7)$$

Como descrito na Tabela 2.1 , a altura dos tanques é de 25cm. Assim, escolhe-se os limitantes 5cm como "completamente" verdade para o nível baixo e 25cm como "completamente" verdade para o nível alto. As funções de pertinência obtidas são:



(a) Primeira



(b) Terceira

Figure 4.1: Funções de Pertinência.

Onde $M_1(h_1(t))$ e $M_2(h_1(t))$ é o grau de pertinência do nível $h_1(t)$ aos conjuntos "baixo" e "alto", respectivamente. De maneira análoga, tem-se $N_1(h_2(t))$ e $N_2(h_2(t))$ para o nível $h_2(t)$.

4.3.3 Regras Se-Então

Haverá uma regra para cada um dos sistemas dados:

- Regra 1:

$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é baixo e } h_2 \text{ é baixo} \\ \text{ENTÃO} & \dot{h}(t) = A_1 \Delta h(t) + B_1 \Delta u(t) \end{cases}$$

- Regra 2:

$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é baixo e } h_2 \text{ é alto} \\ \text{ENTÃO} & \dot{h}(t) = A_2 \Delta h(t) + B_2 \Delta u(t) \end{cases}$$

- Regra 3:

$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é alto e } h_2 \text{ é baixo} \\ \text{ENTÃO} & \dot{h}(t) = A_3 \Delta h(t) + B_3 \Delta u(t) \end{cases}$$

- Regra 4:

$$\begin{cases} \text{SE} & h_1 \text{ é alto e } h_2 \text{ é alto} \\ \text{ENTÃO} & \dot{h}(t) = A_4 \Delta h(t) + B_4 \Delta u(t) \end{cases}$$

4.3.4 Ativação

O nível de ativação de cada uma das **Regras** i é dado respectivamente por w_i :

$$\begin{aligned} w_1(t) &= M_1(h_1(t)) * N_1(h_2(t)) \\ w_2(t) &= M_1(h_1(t)) * N_2(h_2(t)) \\ w_3(t) &= M_2(h_1(t)) * N_1(h_2(t)) \\ w_4(t) &= M_2(h_1(t)) * N_2(h_2(t)) \end{aligned} \tag{4.8}$$

4.3.5 Modelo Final

O modelo Takagi-Sugeno fornece, finalmente:

$$\dot{h}(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i(h(t))(A_i \Delta h(t) + B_i \Delta u(t))}{\sum_{i=1}^4 w_i(h(t))} \tag{4.9}$$

4.3.6 Controlador Fuzzy

O desenvolvimento do controlador para este modelo segue os mesmos passos: realiza-se a sintonização do ganho K a ser utilizado para cada regra, o grau de ativação de cada ganho é obtido pelas mesmas equações 4.8. O ganho final a ser utilizado é dado por:

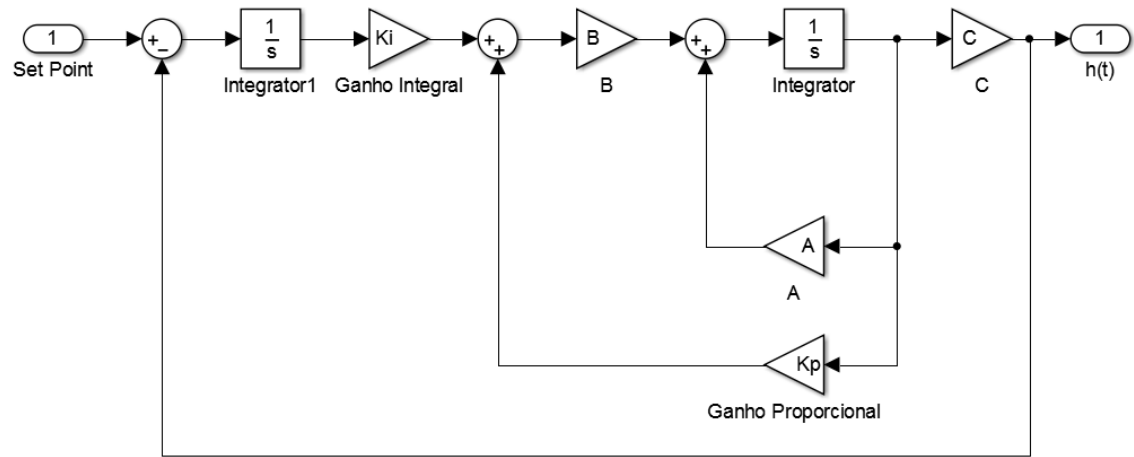


Figure 4.2: Espaço de estados da planta controlada

$$K = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i(h(t)) K_i}{\sum_{i=1}^4 w_i(h(t))} \quad (4.10)$$

5 CONTROLE FUZZY

5.1 CONCEITOS DE LMIS

5.2 ESTABILIDADE FUZZY

5.3 PROJETO

6 IMPLEMENTAÇÃO

6.1 IDENTIFICAÇÃO

6.2 CONTROLADOR FUZZY

6.3 RESULTADOS

7 RESULTADOS

A partir dos

7.1 SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações de resposta ao degrau do sistema de quatro-tanques modelado seguindo as abordagens apresentadas. Por se tratar de um problema multivariável com zeros alocáveis, simulou-se as respostas dos modelos para os casos de **fase-mínima** e de **fase não mínima**. Os resultados são observados nas seções a seguir.

