

# Campus de São Carlos

# CONTROLE DE NÍVEL EM UM PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TIRAS-ROLOS DUPLOS

Autor: Josemar dos Santos

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vilma Alves de Oliveira

# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Serviço de Pós-Gradução EESC/USP

# **EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço: 26,09,01

Ass .:.... Qui Cherme

# Controle De Nível em um processo de Lingotamento Contínuo De Tiras – Rolos Duplos

# JOSEMAR DOS SANTOS





Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADORA: Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira

São Carlos 2001



at 1207308

#### Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

 Santos, Josemar dos Controle de nível em um processo de lingotamento contínuo de tiras : rolos duplos / Josemar dos Santos. -- São Carlos, 2001.
 Dissertação(Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001. Área: Engenharia Elétrica. Orientadora: Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira.
 1. Lingotamento contínuo. 2. Modelagem. 3. Controle não-linear. 4. Lógica Fuzzy. I. Título.

#### FOLHA DE JULGAMENTO

## Candidato: Engenheiro JOSEMAR DOS SANTOS

Dissertação defendida e julgada em 22-06-2001 perante a Comissão Julgadora:

PULP IN

APROVA DO

APPOULOO

Profa. Assoc. VILMA ALVES DE OLIVEIRA (Orientadora) (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA (UNESP – Campus de Ilha Solteira)

Jak Toma

APROVADO

Prof. Dr. **ROBERTO MOURA SALES** (Escola Politécnica/USP)

Valippin

Profa. Associada VILMA ALVES DE OLIVEIRA Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA Presidente da Comisção de Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus pais,

1

 $\mathcal{R}_{ij}$ 

•

Lauro e Conceição.

# Sumário

LISTA DE FIGURASiii
LISTA DE TABELASv
RESUMOvi
ABSTRACTvii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO1
1.1. O Processo de Lingotamento Contínuo de Tiras Baseado em Rolos Duplos
(LCT-RD)2
1.2. Revisão Bibliográfica4
1.3. Justificativa do Trabalho7
1.4. Organização do Trabalho9
CAPÍTULO 2 – SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E SUPERVISÃO10
2.1. Sistemas Supervisórios
2.2. Automação do Processo de LCT-RD do IPT13
CAPÍTULO 3 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL DE AÇO FUNDIDO. 15
3.1. Configuração de Controle16
3.2. Sistemas de Medida e Atuação17

ς,

3.2.1. Sensores	17
3.3. Atuador	22
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO PROCESSO	24
4.1. Modelagem do Nível e Escoamento	25
4.2. Modelagem do Sistema Hidráulico	27
4.3. Modelagem do Fluxo e Válvula Tampão	29
CAPÍTULO 5 – TÉCNICAS DE CONTROLE	31
5.1. Controlador PID	31
5.2. Linearização por Realimentação	32
5.3. Lógica Fuzzy	33
5.3.1. Modelo <i>Fuzzy</i> Mandani	33
5.3.2. Modelo Fuzzy Takagi-Sugeno	39
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	51
6.1. Lei de Controle PID	51
6.2. Lei de Controle Não-Linear	53
6.3. Lei de Controle <i>Fuzzy</i>	56
6.4. Resultados	71
CAPÍTULO 7 – Conclusões e Propostas Futuras	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
Apêndices	82

ii

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Esquemático da planta piloto de LCT-RD do IPT 4
Figura 1.2 – Vista superior do tanque submerso posicionado entre os rolos
Figura 2.1- Configuração de um sistema de controle para lingotamento contínuo de tiras 11
Figura 2.2- Configuração de um sistema de controle de nível para lingotamento contínuo
de tiras 11
Figura 2.3– Sistema supervisório 12
Figura 3.1 – Diagrama de controle de nível no tanque submerso 16
Figura 3.2 – Esquemático de um sensor indutivo 19
Figura 3.3 – Esquemático de um sensor a laser de onda contínua 20
Figura 3.4 – Esquema para instalação de células de carga 22
Figura 4.1 – Geometria do tanque submerso
Figura 4.2 – Estrutura típica do sistema hidráulico
Figura 5.1 – Configuração do controlador <i>fuzzy</i>
Figura 5.2 – Função de pertinência triangular
Figura 5.3 – Função de pertinência trapezoidal
Figura 6.1 – Diagrama de blocos para simulação com controlador PID52
Figura 6.2 – Diagrama de blocos para simulação com a técnica de linearização
por realimentação55
Figura 6.3 – Esquema do sistema <i>fuzzy</i>
Figura 6.4 – Função de pertinência para a entrada erro57
Figura 6.5 – Função de pertinência para entrada variação do erro

1.2

Figura 6.6 – Função de pertinência para a saída
Figura 6.7 – Diagrama de blocos para simulação com controlador fuzzy modelo Mandani59
Figura 6.8 – Componentes do sistema60
Figura 6.9 – Funções de pertinência para as regras 1, 2 e 3 da planta69
Figura 6.10 – Nível de aço dentro do tanque submerso para cada controlador proposto71
Figura 6.11 – Abertura da válvula tampão para cada controlador proposto72
Figura 6.12 – Sinal de controle para cada controlador proposto72
Figura 6.13 – Nível de aço dentro do tanque submerso para cada controlador proposto
com novos parâmetros
Figura 6.14 – Abertura da válvula tampão para cada controlador proposto
com novos parâmetros74
Figura 6.15 – Sinal de controle para cada controlador proposto com novos parâmetros74

.,

# Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Dados da atualidade mundial em LCT-RD	3
Tabela 3.1 – Principais equipamentos de medição de nível	18
Tabela 6.1 – Tabela de regras	57

# Resumo

O presente trabalho tem como objetivo explorar o uso de técnicas de controle avançado na indústria metalúrgica. O nível de aço é uma das variáveis mais críticas para a produção de chapas ou tiras de alta qualidade no processo de lingotamento contínuo de tiras baseado em rolos duplos. Para melhorar a qualidade da espessura das tiras utiliza-se um tanque intermediário submerso na piscina formada entre os rolos duplos. São propostas três técnicas de controle do nível de aço do tanque intermediário: controle PID, linearização por realimentação e controle *fuzzy* via modelos Mamdani e Takagi-Sugeno. O modelo Mamdani é desenvolvido com base no conhecimento experimental do processo. O modelo Takagi-Sugeno utiliza uma abordagem mais sistemática para a resolução do problema, utilizando modelos locais (linearizados) da planta não-linear que descreve o nível e escoamento do aço no tanque intermediário. Os componentes do sistema de controle empregados são discutidos e especificados. São apresentados resultados de simulação utilizando os parâmetros reais de uma planta de lingotamento contínuo instalada no IPT São Paulo. As simulações realizadas mostram que as técnicas de controle sugeridas atendem as restrições da planta e são viáveis

Palavras-Chave: Lingotamento contínuo; rolos duplos; controle ... , modelagem; lógica fuzzy.

# Abstract

This work explores the use of advanced control techniques in the metallurgical industry. The molten steel level is one of the most critical to the production of high quality steel strips in strip casting process. The strip thickness uniformity can be improved using an intermediary tundish submerse into the pool formed between the two rotating rolls. Three control techniques are considered to control the intermediary tundish molten steel level: PID, feedback linearization and fuzzy logic via Mamdani and Takagi-Sugeno models. The Mamdani model is developed with base in the experimental knowledge of the process. The Takagi-Sugeno model uses a more systematic approach for the solution of the control problem using local models for the non-linear plant that describes the level and flow of the steel in the intermediary tundish. The components of the level control system are discussed and specified. Simulation results are presented considering the real system parameters of a strip casting plant installed at IPT São Paulo. The simulation results obtained show that the control techniques suggested satisfies the constraints on the plant and can be considered for implement.

Keywords: Casting process; twin rolls; non-linear control; modelling; fuzzy logic.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O aço ocupa uma posição de destaque na maioria das indústrias metalúrgicas. A partir dele são fabricados os mais diversos produtos utilizados no dia-a-dia e sua manufatura é de extrema importância para o mercado consumidor. A produção de aço, inclusive no Brasil, é alta demonstrando o quanto é importante a utilização do aço. A produção de aço bruto na América Latina é de 50 milhões de toneladas por ano (Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS, 2000).

Durante praticamente todo o século XX e principalmente nas últimas três décadas, o desenvolvimento de tecnologias empregadas na manufatura do aço tem recebido um grande destaque na indústria siderúrgica mundial. A busca pela qualidade, baixo custo e grande produtividade fizeram com que empresas e institutos de pesquisa trabalhassem em conjunto em busca de novas tecnologias que suprissem as necessidades do mercado. Entre essas novas tecnologias se destaca o lingotamento contínuo de tiras de aço (LCT), utilizando o conceito de rolos duplos (t*win roll*) (COOK *et al.*, 1995).

# 1.1 – O Processo de Lingotamento Contínuo de Tiras Baseado em Rolos Duplos (LCT-RD)

Através do processo de lingotamento contínuo convencional, até meados da década de 60, o aço fundido era depositado em moldes, chamados de lingoteiras, onde sua forma e seu volume eram pré-definidos. A tecnologia de LCT-RD foi introduzida para melhorar a produção de aço em formatos mais específicos. A partir do LCT-RD pode-se obter chapas, tiras, etc. (IRVING, 1993).

As vantagens do LCT-RD sobre o lingotamento contínuo convencional são listadas a seguir:

- Redução no consumo de energia;
- Melhoria no rendimento;
- Redução no esforço de trabalho;
- Diminuição na emissão de poluentes ao meio ambiente;
- Melhoria na qualidade metalúrgica do produto;
- Redução de prazos de entrega, etc..

Como desvantagens podemos destacar o acoplamento de variáveis, a dificuldade de obtenção de tiras uniformes, a exigência de sincronização do processo, etc..

O LCT teve seu conceito inicial de rolos duplos sugerido por Henry Bessemer (LEE *et al.*, 1996) ainda no século XIX. Esta idéia não foi concretizada na época, uma vez que as tecnologias disponíveis não eram suficientes para a sua implementação. Entretanto, a possibilidade de utilizar a tecnologia LCT-RD, tem recentemente sido revista, e muitos países já estão envolvidos no desenvolvimento desta técnica sendo que algumas das plantas existentes já estão em funcionamento. Existem hoje, cerca de quinze empresas e institutos de pesquisa trabalhando nesta tecnologia como pode ser visto pela Tabela 1.1 (IPT-SP, 2000).

Empresa	País	Fabricante	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ø (mm)	Panela (kg)	Estágio
BHP AST Nippon Steel Usinor	Austrália Itália Japão França	IHI VAI Mitsubishi Clecim	< 2 2-5 2-5 2-4	1900 860 1330 865	500 1500 1200 1500	60000 65000 60000 92000	Em fase de testes em escala comercial
Posco Pacific Sumitomo Mefos	Coréia Japão Japão Suécia	Posec Hitachi Sumitomo MDH	2-6 2-5 1-3 5-10	1300 1050 720 900	1250 1200 1400	10000 10000 15000 10000	Em fase de testes
Irsid British	França Inglaterra	Clecim British	1-4 2-5	200 400	660 750	6000 3000	Usina piloto
Clausthal Aachen MPI IMI	Alemanha Alemanha Alemanha Canadá	Clausthal Aachen MPI IMI	5-10 1-2 1-5 2-5	300 150 120 200	580 330 600	1000 180 70 1000	
IPT	Brasil	IFW	1-5	100	500	500	Desenvolvimento de processos

Tabela 1.1 – Dados da atualidade mundial em LCT-RD.

No Brasil, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP) possui uma planta protótipo de lingotamento contínuo de tiras finas de aço baseada em rolos duplos, com capacidade para produção de tiras de até 1 mm. O diagrama esquemático da planta protótipo localizada no IPT-SP é mostrado na Figura 1.1. O aço é fundido até 1700°C em um forno de indução. Após a fundição, o aço é depositado em uma calha por onde é escorrido até um acumulador e deste para um reservatório maior, um distribuidor. O aço é vazado por intermédio de um bico controlado por uma válvula tampão e é depositado entre dois rolos, refrigerados por água, formando o que se chama de "piscina". Os rolos giram em direções opostas fazendo com que o aço fundido escorra entre eles com uma espessura desejada. Com o movimento dos rolos e a refrigeração, formam-se duas camadas de aço fundido que encontram um ponto de congelamento e produzem a tira de aço. Este congelamento ocorre da parte inferior dos rolos para a superior. A tira é conduzida até uma esteira onde é novamente resfriada por intermédio de jatos d'água. A tira é tencionada por intermédio de polias para que seja bobinada de forma adequada.



Figura 1.1 - Esquemático da planta piloto de LCT-RD do IPT.

## 1.2 - Revisão Bibliográfica

Nesta seção são relacionadas aplicações de técnicas de controle avançadas para o controle de nível visando melhorar a qualidade das chapas ou tiras produzidas em processos de lingotamento contínuo.

Kong *et al.* (1992) apresentam técnicas de identificação para controle de nível. Utilizando um sistema de medição por computador e aplicativos como PC-TACT e MATLAB, obtiveram modelos paramétricos lineares para a malha de controle de nível para vários pontos de operação. Em um primeiro estágio o modelo do sistema hidráulico é identificado, mostrando-se não-linear mas estável. No segundo estágio, os modelos lineares dos diversos sistemas que compõem o processo são estabelecidos para várias condições de operação.

O trabalho de De Keyzer (1995) dá prosseguimento ao trabalho de Kong *et al.*(1992) e compara os seguintes métodos de controle: controle PI; controle preditivo baseado em modelo; e uma estratégia de multi-malhas de controle utilizando dois controladores, um P e um PID trabalhando em uma configuração mestre-escravo, com auto-sintonia. As duas últimas abordagens apresentam excelentes resultados comparados com o controlador PI original. A vantagem da abordagem mestre-escravo PID é a sua simplicidade e a do controle preditivo baseado em modelo é a sua simplicidade de re-sintonia para atender robustez e desempenho.