7.1.1 Fase Mínima

A tabela a seguir apresenta as especificações do sistema, nota-se por γ_1 e γ_2 que o sistema está em fase mínima.

Especificações Iniciais da Planta	
A1, A3	28
A2, A4	32
a1, a3	0.071
a2, a4	0.057
g	981
k1	3,33
k2	3.35
γ_1	0.70
γ_2	0.60

Realiza-se

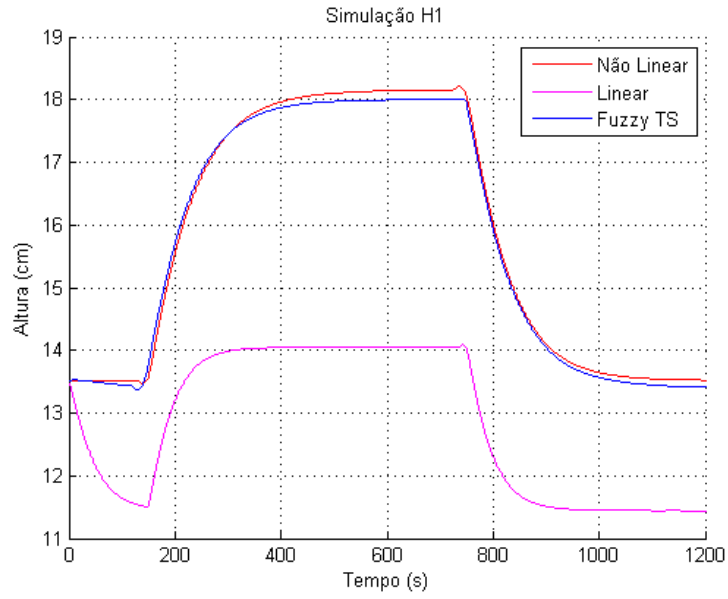


Figure 7.1: Linearização Convencional: $\bar{h}_1 = 5, \bar{h}_2 = 5$. Linearizações Fuzzy: $\bar{h}_1 = [10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [10 \ 15]$

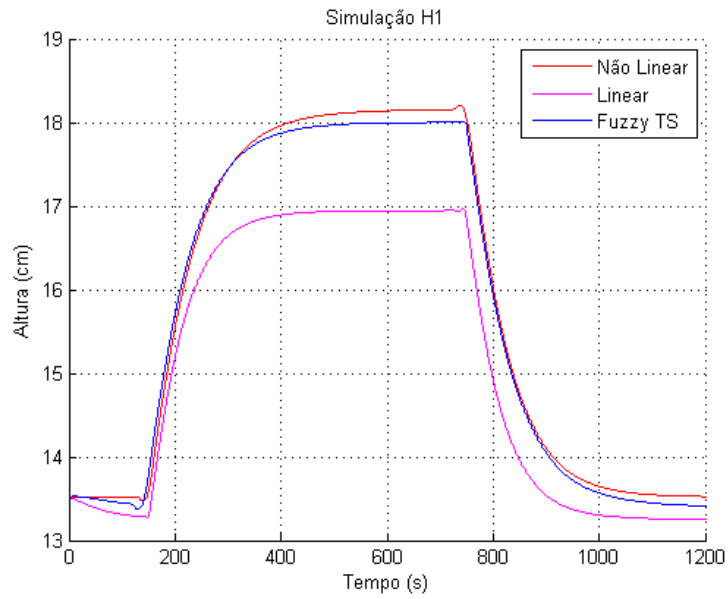


Figure 7.2: Linearização Convencional: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. Linearizações Fuzzy: $\bar{h}_1 = [10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [10 \ 15]$

7.1.2 Fase Não-Mínima

A tabela a seguir apresenta as especificações do sistema, nota-se por γ_1 e γ_2 que o sistema está em fase não mínima.