O trabalho de Graebe *et al.* (1995) apresenta três diferentes estratégias de controle consistindo de um controlador PID, um linear e um não-linear com malhas internas de controle. Este trabalho considera aspectos de identificação dos sistemas, implementação, segurança, prototipagem, ajustes em tempo real e a viabilidade econômica do processo. O trabalho sugere um completo recondicionamento de sistemas de controle existentes e a instalação de uma unidade de controle avançado que permita realizar qualquer uma das três alternativas de controle.

Asano *et al.* (1996) apresentam um novo método de controle para estabilizar o nível de aço fundido com rejeição a distúrbios na vazão de entrada. Um observador é empregado para estimar o distúrbio no fluxo de entrada o qual altera o equilíbrio do nível de aço no molde. O esquema de controle é baseado na estimação e cancelamento do distúrbio no fluxo de entrada utilizando um observador para o distúrbio. O observador é utilizado em associação com um controlador PI. Este método de controle tem sido aplicado com sucesso em sistemas de controle de nível em vários processos de lingotamento contínuo, mostrando-se eficiente em situações de distúrbios no fluxo de entrada.

No trabalho de Kitada *et al.* (1998) um controlador  $H_{\infty}$  é utilizado para o controle de nível de aço fundido. O projeto do controlador é considerado para propiciar tanto a rejeição de perturbação quanto a estabilização robusta. O projeto adotado tem funções de ponderação da entrada para as perturbações afim de ajustar as características em malha fechada em médias freqüências. Os exemplos numéricos apresentados mostram que os resultados do controlador  $H_{\infty}$  considerado teve melhor desempenho do que o controlador convencional PID, sem a função de ponderação da entrada. Os resultados dos testes experimentais

realizados mostram que a flutuação do nível com o controlador proposto  $H_{\infty}$  é menor, comparada com o controlador PID.

Dussud *et al.* (1998) propõem o uso de um controlador *fuzzy* utilizando o conhecimento especialista do operador. Considerando condições normais de operação, o controlador PID apresenta bom desempenho, mas em condições adversas, particularmente quando ocorre entupimento da saída de aço, é exigido intervenção manual. No entanto, quando o fluxo de metal dentro de um molde aumenta de repente, o controlador PID nem sempre é capaz de prevenir grandes variações do nível, podendo até causar transbordamento. O trabalho discute o projeto do controlador *fuzzy* e sua integração com um PID em uma arquitetura de controle global. Através de um chaveamento, o processo é controlado pelo controlador *fuzzy*, dependendo da ocorrência ou não do entupimento.

Em Watanabe *et al.* (1999) é desenvolvido um sistema de controle para o nível de aço fundido usando técnicas de inteligência artificial e controle linear. No sistema de controle desenvolvido, uma rede neural reconhece padrões temporais do fluxo de entrada e trabalha em cooperação com um controlador PI na malha de controle principal. A rede neural pode descrever as relações não-lineares arbitrárias como um aproximador geral. São discutidos os problemas envolvidos na construção de um modelo de rede neural válido que tenha boa generalização e propriedades robustas, otimizando o número de neurônios pelo critério de informação. Diferentes estruturas de controle são discutidas e é apresentada uma nova estratégia de controle para o nível de aço no molde para reduzir a flutuação, utilizando uma válvula tampão para regular a vazão do fluxo de entrada e rolos com velocidade controlada para atuar na chapa de aço já solidificada na saída do molde. A idéia básica é usar a velocidade dos rolos quando as condições do processo estão estabilizadas, e a válvula tampão é usada para prevenir variações de níveis causadas por mudanças súbitas das características de processo. Desta forma, um sistema inteligente seleciona a cada momento

qual tipo de controlador deve atuar na planta conforme as condições atuais de operação. O sistema de controle foi testado na prática mostrando que a flutuação do nível pode ser reduzida comparada com o sistema de controle convencional.

Lee *et al.* (1996) utilizam técnicas de lógica *fuzzy* adaptativa para o controle de nível em um processo de lingotamento contínuo utilizando rolos duplos, considerando as não linearidades associadas a esta unidade de controle. Uma compensação do termo não-linear é usada no sistema para reduzir erros de modelagem devido a excentricidade dos rolos. Combinando esta compensação com a técnica de lógica *fuzzy*, o controlador proposto é robusto e fornece erro assintoticamente nulo.

#### 1.3 – Justificativa do Trabalho

O nível de aço dentro do tanque submerso em um processo de lingotamento contínuo durante a fundição é influenciado por vários fatores associados ao projeto da planta e ao estado em que o processo se encontra. Conforme o aço é depositado nos rolos ocorre uma turbulência na piscina ali formada. Após estudos feitos sobre o fluxo do aço formado nesta piscina, foi instalado na planta LCT-RD do IPT, um tanque submerso entre os rolos para reduzir a flutuação na superfície da piscina (Figura 1.2).

A planta LCT-RD do IPT tem várias unidades de controle. A unidade de controle do sistema distribuidor-rolos pode ser dividida em quatro: unidade controle do nível de aço fundido na piscina formada entre os rolos; unidade de controle do nível de aço no tanque submerso; unidade de controle da força de separação dos rolos e a unidade de controle da velocidade dos rolos. Dentre estes, o controle do nível da piscina é de fundamental importância para a obtenção de uma tira com alto grau de qualidade, além do controle da força de separação dos rolos.



Figura 1.2 - Vista superior do tanque submerso posicionado entre os rolos.

Com a formação da piscina duas cascas sólidas de aço formadas a partir dos rolos encontram um ponto ótimo de solidificação para a obtenção da tira de aço. Assim, para que a tira de aço a ser produzida seja de alta qualidade, o nível de aço presente na piscina não deve sofrer flutuação. A movimentação do ponto de solidificação das duas cascas sólidas de aço pode comprometer muito a qualidade da tira produzida.

O controle do nível deste tanque submerso está diretamente ligado ao controle do nível da piscina formada entre os rolos. Desta forma, é necessário que o escoamento de aço do distribuidor para os rolos seja feito de maneira ordenada. Com a utilização do tanque submerso isto pode ser obtido controlando seu nível e, consequentemente, a vazão de aço fundido para os rolos.

# 1.4 – Organização do Trabalho

Inicialmente no Capítulo 2 será apresentado um breve resumo da história da automação e o tipo de sistema de automação empregado na planta piloto do IPT. O Capítulo 3 apresenta uma discussão sobre os sistemas de medida e atuação a serem utilizados no controle de nível, suas deficiências e vantagens. No Capítulo 4 será descrita a modelagem do processo. No Capítulo 5 serão descritas técnicas de controle adequadas para o controle do nível do tanque submerso. O Capítulo 6 apresenta os resultados de simulações para cada uma das técnicas utilizadas. Finalmente, o Capítulo 7 traz as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

#### SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E SUPERVISÃO

O crescimento da competição na indústria de aço tem forçado a intensificação de esforços para reduzir os custos da produção satisfazendo demandas crescentes e, ao mesmo tempo, aumentar a qualidade do produto. Muitas das empresas produtoras de aço no Brasil, passaram a integrar grupos industriais e/ou financeiros, cujos interesses na siderurgia têm como objetivo alcançar economia de escala e competitividade (INTECH, 1998). Para isto, um completo e eficiente sistema de automação e controle deve ser inserido à estrutura do processo. Com a finalidade de aumentar sua produtividade, melhorar sua competitividade e reduzir custo, as empresas produtoras de aço, estão utilizando a melhor tecnologia disponível em automação e instrumentação.

Em um sistema de lingotamento contínuo o planejamento da produção, localização do material, administração do processo, monitoramento do processo, aquisição e exibição dos dados do processo são altamente importantes para a sua eficiência. Em uma planta de rolos duplos, o sistema de controle é essencial para o seu bom funcionamento, garantindo em tempo real, o reajuste automático das variáveis que influem na dinâmica do processo (SPINELLI, 2000). A Figura 2.1 ilustra as diversas unidades de controle de um sistema de controle para o processo de lingotamento contínuo.



Figura 2.1 - Configuração de um sistema de controle para lingotamento contínuo de tiras.

Neste trabalho tratamos do controle do nível de aço dentro de um tanque submerso a partir da vazão de entrada de aço fundido. A Figura 2.2 ilustra a configuração do sistema de controle para o nível do tanque submerso.



Figura 2.2 - Configuração de um sistema de controle de nível para lingotamento contínuo de tiras.

## 2.1 – Sistemas Supervisórios

O controle através de sistemas supervisórios é muito utilizado quando se quer otimizar a operação de um processo contínuo, afim de determinar os pontos ótimos de controle para minimizar o consumo de energia, maximizar a produção ou o rendimento de determinados produtos. O sistema de controle supervisório pode ser de malha aberta ou fechada. Em ambos os casos o computador calcula pontos de operação ótimos utilizando modelos matemáticos e a teoria de otimização, informando o valor ótimo ao operador ou manipulando diretamente os valores de referência dos controladores (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Sistema supervisório.

Os sistemas supervisórios para automação industrial são produtos que incorporam funções de alarmes de condições e estado de variáveis de processo, emissão de relatórios, aquisição de dados, controle contínuo, controle estatístico, comando de atuadores, monitoração de dados do processo, etc.. Através de um sistema supervisório pode-se fazer aquisições de dados bidirecionalmente, ou seja, pode-se tanto obter informações do processo quanto às variáveis quanto para enviar sinais de controle e ajuste para o mesmo. Um bom sistema supervisório apresenta em tempo real os dados do processo e produção ao operador e também a outros sistemas que estejam sendo utilizados em conjunto. Uma característica predominante em sistemas de supervisão é a utilização de uma interface homem/máquina mais amigável ao usuário (operador), sendo assim de fácil compreensão e utilização. Cada fabricante fornece um módulo de configuração do sistema específico para seu sistema, deixando-o assim, às vezes, incompatível com os demais sistemas supervisórios do mercado. Em função disto, os fabricantes de sistemas e equipamentos adotaram uma padronização de interfaces de comunicação, interface de operação, módulos aplicativos e aquisição de dados, feita através da IEC (*International Electrotechnical Commission*) (CARVALHO *et al.*, 1999).

## 2.2 – Automação do Processo de LCT-RD do IPT

Em 1996, quando o processo de LCT-RD foi instalado no IPT, ele era composto de equipamentos de automação ultrapassados vindos da Alemanha, onde o processo foi adquirido. Afim de reestruturar a automação do processo e colocá-lo em funcionamento, foi implantado um sistema de automação onde o controle das velocidades dos rolos, esteira e bobinadeira, bem como a força e o espaçamento entre os rolos é realizado por CLP's (controlador lógico programável) e todo o sistema é comandado e monitorado por um aplicativo de supervisão (supervisório). Um conjunto de sensores foi instalado na máquina afim de manter o desempenho do processo, segurança operacional e facilidades de controle. Entre eles, se destacam os sensores de posição LVDT e das células de cargas para medir a quantidade de aço dentro do distribuidor.

Todo o controle do processo é feito através de um controlador programável (CLP) com módulos de entrada e saída digitais e analógicas, especificamente dimensionados para a aplicação. Basicamente, um controlador programável apresenta as seguintes características:

- Hardware e/ou dispositivo de controle de fácil e rápida programação ou reprogramação, com a mínima interrupção da produção;
- Capacidade de operação em ambiente industrial ;
- Sinalizadores de estado e módulos tipo *plug-in* de fácil manutenção e substituição;

- Hardware ocupando espaço reduzido e apresentando baixo consumo de energia;
- Possibilidade de monitoração do estado e operação do processo, através da comunicação com computadores;
- Compatibilidade com diferentes tipos de sinais de entrada e saída;
- Capacidade de alimentar, de forma contínua ou chaveada, cargas que consomem correntes de até 2 A;
- Hardware de controle que permite a expansão dos diversos tipos de módulos, de acordo com a necessidade;
- Custo de compra e instalação competitiva em relação aos sistemas de controle convencionais;
- Possibilidade de expansão da capacidade de memória;
- Conexão com outros CLP's através de rede de comunicação.

A programação de CLP's é feita utilizando a programação LD (*Ladder Diagram*) que é uma representação gráfica de equações Booleanas combinando contatos (entradas) e bobinas (saídas), se assemelhando muito com um diagrama de relés. Apesar de sua simplicidade, a programação LD é muito utilizada. Dependendo do CLP utilizado (marca e modelo), é possível implementar várias técnicas de controle, como controladores autoajustáveis, até mesmo controladores baseados em lógica *fuzzy* (conhecidos como CLP's híbridos).

O sistema de segurança é outro fator importante na automação do processo. No aplicativo supervisório há vários botões de emergência, possibilitando ao operador uma parada total do sistema em caso de problemas. Ainda é possível interromper o processo através de botoeiras de emergência instaladas em lugares estratégicos da planta.

No próximo capítulo será descrito uma estrutura básica para configuração do sistema de controle e a descrição dos sistemas usados no processo.

# CAPÍTULO 3

# Configuração do Sistema de Controle de Nível de Aço Fundido

Os sistemas utilizados na medição e controle de nível estão diretamente ligados ao ambiente onde se encontra o processo. Temperatura, força, pressão, tempo entre outros são variáveis que devem ser minuciosamente investigadas a fim de se escolher a melhor estrutura e equipamentos para o controle.

O ambiente em que se encontra uma planta LCT-RD é altamente agressivo. As condições de temperatura de funcionamento da planta de LCT-RD variam muito durante o ensaio, pois existe um pré-aquecimento dos equipamentos que estarão em contato direto com o aço fundido. Existe também um grande número de máquinas, motores, fornos de indução e outros equipamentos, localizados no mesmo ambiente da planta de LCT-RD. Estes produzem ruídos, partículas de poeira, oscilações na rede de energia elétrica e vapores que podem influenciar de alguma forma o processo. Partículas de poeira, por exemplo, podem afetar os equipamentos eletrônicos como micro computadores.

No controle de nível do aço fundido no tanque submerso existem dois fatores importantes quanto ao ambiente de trabalho:

- A temperatura próxima ao tanque é elevada (cerca de 1000°C);
- O espaço físico para implementação dos sistemas é reduzido.

Assim, os sistemas de medição, controle e atuação se restrigem consideravelmente.

Neste capítulo apresentamos uma estrutura básica para a configuração do sistema de controle e descrevemos um pouco mais detalhadamente três sistemas normalmente usados para a medição de nível e um sistema para atuação.

# 3.1 – Configuração de Controle

Basicamente, a configuração para o controle de nível deste tipo de sistema (Figura 3.1) é composta dos seguintes elementos:

- Elemento de medição de nível (sensor);
- Elemento de controle de processos (CLP, microcontrolador, etc.);
- Elemento de controle eletro-hidráulico (cilindro);
- Elemento de controle mecânico (válvula tampão).



Figura 3.1 - Diagrama de controle de nível no tanque submerso.

#### 3.2 – Sistemas de Medida e Atuação

Um pré-requisito para o controle automático do nível do aço fundido é a utilização de componentes de baixa manutenção. Os sistemas de medição e atuação devem fornecer ao processo as informações necessárias para o controle. A grande quantidade de sistemas de medição e de atuação faz com que seja necessário um estudo mais detalhado do processo e dos tipos de dispositivos disponíveis. A seguir, apresentamos os tipos de sensores e atuadores mais adequados para o controle do nível de aço fundido, destacando suas funções específicas, suas restrições e suas vantagens.

## 3.2.1 – Sensores

Um processo de medição é contituído dos recursos para a obtenção e quantificação dos dados de medida. Estes incluem o método de medida, os equipamentos requeridos, o material a ser testado e a qualidade estatística dos dados, inclusive análise de erros e ruídos (WELSBY *et al.*, 1997).

Dentre os tipos de sensores de nível utilizados em siderurgia podemos destacar: eletro-óptico, indutivo (*eddy current*), laser, infravermelho e células de carga. As vantagens e desvantagens de cada sistema são apresentados na Tabela 3.1 (KRÜGER *et al.*, 1985). Os sistemas de medição mais usados hoje em dia são os sistemas a laser, indutivo e célula de carga.

Princípio	Sistema	Desvantagens	Vantagens
Eletro-óptico	LADAR (Laser radar)	<ul> <li>Sensível a distúrbios ópticos;</li> <li>Dificuldade na instalação caso o espaço físico seja reduzido</li> </ul>	<ul> <li>Condicionamento da medida inteligente;</li> <li>Alta precisão com boa resposta dinâmica;</li> <li>Não necessita de nova montagem caso o tanque seja mudado.</li> </ul>
Indutivo	Sistema de Bobinas E Eddy, Eletromagnético	<ul> <li>Instalação difícil caso o tanque seja pequeno;</li> <li>Sensível a distúrbios magnéticos;</li> <li>Vários componentes são destruídos por causa de distúrbios.</li> </ul>	<ul> <li>Medida não é afetada por poeira</li> <li>Não necessita de nova montagem caso o tanque seja mudado.</li> </ul>
Óptico	Câmera	<ul> <li>A superfície do material deve estar livre;</li> <li>Sensível a distúrbios ópticos;</li> <li>Baixa exatidão</li> </ul>	<ul> <li>Não necessita de nova montagem caso o tanque seja mudado.</li> </ul>
Deformação Mecânica	Célula de Carga	<ul> <li>Instalação sob tanques (difícil manutenção)</li> </ul>	<ul> <li>Robustez às condições ambientais</li> </ul>

Tabela 3.1 – Principais equipamentos de medição de nível.

# Sensor Indutivo (Eddy Current Sensor)

O sistema de medição indutivo já vem sendo utilizado há mais de 30 anos para medidas de deslocamento, vibração, densidade, alinhamento e várias outras aplicações. Em todas essas aplicações o sensor indutivo pode ser classificado como um sensor de deslocamento pois, em cada caso, o parâmetro que está sendo medido é a distância do objeto até o sensor (CHRISTMANN *et al.*, 1985).

Para um desempenho ótimo, um sensor de deslocamento deve maximizar a sensibilidade do sistema para detectar movimentos e minimizar a sensibilidade a todos os outros efeitos. Os sensores baseados em indução são bons para estas tarefas. Eles também

são robustos a vibrações, poeira, etc. e capazes de executar medidas rápidas e precisas em ambientes inóspitos. O princípio de funcionamento é descrito a seguir.

O sistema contém duas bobinas, uma ativa que é influenciada pela presença de um material condutivo e uma segunda bobina de balanceamento, a qual é utilizada para completar o circuito ponte e prover uma compensação de temperatura (Figura 3.2). A excitação do circuito ponte é feita em altas freqüências (cerca de 1 MHz) utilizando corrente alternada. As linhas de fluxo produzidas pela bobina ativa, atravessam a superfície do material alvo condutivo, produzindo correntes parasitas cuja densidade é maior na superfície do material. Essas correntes geram um segundo campo magnético, induzindo uma segunda tensão na bobina do sensor, que será proporcional à distância entre a superfície condutora e o sensor, resultando decréscimo ou acréscimo na reatância indutiva da bobina.



Figura 3.2 – Esquemático de um sensor indutivo.

#### Sensor a Laser

O laser é o nome genérico dado a uma grande variedade de dispositivos emissores de radiação eletromagnética. Hoje em dia, existe uma grande diversidade de tipos de laser. O avanço tecnológico na área eletro-óptica trouxe as mais diversas aplicações para o laser. Devido as condições da formação do feixe de radiação, o laser tem uma precisão temporal extremamente útil à medições ou controle de fenômenos químicos e físicos muito rápidos, caso do nível do aço na planta LCT-RD (CALDAS, 1986).

Dois tipos de tecnologia de sensores a laser são comuns hoje no mercado mundial: onda pulsada e onda contínua (freqüência modulada). A tecnologia pulsada é fundamentada no tempo em que o feixe de luz gasta para atingir o objetivo e retornar ao receptor. O tempo é medido pela quantidade de pulsos individuais do feixe para se movimentar do transmissor do instrumento ao objetivo e se dirigir para o receptor. A distância (S) é calculada facilmente usando então o tempo (t) e a velocidade da luz (c) da forma:

$$S = \frac{c.t}{2}.$$
(3.1)

Na tecnologia de onda contínua, um feixe de laser contínuo é dirigido ao objetivo. Este feixe tem a fase alterada ao se colidir com o objetivo e subseqüentemente é devolvida ao receptor da unidade de laser. As ondas que entram no receptor são comparadas para determinar o grau na mudança de fase. Baseado na freqüência, no comprimento de onda e na mudança de fase, a distância é calculada.



Figura 3.3 – Esquemático de um sensor de laser de onda contínua.

Em geral, o laser pulsado tem uma aceitação melhor na indústria por ser mais resistente ao pó ou vapor e fornecer a precisão desejada. A medição de nível através do laser vem sendo melhorada durante os últimos anos, principalmente com respeito à sua robustez a poeira, vapores etc. (VUJICIC *et al.*, 2000).

O ambiente em que normalmente se encontra uma planta de LCT-RD, como dito anteriormente, é hostil e de difícil controle ambiental. As partículas de poeira, vapores, fuligem das usinagens tornam a utilização do laser um pouco restritas. Devemos também considerar o custo da implementação de um sistema a laser. Quanto mais é aprimorada a técnicas maior é o custo desta tecnologia. O custo benefício deve ser portanto considerado na escolha do tipo de sistema de medição a ser empregado.

#### Célula de Carga

Podemos medir o nível de aço fundido através da quantidade de massa encontrada dentro do tanque submerso. Para esta medição podemos utilizar então uma célula de carga, que é um sistema com inúmeras vantagens e cada vez mais utilizado na indústria. E essas vantagens incluem baixo custo, faixa de medida larga, tolerância a ambientes inóspitos, capacidade de medida à distância e facilidade de instalação.

Uma célula de carga utiliza o princípio físico da aplicação de uma força a um elemento elástico para produzir uma deformação. O tipo de elemento elástico varia conforme a aplicação da célula de carga e para medir essa deformação podem ser usados inúmeros dispositivos de transdução.

A Figura 3.4 ilustra uma posição para a instalação de uma célula de carga para a medida da massa do tanque submerso, implicando assim na medida de nível do aço fundido.



Figura 3.4 – Esquema de instalação de células de carga.

## 3.3 – Atuador

O controle do nível pode ser realizado por intermédio de uma válvula tampão posicionada dentro do distribuidor, que interrompe a entrada de aço fundido no tanque submerso. A válvula tampão é normalmente fabricada com alumina e ponta de grafite, dois materiais de baixo custo e que suportam altas temperaturas.

Para o deslocamento da válvula é necessário a utilização de um atuador capaz de movimentar o bastão de alumina verticalmente com um grau de precisão elevado. Para este fim, sugere-se utilizar como atuador um cilindro hidráulico.

## Cilindro Hidráulico

O cilindro hidráulico é um atuador linear usado em aplicações que necessitam transformar força, potência ou energia hidráulica em força, potência ou energia mecânica. O cilindro hidráulico é utilizado em acionamento de prensas, guilhotinas, sopradoras, acionamento de fornos, guindastes em uma quantidade enorme de outros equipamentos e processos (PALMIERI, 1994).

No caso da planta LCT-RD a abertura ou fechamento da válvula tampão se dá com o movimento de uma alavanca fixada ao distribuidor proporcionando o escoamento ou não de aço fundido para o tanque submerso. Como no processo se faz necessária a utilização de um atuador robusto capaz de movimentar a válvula que tem um peso relativamente grande, o cilindro hidráulico é uma boa solução para o problema (CAPORALI, 1999). Para isto especificou-se um cilindro hidráulico, considerando um configuração a partir da definição das forças de atuação necessárias para a movimentação da válvula tampão (Apêndice 1).

No capítulo a seguir é feita a modelagem do processo, levando em conta as dinâmicas da planta LCT-RD do IPT.

# CAPÍTULO 4

#### MODELAGEM DO PROCESSO

O modelo de um processo pode ser entendido como um modelo físico (protótipos e plantas-piloto) ou matemático (representação do comportamento do sistema através de equações). Garcia (1997) em seu trabalho define modelo matemático como sendo a equação ou conjunto de equações que descrevem aproximadamente o sistema real. Desta forma, podem ocorrer erros de modelagem e aproximações inadequadas comprometendo o modelo encontrado. É necessária uma avaliação das características de cada processo para que não ocorra danos ou ônus ao mesmo, pois dependendo dos objetivos do estudo ou de diferentes faixas de operação, um sistema físico pode ser representado de diversa formas (DE NEGRI, 1988).

Neste trabalho utilizamos uma descrição matemática do sistema de controle de nível do tanque submerso. O uso da teoria da mecânica dos fluídos é necessária para obter as equações do processo de escoamento de fluxo.

A modelagem do processo será feita nas seguintes etapas:

- Modelagem do nível e escoamento no tanque submerso;
- Modelagem do sistema hidráulico;
- Modelagem válvula tampão e fluxo.
#### 4.1 – Modelagem do Nível e Escoamento

Para a modelagem do nível e escoamento utilizamos como base a equação de Bernoulli. Para uma correta utilização da equação de Bernoulli é necessário que o fluído seja incompressível. Para que o fluído seja incompressível é necessária uma grande variação de pressão para criar uma variação muito pequena no volume ocupado pelo fluído (MUNSON, 1997). No processo de LCT-RD o aço está em estado líquido caracterizando sua incompressibilidade (LEE, 1997).

A dinâmica do nível de aço fundido no tanque submerso é representada pela equação da continuidade descrita a seguir:

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} \tag{4.1}$$

onde  $Q_i$  e  $Q_0$  correspondem às vazões de entrada e saída do aço no tanque submerso e V é definido como o volume total de aço depositado tanque submerso. A Figura 4.1 ilustra a geometria do processo.



Figura 4.1 - Geometria do tanque submerso.

O volume V pode ser obtido calculando a área ocupada pelo aço no tanque submerso (S) pela espessura do tanque ( $\varepsilon$ ). Sendo a sua expressão dada por,

$$V = S\varepsilon \tag{4.2}$$

A área  $S_1$  é calculada como sendo a área de um trapézio dada pela equação,

$$S_1 = \frac{(B+b)h}{2}$$
(4.3)

$$A_T = \frac{(B+b)\varepsilon}{2} \tag{4.4}$$

onde B, b, h correspondem às bases e a altura do tanque submerso, respectivamente. Assim tem-se:

$$\dot{h} = \frac{1}{A_T} (Q_i - Q_0) \tag{4.5}$$

O fluxo de entrada  $Q_i$  é a variável de controle associada ao processo e  $Q_o$  é o fluxo de saída, definido como o produto da velocidade de descarga pela área do jato  $A_{f_i}$ 

$$Q_o = A_f . v \tag{4.6}$$

$$A_{f} = n_{f} . \pi r^{2}$$
 (4.7)

com  $n_f$  sendo o número de furos do tanque e v a velocidade de vazão que é obtida através da equação de Bernoulli (STREETER, 1980),

$$v = \sqrt{2gh} \tag{4.8}$$

onde g é aceleração da gravidade.

Assim, obtemos a equação para o fluxo de saída como,

$$Q_o = n_f \cdot \pi^{-2} \sqrt{2gh} \,. \tag{4.9}$$

Substituindo ainda a equação (4.9) na equação (4.5) podemos escrever a equação diferencial para o nível do tanque submerso como,

$$\dot{h} = \frac{1}{A_T} (Q_i - n_f . \pi^{2} \sqrt{2gh}).$$
(4.10)

Desta forma, é caracterizada a não-linearidade do processo de escoamento, uma vez que  $Q_o$  é dependente de  $\sqrt{h}$ .

# 4.2 – Modelagem do Sistema Hidráulico

Para a modelagem do sistema hidráulico adotamos uma configuração básica de um sistema de controle de posição com mecanismos de natureza eletro-hidráulica, uma vez que estes têm um baixo consumo de energia e grande precisão. A estrutura básica para um sistema de controle de posição se resume em um sinal de tensão elétrica como entrada e como saída o posicionamento de uma carga acoplada à haste do cilíndro hidráulico. No caso deste trabalho a carga seria o movimento da válvula tampão. Assim, utilizando uma abordagem simplificada deste sistema temos que a posição da carga denominada  $x_a$  é proporcional à tensão de entrada  $v_r$ , ou seja,

$$x_a = K_a v_r \tag{4.11}$$

onde  $K_a$  é uma constante de proporcionalidade do mecanismo eletro-hidráulico.