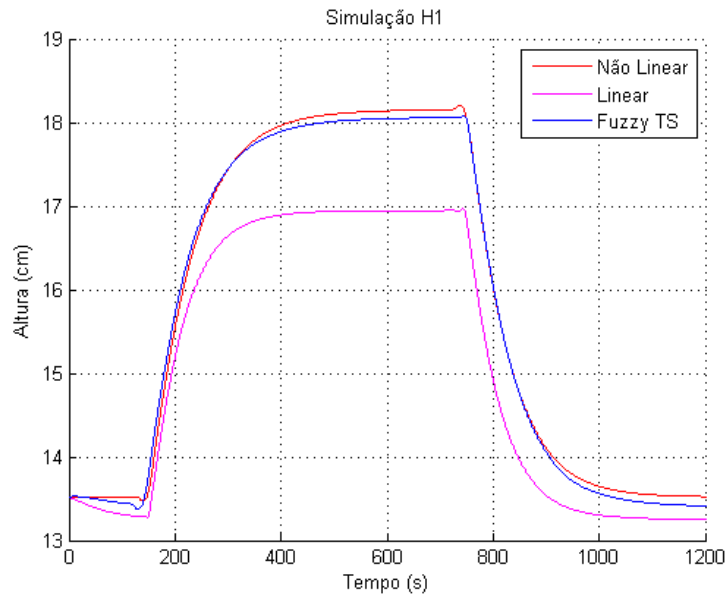


Figure 7.3: Linearização Convencional: $\bar{h}1 = 10, \bar{h}2 = 10$. Linearizações Fuzzy: $\bar{h}1 = [10 \ 15 \ 20]$ $\bar{h}2 = [10 \ 15 \ 20]$

Especificações do sistema	
' A1, A3	28
A2, A4	32
a1, a3	0.071
a2, a4	0.057
g	981
k1	3,14
k2	3.29
γ_1	0.43
γ_2	0.34

Nas figuras que se seguem apresentam-se as respostas dos modelos à degraus aplicados ao sistema. Observa-se que o modelo linear apresenta bons resultados quando o estado do sistema é próximo ao ponto de operação. Já para os modelos fuzzy, quanto mais pontos de linearização utilizados, melhor o resultado, embora mais complexo o custo computacional.

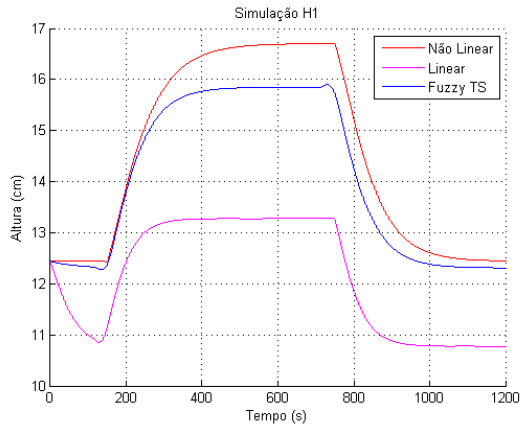


Figure 7.4: Linearização Convencional: $\bar{h}_1 = 5, \bar{h}_2 = 5$. Linearizações Fuzzy: $\bar{h}_1 = [5 \ 10]$ $\bar{h}_2 = [5 \ 10]$

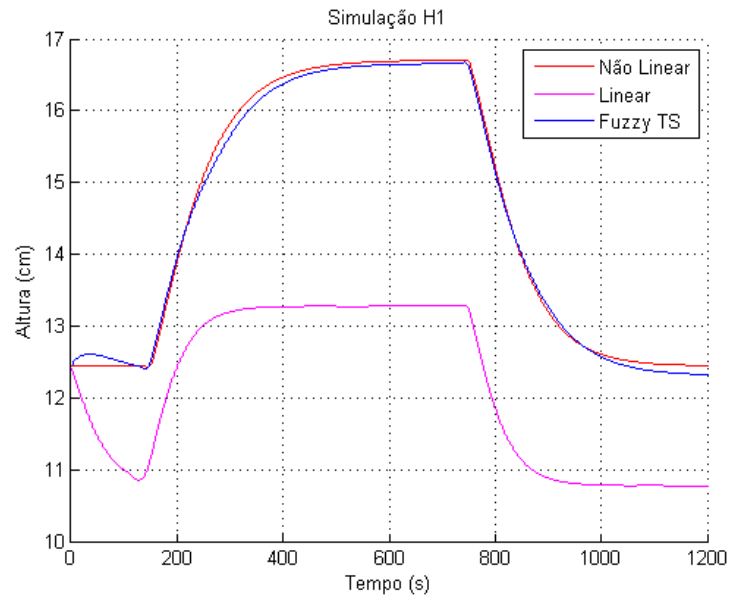


Figure 7.5: Linearização Convencional: $\bar{h}_1 = 5, \bar{h}_2 = 5$. Linearizações Fuzzy: $\bar{h}_1 = [5 \ 10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [5 \ 10 \ 15]$