Em diversos sistemas reais de controle de posição pode ser identificada uma estrutura típica: servo-amplificador, sistema eletro-hidráulico e sensor de posição (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Estrutura típica do sistema hidráulico.

O servo-amplificador é o responsável pela emissão do sinal de erro ao sistema eletro-hidráulico e pode ser construído de diversas maneiras, a partir de um circuito eletrônico simples (amplificador-diferencial) até mesmo com microprocessadores (PC, PLC).

Considerando todas as características de construção e especificação de um sistema eletro-hidráulico é possível obtermos uma função de transferência de terceira ordem que caracteriza o sistema realimentado, a qual é dada por,

$$\frac{x_a}{v_r} = \frac{K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_t / 4\beta_e) s^3 + (M_a K_{co} + BV_t / 4\beta_e) s^2 + (BK_{co} + A_p^2) s + K_d K_a A_p K_{eqo}}.$$
(4.12)

onde  $M_a$ ,  $V_t$ ,  $\beta_e$ ,  $K_{co}$ , B,  $A_p$ ,  $K_d$ ,  $K_a \in K_{eqo}$  são descritos no Apêndice 1.

# 4.3 – Modelagem do Fluxo e Válvula Tampão

A modelagem do fluxo de entrada de aço fundido no tanque submerso é um ponto muito importante para sistema de controle. A variável de controle associada ao processo é o fluxo de entrada  $Q_i$ . Existe uma dificuldade em obter uma relação entre a posição (abertura) da válvula tampão ( $x_a$ ) e o escoamento do aço para o tanque submerso ( $Q_i$ ). A maneira mais simples, eficaz e comumente usada para esta avaliação, é uma identificação em tempo real dos sistemas envolvidos (DUSSUD, 1998). Este tipo de identificação é muito utilizada na indústria quando não se tem disponível uma função de transferência característica do processo. Existem vários modelos e métodos para esta identificação que aproximam a função de transferência do processo como sendo uma função de primeira ordem. Existem também métodos de identificação mais precisos e sofisticados, que consideram também nãolinearidades, como por exemplo o método NARMAX (KONG *et al.*, 1992).

A função de transferência da posição da válvula tampão pelo fluxo de entrada de aço fundido, pode ser definida como uma função de primeira ordem dada por,

$$\frac{Q_i}{x_a} = \frac{K}{Ts+1}.$$
(4.13)

Mas uma aproximação mais simples pode ser adotada (ASANO, et al, 1996),

$$Q_i = G_f x_a \tag{4.14}$$

onde  $G_f$  é denominada coeficiente de fluxo.

э.

4

No capítulo seguinte, serão apresentadas as técnicas de controle sugeridas para o controle de nível do tanque submerso.

# **CAPÍTULO 5**

# TÉCNICAS DE CONTROLE

Neste capítulo discutimos algumas técnicas de controle exploradas neste trabalho, afim de serem utilizadas no controle de nível do tanque submerso.

# 5.1 – Controlador PID

Com grande espaço na indústria o controlador PID, que é a soma das ações proporcional, integral e derivativa, tem recebido grande atenção por parte de pesquisadores nas últimas quatro décadas, sendo empregados, no mínimo na metade dos controladores automáticos instalados na indústria (OGATA, 1993).

A finalidade da ação proporcional é diminuir erros e ajustar margens de ganho e fase. A finalidade da ação integral é eliminar o erro em regime estacionário para uma entrada de referência do tipo degrau. A finalidade da ação derivativa é a de antecipar o erro atuante e produzir ação corretiva mais rápida.

Um dos principais problemas com os controladores PID na indústria é a sintonia adequada de seus parâmetros. Existem várias técnicas de sintonia e até mesmo auto-sintonia para controladores PID. Entre elas podemos destacar Zigler-Nichols, Lugar da Raízes e até mesmo, técnicas mais sofisticadas que utilizam desigualdades matriciais lineares (PIMENTA, 1999). Uma correta sintonia garante a eficiência dos controladores PID. O sucesso dos controladores PID na prática se deu principalmente porque quando aplicados em controle de processos não-lineares apresenta desempenho satisfatório.

Várias técnicas de controle não-lineares já são bem difundidas entre elas: controle por linearização por realimentação e lógica *fuzzy*. Estas serão tratadas nas próximas seções.

#### 5.2 – Linearização por realimentação

A técnica de linearização por realimentação é uma aproximação da dinâmica de um sistema não-linear. A idéia central desta aproximação é a transformação algébrica de uma dinâmica de um sistema não-linear em um sistema linear (completamente ou por partes), de forma que técnicas de controle lineares possam ser aplicadas. Isto difere completamente da linearização convencional. A linearização por realimentação é alcançada através de transformações de estado exatas e realimentação, em lugar de aproximações lineares da dinâmica do sistema (SLOTINE & LI, 1991).

Técnicas de linearização por realimentação podem ser consideradas como formas de transformar modelos originais de sistemas em modelos equivalentes de uma forma mais simples. Uma lei de controle do tipo  $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ , com  $\alpha : \mathfrak{N}^n \to \mathfrak{N}$ ,  $\beta : \mathfrak{N}^n \to \mathfrak{N}$ , e v um controle equivalente, pode ser encontrada para transformar a dinâmica do sistema não-linear em uma dinâmica linear mais simples, dado que os estados sejam disponíveis para medição e que certas condições sejam satisfeitas (SLOTINE & LI, 1991). Assim, os modelos lineares equivalentes podem ser usados no desenvolvimento de controladores não-lineares robustos ou adaptativos.

#### 5.3 – Lógica Fuzzy

As bases de sistemas de controle são associadas com a teoria de controle matemática e se desenvolveram intensivamente nas últimas décadas. Mas os princípios básicos de controle realimentado, na forma de experiência, intuição e habilidade prática são conhecidos e aplicados durante séculos.

Uma característica comum das técnicas de controle convencionais é que o sistema de controle é descrito analiticamente através de equações algébricas, equações a diferenças, equações diferenciais, etc.. Em geral, a síntese de sistemas de controle requer a descrição analítica do sistema a ser controlado por um modelo matemático.

O trabalho de Zadeh (1973) sobre conjuntos *fuzzy* introduziu a idéia de utilizar regras lógicas na solução de problemas de controle. A idéia central é aumentar a eficiência dos sistemas de controle convencionais utilizando o conhecimento adquirido da dinâmica e funcionamento do sistema a ser controlado. O que faz do controle *fuzzy* ter um diferencial em relação ao controle convencional é que este não requer necessariamente uma descrição analítica do sistema. Os principais modelos de sistemas *fuzzy* descritos na literatura são classificados em três categorias: modelo lógica *fuzzy* pura, modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno e modelo *fuzzy* com fuzzificação e defuzzificação, conhecido também como modelo *fuzzy* Mamdani.

#### 5.3.1 – Modelo Fuzzy Mamdani

Um projeto de controle *fuzzy* utilizando o modelo Mamdani é desenvolvido com base no conhecimento experimental do processo. Durante o primeiro estágio da elaboração da lei de controle, um conjunto de regras é gerado de acordo com uma formulação baseada na experiência do operador. Neste estágio pelo menos três situações podem ser distinguidas para a variável a ser controlada: "Abaixo", "Em torno" e "Acima" em relação a um valor de referência. Esta representação da variável pode ser facilmente transformada em uma caracterização lingüística do erro de regulação, ou seja, a diferença entre o valor medido e o valor desejado. Então, para definir o erro de regulação, pode ser considerada as seguintes situações do erro de regulação: "Abaixo", "Em torno" e "Acima" da referência expressas por "Positivo", "Zero" e "Negativo", chamados de predicados linguísticos.

Da mesma forma pode ser considerada a variação do erro como um outro fator importante na regulação, podendo também ser representado lingüisticamente por "Negativo", "Zero" e "Positivo".

Finalmente, as noções de "Lento", "Normal" e "Rápido" relativo à velocidade de atuação, também podem ser caracterizadas lingüisticamente por "Negativo", "Zero" e "Positivo" e a ação de controle é condicionada a um conjunto de regras que definem as condições de regulação do sistema.

#### Arquitetura do controlador Fuzzy

A configuração típica de um sistema de controle *fuzzy* é mostrada na Figura 5.1. Seus principais componentes são: a fuzzificação, a base de conhecimento, a lógica de tomada de decisões e a defuzzificação.



Figura 5.1 - Configuração do controlador fuzzy.

# A Fuzzificação

A fuzzificação consiste em expressar uma variável de entrada em termos de um conjunto *fuzzy*, ou seja, um mapeamento do domínio de números reais para o domínio *fuzzy*. Para fuzzificar uma variável é necessário que se estabeleça uma relação entre os valores numéricos associados a um termo ou variável lingüística. Um termo lingüístico é então caracterizado por uma função de pertinência que representa o grau de pertinência pelo qual um certo valor numérico pertence a um universo de discurso. O universo de discurso é um conjunto de valores finitos determinados pelo projetista dependendo de cada aplicação.

Funções de pertinência *fuzzy* representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada. Um número prático de conjuntos *fuzzy* representados por funções de pertinência gira em torno de 2 a 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, mas às custas do aumento do tempo computacional.

Os formatos de funções de pertinência mais freqüentemente encontrados são triangulares e trapezoidais, pois são gerados com facilidade. Quando é necessário um desempenho mais suave utilizam-se funções do tipo gaussiana, sigmoidal ou spline cúbica. Não necessariamente, utilizam-se funções de pertinência iguais para todas as variáveis, podendo assim utilizar-se funções de pertinência diferentes para cada uma das variáveis (SHAW & SIMÕES, 1999). As Figuras 5.2 e 5.3 mostram exemplos de funções de pertinência.



Figura 5.2 – Função de pertinência triangular.



Figura 5.3 - Função de pertinência trapezoidal.

# Base de Conhecimento

A base de conhecimento é constituída de uma base de dados (funções de pertinência) juntamente com uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece as definições numéricas necessárias às funções de pertinência usadas no conjunto de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza os objetivos e controle e a estratégia de controle utilizadas.

# Lógica de Tomada de Decisões

A lógica de tomada de decisões usa implicações *fuzzy* para simular tomadas de decisão humanas. Existem dois tipos de implicações *fuzzy*, também chamados por regras de inferência ou associações: modo afirmativo e modo negativo.

modo afirmativo :
$$\begin{cases} Premissa 1 & u = A \\ Premissa 2 & se \ u = A \\ Consequência & y = B \end{cases}$$
modo negativo : $\begin{cases} Premissa 1 & y = não - B \\ Premissa 2 & se \ u = A \\ Consequência & y = não - A \end{cases}$ 

O modo afirmativo relaciona-se com o mecanismo de inferência progressiva usado em controladores *fuzzy* e sistemas especialistas. Já o modo negativo relaciona-se com o mecanismo de inferência regressiva que também é usado em sistemas especialistas.

Uma regra *fuzzy* ou inferência *fuzzy* relaciona conjuntos *fuzzy* usando o modo afirmativo da seguinte maneira,

Desta forma os sistemas *fuzzy* podem estimar funções de entrada e saída através de técnicas heurísticas onde uma variável de entrada aciona uma inferência *fuzzy* que por seguinte gera uma variável de saída. Todas as possíveis decisões que o controlador *fuzzy* pode tomar são obtidas desta heurística e montadas em uma tabela, chamada de tabela de regras.

# A Defuzzificação

A defuzzificação tem o objetivo de realizar transformações de controle *fuzzy* inferidas em ações de controle não *fuzzy*, ou seja, obter um único valor discreto que possa ser utilizado como ação de controle real. Existem muitos métodos de defuzzificação como: critério do valor máximo, médias entre os valores máximos e centro de área.

O método de defuzzificação centro de área é mais comumente usado por ser um método contínuo, isto é, uma mudança infinitamente pequena numa variável de entrada não causa nunca uma mudança abrupta em nenhuma variável de saída. Além disso, processadores de lógica *fuzzy* que utilizam o método centro de área calculam as áreas das funções de pertinência em tempo de compilação em vez de fazê-lo em tempo de execução acelerando desta forma o processo (SHAW & SIMÕES, 1999).

O cálculo de uma tomada de decisão usando o método centro de área é realizado da seguinte forma,

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^{N} u_i \mu_{saida}(u_i)}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{saida}(u_i)}$$
(5.1)

onde  $\mu_{saida}(u_i)$  é a área da função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *fuzzy*,  $u_i$  é a posição da função de pertinência individual e N é o número de variáveis do universo de discurso. Esta equação fornece o centróide composto, para o qual contribuem as funções de pertinência indicadas.

# 5.3.2 – Modelo Fuzzy Takagi-Sugeno

Uma outra abordagem para projeto de um controlador *fuzzy* é utilizar a representação Takagi-Sugeno da planta não-linear. A modelagem *fuzzy* Takagi-Sugeno é simples, onde as dinâmicas do sistema são capturadas por um conjunto de implicações *fuzzy* que caracterizam relações locais no espaço de estados. A característica predominante de um modelo Takagi-Sugeno é a descrição das dinâmicas locais de cada implicação *fuzzy* (regra) por um modelo de sistema linear. O modelo *fuzzy* global do sistema é obtido pela combinação *fuzzy* dos modelos do sistema linear.

Especificamente, o sistema *fuzzy* Takagi-Sugeno é descrito pelas regras *fuzzy* SE-ENTÃO, que representam localmente relações lineares entre a entrada e a saída de um sistema.

A descrição local da planta dinâmica a ser controlada deve estar disponível nos termos dos modelos lineares locais, portanto tem-se os seguintes modelos lineares locais para o sistema *fuzzy* contínuo,

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i x(t),$$
  

$$y(t) = C_i x(t),$$
(5.2)

sendo i = 1, 2, ..., r,  $(r \in o número de modelos lineares)$ , o vetor de estado  $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ , o vetor de entrada  $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ , o vetor de saída  $y(t) \in \mathfrak{R}^q$ ,  $A_i \in \mathfrak{R}^{nxn}$ ,  $B_i \in \mathfrak{R}^{nxm}$ ,  $C_i \in \mathfrak{R}^{qxn}$ . A informação acima (dos modelos lineares locais) é então fundida com as regras SE-ENTÃO disponíveis, onde a i-ésima regra pode ter a forma,

$$SE \ z_1(t) \notin M'_1 \ E \dots E \ z_p(t) \notin M'_p,$$

$$Regra \ i: ENTÃO \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i x(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}$$
(5.3)

onde  $M_j^i$ , j = 1, 2, ..., p é o conjunto *fuzzy j* da regra *i* c  $z_1(t)$  são as variáveis premissas. Seja  $\mu_j^i(z_j(t))$  a função de pertinência do conjunto *fuzzy*  $M_j^i$  e seja

$$w^{i}(z(t)) = \prod_{j=1}^{p} \mu_{j}^{i}(z_{j})), \quad z(t) = [z_{1}(t) z_{2}(t) \dots z_{p}(t)]$$

Como  $\mu_j^i(z_j(t)) \ge 0$  tem-se, para i = 1, 2, ..., r,

$$w^{i}(z(t)) \ge 0 \ e \ \sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t)) > 0.$$

Uma escolha para a obtenção de um modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno para sistemas nãolineares é adotar z(t) = x(t), sendo x(t) o vetor de estado do sistema não-linear (PIETROBOM, 1999).

Desta forma, dado um par (x(t), u(t)), o sistema *fuzzy* resultante é tido como a média ponderada dos modelos locais e tem a forma,

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))(A_{i}x(t) + B_{i}u(t))}{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))}$$

$$= \sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))(A_{i}x(t) + B_{i}u(t))$$

$$= \left(\sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))A_{i}\right)x(t) + \left(\sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))B_{i}\right)u(t)$$

$$= A(\alpha)x(t) + B(\alpha)u(t).$$
(5.4)

O sistema não forçado (u(t) = 0) é definido como segue,

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))A_{i}x(t)}{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))}$$
$$= \sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))A_{i}x(t)$$
$$= A(\alpha)x(t).$$
(5.5)

A saída para os casos forçado e não forçado, é dada por

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))C_{i}x(t)}{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))}$$
$$= \sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))C_{i}x(t)$$
$$= C(\alpha)x(t).$$

Para i = 1, 2, ..., r,

$$\alpha_{i}(z(t)) = \frac{w^{i}(z(t))}{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))}.$$

Note que, para i = 1, 2, ..., r,

$$\alpha_i(z(t)) \ge 0$$
 e  $\sum_{i=1}^r \alpha_i(z(t)) = 1.$  (5.6)

O uso de modelos *fuzzy* Takagi-Sugeno é útil na descrição aproximada de sistemas não-lineares. É bem conhecido que sistemas *fuzzy* aditivos  $F : \mathfrak{R}^n \to \mathfrak{R}^p$ , como o modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno, podem aproximar uniformemente qualquer função contínua  $f: U \subset \mathfrak{R}^n \to \mathfrak{R}^p$  em um domínio compacto (fechado limitado) U (KOSKO, 1997). No caso do modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno, quanto maior o número de modelos locais, melhor será a compatibilidade do modelo à equação diferencial não-linear da planta.

#### Controladores com Modelos Fuzzy Takagi-Sugeno

Para projetar um controlador *fuzzy* para estabilizar sistemas não-lineares descritos por modelos *fuzzy*, utiliza-se o conceito de Compensação Distribuída Paralela (CDP). A idéia é projetar um controlador para cada regra do modelo *fuzzy*. Para cada regra, são utilizadas técnicas de projeto de controle linear. O controlador *fuzzy* global resultante, que, em geral, é não-linear é uma combinação *fuzzy* de cada controlador linear individual. A CDP oferece um procedimento para projetar um regulador para o modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno, onde cada regra de controle é projetada a partir da correspondente regra de um modelo Takagi-Sugeno da planta. O controlador *fuzzy* projetado compartilha os mesmos conjuntos de regras com o modelo *fuzzy* nas partes premissas. Para o modelo fuzzy (5.3), sendo i = 1, 2, ..., r, o controlador *fuzzy* via CDP possui a seguinte estrutura,

Regra i:  

$$\frac{SE \ z_1(t) \acute{e} M'_1 \ E \dots E \ z_p(t) \acute{e} M'_p,}{ENT \widetilde{A}O \ u(t) = -F_i(t)}.$$
(5.7)

De forma análoga à efetuada na obtenção de (5.3), o controlador fuzzy é dado por

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))F_{i}x(t)}{\sum_{i=1}^{r} w^{i}(z(t))}$$
  
=  $-\sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))F_{i}x(t)$  (5.8)  
=  $-F(\alpha)x(t)$ .

O objetivo do projeto do regulador *fuzzy* é determinar os ganhos de realimentação locais  $F_i$  nas partes conseqüentes. Para a lei de controle (5.8), a equação (5.4) é dada por (5.9) (TANAKA *et al.*, 1998), levando em consideração a equação (5.5),

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} \alpha_{i}(z(t))\alpha_{j}(z(t))\{A_{i} - B_{i}F_{j}\}x(t)$$

$$= \sum_{i=1}^{r} \alpha_{i}^{2}(z(t))G_{ii}x(t) + 2\sum_{i
(5.9)$$

#### Condições para a Estabilidade de Controladores Fuzzy

Condições suficientes para a estabilidade de sistemas fuzzy contínuos são obtidas usando funções Lyapunov quadráticas do tipo  $V(x(t)) = x^T(t)Px(t)$  (TANAKA & SUGENO, 1992). A seguir resumimos os principais resultados de estabilidade do sistema contínuo para um melhor entendimento e referência.

**Lema 1** *O ponto de equilíbrio x = 0 do sistema fuzzy descrito por (5.4) é assintoticamente estável globalmente se existe uma matriz simétrica positiva definida comum P tal que* 

$$A_i^T P + P A_i < 0$$

para i = 1, 2, ..., r; isto é, para todos os subsistemas.

Prova: Vide (PIETROBOM, 1999).

**Lema 2** O ponto de equilíbrio x = 0 do sistema de controle fuzzy descrito por (5.9) é assintoticamente estável globalmente se existe uma matriz simétrica positiva definida comum P tal que

$$G_{ii}^T P + P G_{ii} < 0$$

para todo i = 1, ..., r e

$$\left(\frac{G_{ij}+G_{ji}}{2}\right)^T P + P\left(\frac{G_{ij}+G_{ji}}{2}\right) \le 0, \ i < j$$

para todo i, j = 1, ..., r excetuando-se os pares (i,j) tais que  $\alpha_i(z(t))\alpha_j(z(t)) = 0, \forall z(t)$ . Prova: Vide (PIETROBOM, 1999).

Lema 3 Assuma que o número de regras que estão ativas para todo t é menor ou igual a s, sendo  $1 < s \le r$ . O ponto de equilíbrio x = 0 do sistema de controle fuzzy descrito por (5.9) é assintoticamente estável globalmente se existe uma matriz simétrica positiva definida comum P e uma matriz simétrica semipositiva definida comum Q tais que

$$G_{ii}^{t} P + PG_{ii} + (s-1)Q < 0$$
(5.10)

para todo i = 1, ..., r e

$$\left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2}\right)^{T} P + P\left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2}\right) - Q \le 0, \ i < j$$
(5.11)

para todo i, j = 1,..,r excetuando-se os pares (i,j) tais que  $\alpha_i(z(t))\alpha_i(z(t)) = 0, \forall z(t)$ .

Prova: Vide (TANAKA et al., 1998).

Para analisar a estabilidade do sistema fuzzy é preciso encontrar uma matriz simétrica positiva definida comum P que satisfaça de um dos Lemas 1-3 (PIETROBOM,

1999). São apresentadas agora novas condições de estabilidade, mais relaxadas do que as anteriores, obtidas a partir do trabalho de PIETROBOM (1999).

**Teorema 1** Assuma que o número de regras que estão ativas para todo t é menor ou igual a s, sendo  $1 \le s \le r$ . Considere i, j = 1, ..., r, sendo  $i \le j$  e defina

$$Q_{ij} = G_{ii}^T P + P G_{ii} \tag{5.12}$$

$$Q_{ij} = \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2}\right)^T P + P\left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2}\right) \le 0,$$
(5.13)

$$Q_{t_{ij}} = \begin{cases} 0, \text{ se } \alpha_i(z(t))\alpha_j(z(t)) = 0, \forall z(t) \\ Q_{ij} - Q + P_{ij}, \text{ caso contrário.} \end{cases}$$
(5.14)

Então, o ponto de equilíbrio x = 0 do sistema de controle fuzzy descrito por (5.9) é assintoticamente estável globalmente se existe uma matriz simétrica positiva definida comum P, uma matriz simétrica positiva semidefinida comum Q e matrizes semidefinidas positivas P<sub>ij</sub> tais que

$$Q_{t} = \begin{bmatrix} Q_{1} + (s-1)Q & Q_{t_{12}} & \cdots & Q_{t_{1r}} \\ Q_{t_{12}} & Q_{2} + (s-1)Q & \cdots & Q_{t_{2r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{t_{1r}} & Q_{t_{2r}} & \cdots & Q_{t} + (s-1)Q \end{bmatrix} < 0.$$
(5.15)

Prova: Vide (PIETROBOM, 1999).

**Corolário 1** Se r = s, então pode-se adotar Q = 0 nas condições do Teorema 1. Prova: Vide (PIETROBOM, 1999). **Teorema 2** Se as condições do Lema 3 são satisfeitas, então as condições do Teorema 1 também serão.

Prova: Vide (PIETROBOM, 1999).

# Projeto de um Controlador Fuzzy Takagi-Sugeno com Desigualdades Matriciais Lineares

O projeto para determinar os ganhos de realimentação  $F_i$ , para i = 1, ..., r, pode ser definido por meio de LMIs para o sistema *fuzzy* contínuo da seguinte forma:

Encontre X, Y  $P_{ij} e M_i$  para i, j = 1, 2, ...,r, sendo i < j, satisfazendo X > 0, Y  $\ge 0$ ,  $P_{ij} \ge 0$  e

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & \cdots & C_{1r} \\ C_{12} & C_{22} & \cdots & C_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1r} & C_{2r} & \cdots & C_{rr} \end{bmatrix} < 0,$$
(5.16)

sendo

$$C_{ii} = A_i X - B_i M_i + X A_i^T - M_i^T B_i^T + (s-1)Y$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ se } \alpha_i(z(t))\alpha_j(z(t)) = 0, \ \forall z(t), \\ \frac{1}{2} \left( A_i X - B_i M_j + A_j X - B_j M_i + X A_i^T - M_j^T B_i^T + X A_j^T - M_i^T B_j^T \right) - Y + P_{ij}, \\ caso \ contrário. \end{cases}$$

As condições apresentadas anteriormente são LMIs com respeito às variáveis X, Y,  $P_{ij} \in M_i$  e são obtidas diretamente através do Teorema 1. É possível encontrar uma matriz positiva definida X, uma matriz semidefinida positiva Y, matrizes semidefinidas positiva  $P_{ij}$  e  $M_i$  satisfazendo as LMIs ou determinar que X, Y,  $P_{ij} \in M_i$  não existem. Este é um problema de

$$P = X^{\prime}, F_{i} = M_{i}X^{\prime} e Q = PYP,$$

a partir das soluções X, Y e Mi.

Estas LMIs devem ser aplicadas quando  $r \neq s$ . Quando r = s, pode-se por simplicidade utilizar as mesmas condições descritas, considerando-se agora Y = 0 (PIETROBOM, 1999).

#### Taxa de Decaimento

Além da estabilidade apresentada no trabalho de PIETROBOM (1999), a velocidade de resposta e possíveis restrições na entrada da planta também devem ser consideradas importantes ao projeto. A velocidade de resposta está relacionada com a taxa de decaimento, ou seja, o maior expoente Lyapunov.

Do Teorema 1 para uma função Lyapunov candidata  $V(x(t)) = x^T(t)Px(t)$  tem-se  $\dot{V}(x(t)) < 0$  se  $Q_t < 0$ , sendo  $Q_t$  dado em (5.15). E, utilizando-se o resultado da equação (5.6) temos que

$$P = \begin{bmatrix} \alpha_1 I & \alpha_2 I & \cdots & \alpha_r I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & P & \cdots & P \\ P & P & \cdots & P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P & P & \cdots & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 I \\ \alpha_2 I \\ \vdots \\ \alpha_r I \end{bmatrix}.$$

Portanto, a condição que  $\dot{V}(x(t)) \leq -2\gamma V(x(t))$  (TANAKA *et al.*, 1998) para toda trajetória é satisfeita para

$$Q_{t} + 2\gamma \begin{bmatrix} P & P & \cdots & P \\ P & P & \cdots & P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P & P & \cdots & P \end{bmatrix} < 0$$

-

-

ou seja,

$$\begin{bmatrix} Q_{1} + (s-1)Q + 2\gamma P & Q_{t}^{*} & \cdots & Q_{t_{lr}} \\ Q_{t}^{*} & Q_{2} + (s-1)Q + 2\gamma P & \cdots & Q_{t_{2r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{t}^{*} & Q_{t}^{*} & \cdots & Q_{t} + (s-1)Q + 2\gamma P \end{bmatrix} < 0$$

sendo

$$Q_{t_{ij}}^{*} = \begin{cases} 0, \text{ se } \alpha_i(z(t))\alpha_j(z(t)) = 0, \forall z(t) \\ Q_{ij} - Q + P_{ij} + 2\gamma P, \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

e  $\gamma > 0$ . Assim o maior limite inferior para a taxa de decaimento que pode ser encontrado usando a função Lyapunov quadrática é obtido resolvendo-se o seguinte problema de minimização dos autovalores generalizado (BOYD *et al.*, 1994) em *P* e  $\gamma$ :

Maximize  $\gamma$  e encontre X,  $Y P_{ij}$ ,  $M_I$ , ...,  $M_r$  sujeito a X > 0,  $Y \ge 0$ ,  $P_{ij} \ge 0$  e

$$\begin{bmatrix} C_{11}^{'} & C_{21}^{'} & \cdots & C_{1r}^{'} \\ C_{12}^{'} & C_{22}^{'} & \cdots & C_{2r}^{'} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1r}^{'} & C_{2r}^{'} & \cdots & C_{rr}^{'} \end{bmatrix} < 0,$$
(5.17)

sendo

$$C_{ii} = A_{i}X - B_{i}M_{i} + XA_{i}^{T} - M_{i}^{T}B_{i}^{T} + (s-1)Y + 2\gamma X,$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ se } \alpha_{i}(z(t))\alpha_{j}(z(t)) = 0, \forall z(t), \\ \frac{1}{2}(A_{i}X - B_{i}M_{j} + A_{j}X - B_{j}M_{i} + XA_{i}^{T} - M_{j}^{T}B_{i}^{T} + XA_{j}^{T} - M_{i}^{T}B_{j}^{T}) - Y + P_{ij}, \\ caso \ contrário. \end{cases}$$

Novamente, os ganhos de realimentação  $F_i$ , uma P comum e uma Q comum podem ser obtidos da seguinte forma:

$$P = X^{T}, F_{I} = M_{I}X^{T} e Q = PYP,$$

a partir das soluções X, Y e Mi.