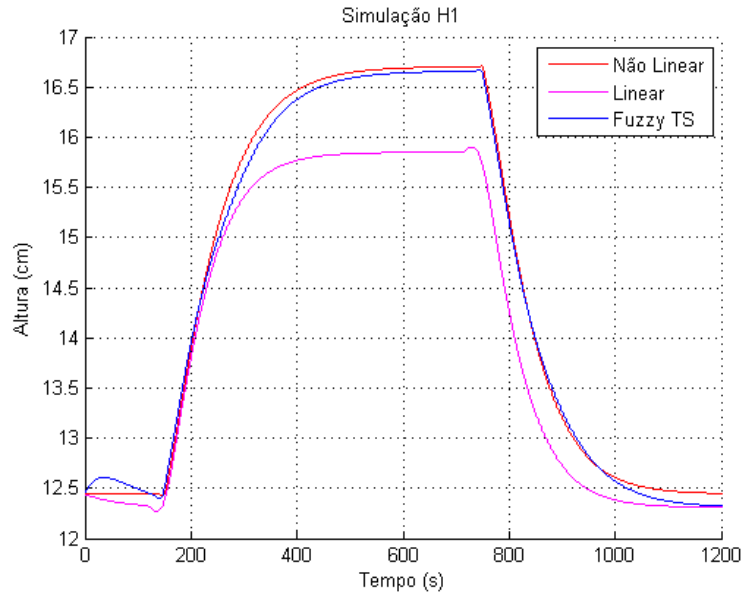


Figure 7.6: Linearização Convencional: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. Linearizações Fuzzy: $\bar{h}_1 = [5 \ 10 \ 15]$ $\bar{h}_2 = [5 \ 10 \ 15]$

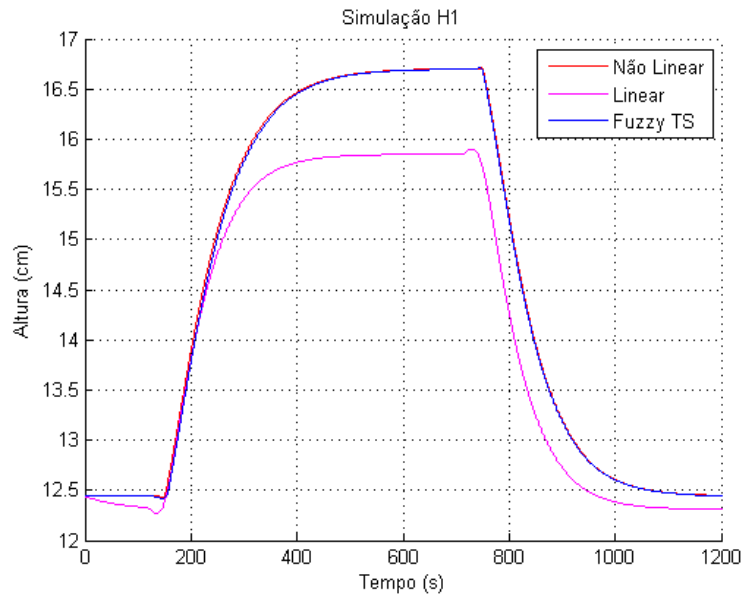


Figure 7.7: Linearização Convencional: $\bar{h}_1 = 10, \bar{h}_2 = 10$. Linearizações Fuzzy: uma linearização a cada 1 centímetro para ambos os níveis.

Como explicado na seção anterior, o conjunto de regras é realizado a partir da combinação simples dos conjuntos de pontos das variáveis aferidas. Assim, na Figura 7.7 haverão 900 regras, uma combinação de 30 pontos para h_1 e 30 pontos para h_2 .

7.2 IMPLEMENTAÇÃO

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a comparação entre a modelagem fuzzy e a modelagem linearizada convencional. O objetivo final foi demonstrar a eficiência e aplicabilidade da abordagem proposta por Takagi-Sugeno em sistemas multivariáveis com diferentes níveis de acoplamento. A partir dos resultados obtidos, nota-se que esta abordagem proporciona uma aproximação tão boa quando se esteja disposto a dispendar em termos de custos computacionais. Possíveis desenvolvimentos futuros incluem a implementação de controladores desenvolvidos e a inclusão de incertezas nas especificações dos modelos.

- [1] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets and system,” 1965.
- [2] T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116 – 132, 1985.
- [3] K. H. Johansson, A. Hørch, O. Wijk, and A. Hansson, “Teaching multivariable control using the quadruple-tank process,” 1999.
- [4] *RSLinx Classic Getting Results Guide*, Allan-Bradley and Rockwell Automation, 2014.
- [5] *User Manual - EtherNet/IP Network Configuration*, Allan-Bradley and Rockwell Automation, 2014.