# Restrição na Entrada

Seja x(0) uma condição inicial conhecida. A restrição  $||u(t)||_2 \le \mu$  é imposta para todo tempo  $t \ge 0$  se as LMIs

$$\begin{bmatrix} 1 & x(0)^T \\ x(0) & X \end{bmatrix} \ge 0$$
(5.18)

e

$$\begin{bmatrix} X & XC_i^T \\ C_i X & \lambda^2 I \end{bmatrix} \ge 0$$
(5.19)

se mantêm sendo  $X = P^{-1}$  e  $M_i = F_i X$  (BOYD et al., 1994; TANAKA et al., 1998).

Controladores fuzzy estáveis que satisfaçam a restrição na entrada podem ser definidos da seguinte forma:

Encontre X, Y,  $R_{ij}$ ,  $S_{ij}$ ,  $W_{ij}$  e  $M_i$  para i, j = 1, 2, ..., r, sendo i < j, satisfazendo X > 0,  $Y \ge 0$  (se  $r \ne s$ ), (5.16), (5.18) e (5.19).

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas de controle estudadas e suas características. No capítulo seguinte serão apresentados os resultados de simulações envolvendo a utilização destas técnicas de controle.



# CAPÍTULO 6

#### **RESULTADOS DE SIMULAÇÕES**

Neste capítulo apresentamos os resultados de simulações obtidos utilizando cada uma das técnicas de controle exploradas neste trabalho: controle PID, controle linearização por realimentação e controle *fuzzy*. O objetivo do controle é regular o nível de aço (*h*) dentro do tanque submerso quando um nível desejado ( $h_d$ ) é pré-fixado a partir da entrada de vazão  $Q_i$ . As simulações foram realizadas utilizando o aplicativo *MATLAB* e seus módulos *Simulink*, *Control*, *Fuzzy* e *LMI*. Os parâmetros da planta estão relacionados no Apêndice 2.

#### 6.1 - Lei de Controle PID

Os controladores PI e PID são muito utilizados em controle industrial por serem controladores de ordem fixa com apenas três parâmetros e pela facilidade de ajuste destes parâmetros.. Podem ser encontrados na literatura várias técnicas de sintonia de parâmetros para controladores PID (OGATA, 1993).

A lei de controle PID é dada por,

$$Q_i = \left(K_P + \frac{K_I}{s} + K_D\right)e.$$

A Figura 6.1 apresenta o diagrama de blocos elaborado no *Simulink* e utilizado nas simulações.



Figura 6.1 – Diagrama de blocos para simulação com controlador PID.

Baseado no conhecimento do efeito das ações de cada um dos três parâmetros do controlador PID, a partir de simulações realizadas, pode-se encontrar os ganhos para cada ação.

### 6.2 - Lei de Controle Não Linear

Nesta seção apresentamos uma proposta de controle não-linear para o nível de aço fundido no tanque submerso. O modelo matemático descrito anteriormente para o nível de aço h para uma vazão de entrada  $Q_i$ , é dado pela equação (4.4), a qual é repetida aqui por conveniência,

$$\dot{h} = \frac{1}{A_r} (Q_i - Q_o).$$

Se o valor da vazão do tanque submerso  $(Q_o)$  for precisamente conhecido, uma lei de controle  $Q_i$  natural seria,

$$Q_i^* = A_T K_p e + Q_o \tag{6.1}$$

onde  $K_p$  é um parâmetro de projeto que determina a taxa exponencial de convergência do erro  $e := h_d - h$  dada por,

$$e(t) = e(0)\exp(-K_{p}t)$$
 (6.2)

fornecendo  $e \to 0$  quando  $t \to \infty$ , para  $K_p > 0$ . Uma vez que substituindo  $Q_i^*$  na equação (4.4) obtemos,

$$\dot{e} + K_p e = 0. \tag{6.3}$$

Como podemos observar, a lei de controle (6.1) cancela a não-linearidade de modo a fornecer um sistema linear em malha fechada (SLOTINE & LI, 1991).

Se o valor de  $Q_o$  não for precisamente conhecido, devido a perturbações e distúrbios, a lei de controle descrita na equação (6.1) não poderá ser utilizada. Para obtermos  $Q_i^*$ , devemos utilizar uma estimativa do valor de  $Q_{o}$ , obtida a partir de medições de h, denotada de  $\hat{Q}_{o}$ .

Assim, a lei de controle é dada por:

$$Q_{i}^{*} = A_{T} \rho K_{p} e + \hat{Q}_{o} .$$
(6.4)

Devido a erros de estimação  $\widetilde{Q}_o := Q_o - \hat{Q}_o$ , um termo de controle chamado controle supervisório, denotado  $u_s$ , pode ser adicionado à  $Q_i$  para obtermos  $e \to 0$  quando  $t \to \infty$  (WANG, 1994; LEE, 1996). O termo controle supervisório é inspirado na técnica de controle de estrutura variável por modo de deslizamento. Assim, a lei de controle pode ser descrita da seguinte forma,

$$Q_i^* = A_T K_p e + \hat{Q}_o + u_s \tag{6.5}$$

 $\operatorname{com} \, u_s = A \operatorname{sgn}(e), \, A > 0.$ 

Substituindo a equação (6.5) na equação (6.1) obtemos:

$$-\dot{e} = \frac{1}{A_T} \left( A_T K_p e + \widetilde{Q}_o + A \operatorname{sgn}(e) \right).$$
(6.6)

A análise da estabilidade pode ser vista escolhendo uma função de Lyapunov candidata como,

$$V = \frac{e^2}{2} \tag{6.7}$$

que fornece

$$\dot{V} = \frac{-e}{A_T} (A_T K_p e + \widetilde{Q}_o + A \operatorname{sgn}(e)).$$
(6.8)

Assim, escolhendo-se um valor de A > 0, levando em conta que  $\widetilde{Q}_o$  está dentro de um intervalo conhecido, pode-se garantir que  $\dot{V} < -K_p e^2 < 0$ , sendo  $A > \left| \widetilde{Q}_o \right|$ .

O diagrama de blocos elaborado no *Simulink* e utilizado nas simulações é apresentado na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Diagrama de blocos para simulação com a técnica linearização por realimentação.

# 6.3 - Lei de Controle Fuzzy

# Modelo Mamdani

O controlador *fuzzy* proposto é constituído de duas entradas, erro do nível e variação do erro, e uma saída, que corresponde a tensão de entrada para o cilindro hidráulico. O sistema usa a fuzzificação *singleton*, a defuzzificação centro de área e regras de inferência do tipo produto (Figura 6.3).



Figura 6.3 – Esquema do sistema fuzzy.

A base de regras *fuzzy* consiste de uma coleção das regras fuzzy SE-ENTÃO da seguinte forma:

SE 
$$h \notin F_1^{\ell} E = -\dot{h} \notin F_2^{\ell}$$
  
ENTÃO  $v_r \notin G^{\ell}$ 

onde  $F_1^{\ell}$  e  $F_2^{\ell}$  são os conjuntos de entrada *fuzzy*,  $G^{\ell}$  o conjunto de saída *fuzzy*, h (nível) e  $\dot{e}$  (variação do nível) são as variáveis linguísticas de entrada,  $v_r$  (tensão) é a variável  $\dot{e}$  linguística de saída e  $\ell = 1, 2, ..., r$  as regras linguísticas.

Cada entrada é composta por um conjunto de sete bases lingüistica, totalizando um total de quarenta e nove possíveis ações de controle. Os predicados lingüisticos utilizados possuem os seguintes significados: primeira letra: Negativo, Positivo; segunda letra: Grande, Médio, Pequeno. A Tabela 6.1 apresenta a base de regras do projeto onde a célula em destaque pode ser lida como segue:

"Se Erro (*h*) é NP (negativo pequeno) e variação do Erro ( $\dot{e}$ ) PM (positivo médio) então: Tensão é PP (positivo pequeno)".

		Variação do Erro ( e )						
		NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	Z
Егго ( <i>h</i> )	NM	NG	NG	NG	NM	NP	Z	PP
	NP	NG	NG	NG	NM	Z	PP	PM
	Z	NG	NG	NG	Z	PG	PG	PG
	PP	NM	NP	Z	PM	PM	PG	PG
	PM	NP	Z	PP	PM	PG	PG	PG
	PG	Z	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tabela 6.1 - Tabela de Regras

A determinação de todos os termos lingüísticos utilizados neste projeto aplicados às entradas, erro e variação do erro, e associada as suas respectivas funções de pertinência são mostradas nas Figuras 6.4 - 6.6.



Figura 6.4 - Função de pertinência para a entrada erro.



Figura 6.5 - Função de pertinência para entrada variação do erro.



Figura 6.6 - Função de pertinência para a saída.

O diagrama de blocos elaborado no *Simulink* e utilizado nas simulações é apresentado na Figura 6.7.



Figura 6.7 - Diagrama de blocos para simulação com controlador fuzzy modelo Mamdani.

.

#### Modelo Takagi-Sugeno

Para projetar o controlador *fuzzy* deve-se ter um modelo *fuzzy* que represente as dinâmicas da planta não-linear. Para o controle de nível do tanque os seguintes equipamentos que compõem o processo são considerados: atuador (cilindro hidráulico), a válvula tampão e o tanque submerso (Figura 6.8), onde a relação entre  $x_a \in v_r$  é dada pela equação (4.11), a relação entre  $x_a \in Q_i$  dada pela constante de fluxo  $G_f$  e a dinâmica do tanque submerso dada pela equação (4.4). Repetimos aqui as equações (4.4), (4.11) e (4.13) por conveniência.



Figura 6.8 - Componentes do sistema.

$$\dot{h} = \frac{1}{A_T} (Q_i - Q_o)$$

$$\frac{x_a}{v_r} = \frac{K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_t / 4\beta_e) s^3 + (M_a K_{co} + BV_t / 4\beta_e) s^2 + (BK_{co} + A_p^2) s + K_d K_a A_p K_{eqo}}$$
$$\frac{Q_i}{x_a} = G_f$$

As variáveis de estado são definidas como:

 $x_1 = x_a$  $x_2 = \dot{x}_a$  $x_3 = \ddot{x}_a$  $x_4 = h$ 

Desta forma, obtemos a equação em espaço de estado para o sistema:
$$\dot{x} = f(x) + Bu \tag{6.9}$$

onde,

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ -\frac{(M_a K_{co} + BV_t / 4\beta_e)}{(M_a V_t / 4\beta_e)} x_3 - \frac{(BK_{ca} + A_p^2)}{(M_a V_t / 4\beta_e)} x_2 - \frac{K_d K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_t / 4\beta_e)} x_1 \\ \frac{1}{A_T} (G_f x_1 - k\sqrt{x_4}) \end{bmatrix}$$
e

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_t / 4\beta_e)} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para obtermos o modelo *fuzzy* global do sistema utilizamos três modelos lineares locais do Sistema (6.9). Essa linearização é feita em torno de faixas de operação determinadas a partir de cada sistema. O tipo de não-linearidade e magnitude de perturbação associada ao sistema define essa faixa de operação (GARCIA, 1997).

Existem vários métodos de linearização, entre eles, expansão em série de Taylor, linearização proposta por Teixeira & Zak (1999), técnicas de perturbação, etc.. Neste trabalho, utilizamos os dois primeiros métodos.

O primeiro método consiste em expandir a equação não-linear em série de Taylor em torno do ponto de operação desejado, desprezando todos os termos após a primeira derivada parcial. E para que seja possível obter um modelo matemático linear para um sistema não-linear, devemos supor que existe um pequena variação na faixa de operação (OGATA, 1993). A seguir apresentamos os passos de aplicação do primeiro método. Seja f(x) uma função não-linear nas variáveis  $x \in \overline{x}$  o ponto de operação de x. Assim, expandindo f(x) através da série de Taylor em torno do ponto de linearização, no caso pontos de equilíbrio, temos:

$$f(x) = f(\bar{x}_{1}, \bar{x}_{2}) + \left[\frac{\partial f}{\partial x_{1}}\right]_{(\bar{x})} \cdot (x_{1} - \bar{x}_{1}) + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial x_{4}}\right]_{(\bar{x})} \cdot (x_{4} - \bar{x}_{4}) + \\ \left[\frac{\partial^{2} f}{\partial x_{1}^{2}}\right]_{(\bar{x})} \cdot \frac{(x_{1} - \bar{x}_{1})^{2}}{2!} + \dots + \left[\frac{\partial^{2} f}{\partial x_{4}^{2}}\right]_{(\bar{x})} \cdot \frac{(x_{4} - \bar{x}_{4})}{2!} + \dots$$
(6.10)

Desprezando-se as derivadas de ordem superior ou igual a 2, temos:

$$f(x) \cong f(\overline{x}) + \left[\frac{\partial f}{\partial x_1}\right]_{(\overline{x})} \cdot (x_1 - \overline{x}_1) + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial x_4}\right]_{(\overline{x})} \cdot (x_4 - \overline{x}_4) \cdot (6.11)$$

Utilizando a expansão apresentada acima, obtemos o seguinte modelo linearizado em espaço de estado em torno dos pontos de linearização,  $(\bar{x}, \bar{u})$ ,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_d K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_t / 4\beta_e)} & -\frac{(BK_{co} + A_p^2)}{(M_a V_t / 4\beta_e)} & -\frac{(M_a K_{co} + BV_t / 4\beta_e)}{(M_a V_t / 4\beta_e)} & 0 \\ \frac{G_f}{A_T} & 0 & 0 & -\frac{k}{2A_T \sqrt{\bar{x}_4}} \end{bmatrix} x + (6.12)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_t / 4\beta_e)} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

com  $\bar{x}_1 = \frac{k}{G_f}(\sqrt{0.08}), \ \bar{x}_2 = 0, \ \bar{x}_3 = 0, \ \bar{x}_4 = 0.08 \ e \ \bar{u} = 0.1659 \text{ os pontos de equilíbrio.}$ 

Desta forma aproximamos o sistema de escoamento e fluxo através das seguintes três regras do modelo *fuzzy* nos pontos de operação,

Re gra 1 da Planta:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.07 ENTÃO $\{\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 x(t)\}$
Regra 2 da Planta:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.08 ENTÃO { $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 x(t)$
Re gra 3 da Planta:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0,09 ENTÃO { $\dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 x(t)$

A lei de controle resultante é da forma,

Re gra 1 do controlador:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.07, ENTÃO $u(t) = -F_1 x(t)$ .
Re gra 2 do controlador:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.08, ENTÃO $u(t) = -F_2 x(t)$ .
Re gra 3 do controlador:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.09, ENTÃO $u(t) = -F_3 x(t)$ .

sendo,

3

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5670886,07 & -237222,61 & -124,96 & 0 \\ 6,67 & 0 & 0 & -0,19 \end{bmatrix} B_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 141772,15 & 0 \end{bmatrix}^{T}$$

$$A_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5670886,07 & -237222,61 & -124,96 & 0 \\ 6,67 & 0 & 0 & -0,18 \end{bmatrix} B_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 141772,15 & 0 \end{bmatrix}^{T}$$
$$A_{3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5670886,07 & -237222,61 & -124,96 & 0 \\ 6,67 & 0 & 0 & -0,17 \end{bmatrix} B_{3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 141772,15 & 0 \end{bmatrix}^{T}$$

O segundo método para a linearização em modelos locais foi proposto por Teixeira & Zak (1999) e é descrita a seguir.

Supomos que o modelo verdadeiro é dado por,

$$\dot{x} = f(x) + G(x)u$$
. (6.13)

Suponhamos que os pontos de linearização  $\overline{x}$  não sejam necessariamente pontos de equilíbrio de (6.13). Desejamos é construir um modelo linear em x e u que se aproxime do comportamento (6.13) na vizinhança do ponto de operação  $\overline{x}$ ; ou seja, desejamos encontrar matrizes constantes A e B tal que em uma vizinhança de  $\overline{x}$ ,

 $f(x) + G(x)u \approx Ax + Bu$  para qualquer u (6.14)

e

3

$$f(\overline{x}) + G(\overline{x})u = A\overline{x} + Bu$$
 para qualquer  $u$ . (6.15)

Considerando *u* arbitrário, temos que,

$$G(\bar{x}) = B. \tag{6.16}$$

Assim, podemos encontrar uma matriz constante A que esteja na vizinhança de  $\bar{x}$ 

$$f(x) \approx Ax \tag{6.17}$$

e

$$f(\overline{x}) = A\overline{x} . \tag{6.18}$$

Seja  $a_i^T$  denotado como a i-ésima linha da matriz *A*. Então, com a finalidade de análise adicional, representamos a condição (6.17) da forma,

$$f_i(x) \approx a_i^T x$$
,  $i = 1, 2, \dots, n$  (6.19)

e representamos (6.18) como,

$$f_i(\overline{x}) = a_i^T \overline{x}, \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{6.20}$$

onde o i-ésimo componente de  $f \in f_i : \mathfrak{R}^n \to \mathfrak{R}$ . Expandindo o lado direito de (6.19) sobre  $\overline{x}$  e desprezando os termos de segunda ordem e ordens superiores, tem-se

$$f_i(\overline{x}) + \nabla^T f_i(\overline{x})(x - \overline{x}) \approx a_i^T x \tag{6.21}$$

onde  $\nabla f_i(x): \mathfrak{R}^n \to \mathbb{R}^n$  é o gradiente, um vetor coluna, de  $f_i$  com relação a x. Agora, usando (6.20), representamos (6.21) como,

$$\nabla^T f i(\overline{x})(x - \overline{x}) \approx a_i^T (x - \overline{x})$$
(6.22)

onde x é arbitrário mas próximo de  $\overline{x}$ . Nossa tarefa agora é determinar um vetor constante  $a_i$ ; tão próximo quanto possível de  $\nabla f_i(\overline{x})$  e que satisfaça a restrição  $a_i^T \overline{x} = f_i(\overline{x})$ . Desta forma, define-se

$$E = \frac{1}{2} \left\| \nabla f_i(\overline{x}) - a_i \right\|_2^2.$$

Então, nós podemos formular a busca por  $a_i$  como um problema de otimização com restrição da forma,

$$\begin{array}{c}
\text{minimize} \quad E \\
\text{sujeito a } a_i^T \overline{x} = f_i(\overline{x})
\end{array}$$
(6.23)

Note que (6.23) é um problema de otimização com restrição convexo. Isto significa que a condição necessária de primeira ordem para um mínimo de E é também suficiente. A condição de primeira ordem para o problema de otimização é dada por,

$$\nabla_{a_i} E + \lambda \nabla_{a_i} \left( a_i^T \overline{x} - f_i(\overline{x}) \right) = 0 \tag{6.24}$$

$$a_i^T \overline{x} = f_i() \tag{6.25}$$

onde  $\lambda$  é o multiplicador Lagrangiano e o sub-índice  $a_i$  em  $\nabla$ , indica que o gradiente é calculado com respeito a  $a_i$ . Resolvendo a diferenciação requerida em (6.24) obtêm-se,

$$a_i - \nabla f_i(\bar{x}) + \lambda \bar{x} = 0 \tag{6.26}$$

$$a_i^T \overline{x} = f_i(\overline{x}). \tag{6.27}$$

Consideramos agora o caso onde  $\overline{x} \neq 0$ . Pré-multiplicando (6.26) por  $\overline{x}^{T}$  e substituindo (6.27) na equação resultante obtemos,

$$\lambda = \frac{\overline{x}^T \nabla f_i(\overline{x}) - f_i(\overline{x})}{\left\|\overline{x}\right\|^2}.$$
(6.28)

Substituindo  $\lambda$  dado por (6.28) em (6.26), obtemos,

$$a_i^T = \nabla f_i(\overline{x}) + \frac{f_i(\overline{x}) - \overline{x}^T \nabla f_i(\overline{x})}{\left\|\overline{x}\right\|^2} \overline{x}, \quad \overline{x} \neq 0.$$
(6.29)

Assim, utilizando (6.29) obtemos um novo modelo linearizado para (6.9) na forma espaço de estado,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_{d}K_{a}A_{p}K_{eqs}}{(M_{a}V_{t}/4\beta_{e})} & -\frac{(BK_{co} + A_{p}^{2})}{(M_{a}V_{t}/4\beta_{e})} & 0 \\ \frac{G_{f}}{A_{t}} - k^{2}\overline{x}_{4} \left(\frac{2 - \overline{x}_{4}}{2A_{t}G_{f}}\right) & 0 & 0 & \frac{-k}{2A_{t}\sqrt{\overline{x}_{4}}} \cdot \frac{(2\overline{x}_{4} + (\frac{k}{G_{f}})^{2}}{(\overline{x}_{4} + (\frac{k}{G_{f}})^{2}}) \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{a}A_{p}K_{eqs}}{(M_{a}V_{t}/4\beta_{e})} \end{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} u$$
(6.30)

com  $\overline{x}_1 = 0$ ,  $\overline{x}_2 = 0$ ,  $\overline{x}_3 = 0$ ,  $\overline{x}_4 = 0.08$  e  $\overline{u} = 0.1659$  os pontos de operação.

Como feito anteriormente para os modelos obtidos via série de Taylor, aproxima-se o sistema de escoamento e fluxo através das seguintes três regras do modelo *fuzzy* nos pontos de operação utilizando a fórmula de Teixeira & Zak (1999),

Re gra 1 da Planta:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.07 ENTÃO { $\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 x(t)$
Regra 2 da Planta:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0.08 ENTÃO { $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 x(t)$
Re gra 3 da Planta:	SE $x_4(t)$ está em torno de 0,09 ENTÃO { $\dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 x(t)$

A lei de controle resultante é da forma,

Regra 1 do controlador : SE  $x_4(t)$  está em torno de 0.07, ENTÃO  $u(t) = -F_1x(t)$ .

Regra 2 do controlador :  $SE x_4(t) está em torno de 0.08$ , ENTÃO  $u(t) = -F_2 x(t)$ .

Regra 3 do controlador : SE  $x_4(t)$  está em torno de 0.09, ENTÃO  $u(t) = -F_3 x(t)$ .

sendo,

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5670886,07 & -237222,61 & -124,96 & 0 \\ 6,67 & 0 & 0 & -0,38 \end{bmatrix}$$

 $B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 141772, 15 & 0 \end{bmatrix}^T$ 

$$A_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5670886,07 & -237222,61 & -124,96 & 0 \\ 6,67 & 0 & 0 & -0,35 \end{bmatrix} B_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 141772,15 & 0 \end{bmatrix}^{T}$$
$$A_{3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5670886,07 & -237222,61 & -124,96 & 0 \\ 6,67 & 0 & 0 & -0,33 \end{bmatrix} B_{3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 141772,15 & 0 \end{bmatrix}^{T}$$

O projeto do controlador foi feito considerando os índices de desempenho como a taxa de decaimento e restrição na entrada. As LMIs foram implementadas utilizando o módulo *LMI* do *MATLAB* (Apêndice 3).

As funções de pertinência foram geradas através do módulo *Fuzzy* do *MATLAB*, utilizando os comandos *trimf* e *trapmf* e suas curvas estão ilustradas na Figura 6.9.



Figura 6.9 - Funções de pertinência para as regras 1, 2 e 3 da planta.

Assim as seguintes soluções foram obtidas do projeto de controladores *fuzzy* Takagi-Sugeno via LMI, para os dois tipos de linearização empregados.

Linearização por série de Taylor,

$$\begin{split} F_1 &= M_1 X^{-1} = \begin{bmatrix} -39.231181 & -1.630886 & 0.000038 & 0.719269 \end{bmatrix}, \\ F_2 &= M_2 X^{-1} = \begin{bmatrix} -39.079736 & -1.621003 & 0.000279 & 0.842694 \end{bmatrix}, \\ F_3 &= M_3 X^{-1} = \begin{bmatrix} -38.783956 & -1.607517 & 0.000424 & 1.146494 \end{bmatrix}, \\ P &= X^{-1} = \begin{bmatrix} 48.174243 & 2.119208 & 0.029810 & 52.686837 \\ 2.119208 & 0.101081 & 0.001586 & 2.173889 \\ 0.029810 & 0.001586 & 0.000029 & 0.028295 \\ 52.686837 & 2.173889 & 0.028295 & 61.079949 \end{bmatrix} > 0 \end{split}$$

 $\gamma = 10 e \mu = 100$ 

Linearização proposta por Teixeira & Zak (1999),

$$\begin{split} F_1 &= M_1 X^{-1} = \begin{bmatrix} -39.230329 & -1.630726 & 0.000041 & 0.710193 \end{bmatrix}, \\ F_2 &= M_2 X^{-1} = \begin{bmatrix} -39.081269 & -1.620924 & 0.000281 & 0.829362 \end{bmatrix}, \\ F_3 &= M_3 X^{-1} = \begin{bmatrix} -38.789057 & -1.607549 & 0.000424 & 1.125095 \end{bmatrix}, \\ P &= X^{-1} = \begin{bmatrix} 48.774404 & 2.156917 & 0.030416 & 52.550705 \\ 2.156917 & 0.103330 & 0.001624 & 2.180367 \\ 0.030416 & 0.001624 & 0.000030 & 0.028464 \\ 52.550705 & 2.180367 & 0.028464 & 60.033405 \end{bmatrix} > 0 \\ \gamma &= 10 \in \mu = 100 \end{split}$$

Para validar as leis de controle obtidas foi realizada a simulação do sistema original (6.9) com a lei de controle (5.8) para r = 3, empregando  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , como acima. Utilizou-se do módulo *Control* do Matlab para realizar as simulações.

#### 6.4 - Resultados

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados obtidos com as simulações utilizando cada uma das técnicas de controle exploradas, as quais estão descritas nas seções anteriores, sendo aplicadas no controle de nível do tanque submerso. O desempenho dos controladores propostos estão relacionados com a abertura da válvula tampão utilizada na planta LCT-RD do IPT que tem uma abertura máxima de 0,05 metros e o tempo de acomodação do sistema.

As Figuras 6.10-6.12 apresentam o nível de aço dentro do tanque submerso, a abertura da válvula tampão e o sinal de controle para cada uma das técnicas exploradas. Para o controlador PID foram utilizados:  $K_P = 40$ ,  $K_I = 10$ ,  $K_D = 0$ . Controle não linear  $K_P = 5000 \ e \ A = 0, 17$ .



Figura 6.10 - Nível de aço dentro do tanque submerso para cada controlador proposto.



Figura 6.11 - Abertura da válvula tampão para cada controlador proposto.



Figura 6.12 - Sinal de controle para cada controlador proposto.

As técnicas de controle utilizando lógica *fuzzy* forneceram resultados satisfatórios em relação as restrições da válvula e tempo de acomodação . O modelo Mamdani forneceu um tempo de resposta melhor do que o do modelo Takagi-Sugeno. Por outro lado, deve-se levar em consideração a exigência de um conhecimento especialista do operador do processo, quando se utiliza o modelo Mamdani. No modelo Takagi-Sugeno, a obtenção dos ganhos do controlador segue um procedimento mais sistemático, facilitando assim o seu desenvolvimento. Os dois métodos de linearização aplicados no modelo Takagi-Sugeno mostraram-se eficientes e têm, para este caso, resultados semelhantes.

Os controladores PID e linearização por realimentação apresentaram um desempenho satisfatório, atendendo as restrições na válvula e obtendo também um bom tempo de acomodação. Para melhorar o tempo de acomodação do controlador PID, seus parâmetros foram reajustados. As Figuras 6.13-615 apresentam as respostas para o nível de aço, abertura de válvula e sinal de controle para estes novos parâmetros para o controlador PID:  $K_P = 950$ ,  $K_I = 300$  e  $K_D = 10$ .



Figura 6.13 - Nível de aço dentro do tanque submerso para cada controlador proposto com

novos parâmetros PID.



Figura 6.14 - Abertura da válvula tampão para cada controlador proposto com novos parâmetros PID.

•



Figura 6.15 - Sinal de controle para cada controlador proposto com novos parâmetros PID.

Pelas Figuras 6.13-6.15 pode-se observar que o tempo de acomodação para o controlador PID, utilizando os novos parâmetros, apresenta melhor tempo de resposta em relação as técnicas de controle utilizando lógica *fuzzy* e linearização por realimentação. O sobresinal mostrado na figura (6.13) é em virtude do valor elevado do parâmetro proporcional do controlador PID. Por outro lado, observando os sinais de resposta para a abertura da válvula nota-se que por este parâmetro ser elevado, existe uma incompatibilidade com a natureza da válvula, que tem como abertura máxima de 0,05 metros. Desta forma, o tempo de resposta do sistema para esta técnica de controle pode ser comprometido. Além disto, seria impossível, em termos práticos, que a válvula tampão respondesse a uma abertura negativa.

## CAPÍTULO 7

#### CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

O propósito deste trabalho foi explorar e sugerir técnicas de controle aplicáveis ao controle de nível de um tanque submerso de um processo de lingotamento contínuo de tiras – rolos duplos, além de estudar os sistemas envolvidos no processo. As técnicas exploradas foram controle PID, linearização por realimentação e controle por lógica *fuzzy*, utilizando ambos os modelos Mamdani e Takagi-Sugeno.

O controle PID é amplamente difundido na indústria sendo de fácil implementação na prática. Os resultados obtidos mostraram que este tipo de controlador pode satisfazer o controle do nível no tanque submerso quando se reduz as exigência de desempenho de resposta. O operador do processo deve estar ciente das restrições de cada sistema para conseguir um bom ajuste dos parâmetros do controlador PID.

A técnica de linearização por realimentação ainda é uma novidade na indústria e sua implementação pode também ser considerada fácil. Seu desempenho depende, como no caso do controlador PID, do conhecimento apurado do operador para atender as restrições do processo. As respostas obtidas mostraram que a técnica garante a estabilidade do sistema e o tempo de acomodação do sistema é rápido.

Os controladores baseados em lógica *fuzzy* estão a cada dia sendo mais utilizados na indústria metalúrgica em geral. O modelo Mamdani é bem conhecido na indústria e já é aplicado em alguns processos de lingotamento contínuo. O modelo utiliza o conhecimento especialista do operador para ajustar seus parâmetros, tornando-o assim de uma utilização

mais fácil. O aumento do número de predicados lingüísticos das entradas pode aumentar a precisão da resposta, entretanto torna mais difícil o ajuste das bases de regras do controlador. O modelo Takagi-Sugeno ainda é uma novidade para a indústria e para um grande número de pesquisadores. A grande vantagem do modelo Takagi-Sugeno é a sistemática relativamente simples do procedimento de projeto do controlador, por este modelo apresentar modelos lineares em sua parte conseqüente. Foram apresentadas duas técnicas de linearização para obtenção dos modelos lineares, linearização por série de Taylor e uma técnica de linearização proposta por Teixeira & Zak (1999), que mostram-se eficientes para representar o sistema não-linear. As respostas quanto ao controle de nível do tanque submerso utilizando os dois modelos mostram-se atraentes, com um tempo de resposta rápido e atendendo as restrições do processo sem a necessidade de reajuste de parâmetros de projeto.

A dificuldade em implementar na prática as técnicas de controle linearização por realimentação e a técnica *fuzzy* é a exigência de equipamentos sofisticados como controladores lógicos programáveis ou microprocessadores dedicados. É necessário que estes equipamentos tenham módulos derivadores para se estimar os estados não disponíveis  $\dot{x}_a$  e  $\ddot{x}_a$ , necessários às técnicas linearização por realimentação e controle *fuzzy* modelo Takagi-Sugeno, e  $\dot{h}$  para controle *fuzzy* modelo Mamdani.

Como proposta futura sugere-se acoplar o controle de nível do tanque submerso ao controle de nível da piscina formada entre os rolos ao controle da velocidade dos rolos e ao controle da força de separação entre os rolos. Além disto, sugere-se a implementação prática das técnicas de controle aqui sugeridas utilizando plataformas industriais para validar os resultados de simulações apresentadas.

#### REFERÊNCIAS

### BIBLIOGRÁFICAS

- ASANO, K; KAJI, T.; AOKI, H.; IBARAKI, M.; MORIWAKI, S. (1996). Robust Molten Steel Level Control for Continuous Casting. Proceedings of the 35<sup>th</sup> Conference on Decision and Control. Kobe, Japan, December, p.1245-1250.
- BOYD, S.; EL GHAOUI, L.; FERON, E.; BALAKRISHMAN, V. (1994). Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory, SIAM Studies in Applied Mathematics, USA.

CALDAS, M. G. C. (1986). Laser: perspectivas tecnológicas e de mercado. PromoCET.

- CAPORALI, A. S. (1999). Modelagem, Simulação e Análise de Servomecanismo Eletro-Hidráulico. Dissertação de Mestrado – USP – EESC – SEM.
- CARVALHO, A. O. C.; FRANCO, L. R. H. R. (1999). O avanço da padronização das linguagens de programação no controle industrial. InTech Brasil, outubro, p.76-83.
- CHRISTMANN, B.; WEBER. J.; STADTFELD, G. (1985). Measurement of the distance between mould and strand narrow sides using eddy current sensors. Metallurgical Plant and Technology. p.50-54, March.
- COOK, R.; GROCOCK, P. G.; THOMAS, P. M.; EDMONDS, D. V.; HUNT, J.D. (1995). Development of the twin-roll casting process. Journal of Materials Processing Technology, v.22, p.76-84.

CONTROL SYSTEM TOOLBOX for use with MATLAB (1992). Mathworks, Inc..

DE KEYSER. R. M. C. (1995). Improved Mould Level Control in a Continuous Steel Casting Line. IFAC Automation in Mining, Mineral and metal Processing, sun City, South Africa, p.140-155.

- DE NEGRI, V. J., ATTIÉ, S. S., TOLEDO, L. B. (1997). Controle de posição utilizando servoválvulas e válvulas proporcionais eletro-hidráulicas (parte I). In: Revista ABHP, São Paulo: ABHP, set/out. n. 106. p. 15-18.
- DUSSUD, M.; GALICHET, S.; FOULLOY, L. P. (1998). Application of Fuzzy Logic Control for Continuous Casting Mold Level Control. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 6, n. 2, March, p. 246-256.
- FUZZY LOGIC TOOLBOX for use with MATLAB (1999). Mathworks, Inc..
- GARCIA, C. (1997). Modelagem e Simulação. Edusp
- GRAEBE, S.F.; GOODWIN, G.C.; ELSLEY, G. (1995). Control Design and Implementation in Continuous Steel Casting. IEEE Control Systems, p.64-71, April.
- INTECH (1998). Reportagem de Capa. Automação e instrumentação: ampliando a qualidade e a competitividade do aço brasileiro. ISA District 4 Publication. Junho, p.6-16.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERUGIA (2000). Produção de aço no brasil. http://www.ibs.org.br/producao.htm – agosto.
- IRVING, W. R. (1993). Continuous Casting of Steel. The Institute of Materials.
- KITADA, H.; KONDO, O.; KUSACHI, H.; SASAME, K. (1998). H∞ Control of Molten Steel Level in Continuous Caster. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 6, n. 2, March, p. 200-207.
- KONG, F.; DE KEYSER, R.; MARTIEN, C.; VERHASSELT, D. (1992). Model Identification for the Mould Level Control Loop in a Continuous Casting Machine. IFAC Automation in Mining, Mineral and metal Processing, Beijing, PRC.

KOSKO, B. (1997). Fuzzy Engineering, Upper Saddle River, New Jersey. Prentice-Hall.

- KRÜGER, G. (1985). Advanced Mould Level Control for Continuous Casting Plants. Metallurgical Plant and Technology, p. 42-49, March.
- LEE D.; LEE J.S.; KANG T. (1996). Adaptative Fuzzy Control of The Molten Steel Level in a Strip-Casting Process. Control Engineering Practice, v.4, no.11, p.1511-1520.

LMI Control Toolbox for Use with Matlab (1995). Mathworks, Inc..

Matlab<sup>®</sup> with Simulink<sup>TM</sup> User's Guide (1993). Mathworks, Inc..

MUNSON, B. R., (1997). Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Prentice/Hall do Brasil.

OGATA, K., (1993). Engenharia de Controle Moderno. Prentice/Hall do Brasil.

PALMIERI A. C., (1994). Manual de Hidráulica Básica. Albarus Sistemas Hidraúlicos.

- PIETROBOM, H. C. (1999). Controle de Sistemas Não-Lineares Baseados em LMI Utilizando Modelos Fuzzy. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP.
- PIMENTA, K. B. (1999). Projeto de Controladores PID com Desigualdades Lineares Matriciais. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP.
- SANTOS, J.; LIMA, F.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, A. A. Jr. (2000). Description of a Twin Roll Direct Strip Casting Process. In IV INDUSCON 2000., vol.1, Porto Alegre, 2000. Anais. p. 416-419.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. (1999). Controle e Modelagem Fuzzy. Ed. Edgard Blücher Ltda, Fapesp.

SLOTINE, J.J. E., WIPING, L. (1991). Applied Nonlinear Control. Prentice Hall.

SPINELLI, J. E.; ALVES, R. A.; TOSETTI, J.P.V.; SANTOS, C.A.; SPIM, J.A., GARCIA, A. (2000). Implementação de um Sistema de Controle Automático na Máquina de Lingotamento Contínuo de Tiras (Twin-Roll) do IPT/SP. Anais do XXXI Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. (1980). Mecânica dos Fluídos. Mc Graw Hill.

- TANAKA, K.; IKEDA, T.; WANG, H. O. (1998). Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI-Based Designs, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v.6 n.2, p 250-265.
- TANAKA, K.; NISHIMURA, M.; WANG, H. O. (1998). Multi-Objetive Fuzzy Control of High Rise/High Speed Elevators Using LMIs, Proceedings of The American Control Conference, Philadelphia, p. 3450-3454.
- TEIXEIRA, M. C. M.; ZAK, S. H. (1999). Stabilizing Controller Design for Uncertain Nonlinear Systems Fuzzy Models, IEEE Transactions on Fuzzy Systems v.7, n.2, p. 133-142.

VUJICIC, M. (2000). Laser on the Level. Intech, March, p. 40-44.

TEIXEIRA, M. C. M.; ZAK, S. H. (1999). Stabilizing Controller Design for Uncertain Nonlinear Systems Fuzzy Models, IEEE Transactions on Fuzzy Systems v.7, n.2, p. 133-142.

VUJICIC, M. (2000). Laser on the Level. Intech, March, p. 40-44.

WANG, H. O.; TANAKA, K.; GRIFFIN, M. F. (1996) An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues, IEEE Transactions on Fuzzy Systems v.4, n.1, p. 14-23.

WANG, L.X. (1994). Adaptive Fuzzy Systems and Control. PTR Prentice Hall.

ZADEH, L. A. (1973). Fuzzy Sets, Inform. Control, 8, pp. 338-353.

- WATANABE, T.; OMURA, K.; KONISHI, M.; WATANABE, S.; FURUKAWA, K. (1999). Mold Level Control in Continuous Caster by Neural Network Model. ISIJ Internacional, v. 39, n. 10, p. 1053-1060.
- WELSBY, S.D.; HITZ, T. (1997). True Position Measurement with Eddy Current Technology. Sensors Magazine Web Site, November.

## **APÊNDICE** 1

Neste apêndice são mostrados os passos para especificação do sistema eletrohidráulico. Todo o desenvolvimento e especificação do sistema eletro-hidráulico, considerou como base o trabalho de De Negri (1997).

A estrutura básica proposta para a análise é a de um mecanismo cuja a entrada é um sinal de tensão elétrica e a saída é o posicionamento de uma carga acoplada à haste de um cilindro hidráulico. Na análise será utilizada uma abordagem simplificada de modo a obter relações matemáticas descritas do processo do tipo linear. O equacionamento matemático se resume com a posição da carga ( $x_a$ ) é proporcional à tensão de entrada ( $v_r$ ),

$$x_a = K.v_r$$

onde K é a constante de proporcionalidade do mecanismo.

Em diversos sistemas reais de controle de posição pode ser identificada uma estrutura típica: servo-amplificador, sistema eletro-hidráulico e sensor de posição (Figura A1.1).



Figura A1.1 - Estrutura típica do sistema hidráulico.

O sensor de posição é dado pelo produto da constante de realimentação KD e a posição da haste do cilindro xa. Os sensores de posição para o sistema podem utilizar diversos princípios construtivos: indutivo (LVDT), ótico, magnético, capacitivo, resistivo, etc..

O servo-amplificador é o responsável pela emissão do sinal de erro ao sistema eletro-hidráulico e pode ser construído de diversas maneiras, a partir de um circuito eletrônico simples (amplificador-diferencial) até mesmo com microprocessadores (PC, PLC). A tensão de erro amplificada do servo-amplificador pode ser equacionada como,

$$V_{ca} = K_a (v_f - V_f)$$

O sistema eletro-hidráulico é o elemento do servomecanismo que a partir de sinal elétrico Vca promove o deslocamento da carga acoplada à haste do cilindro hidráulico atuador. São possíveis diversas configurações para este sistema e são bem difundidos na literatura. Neste trabalho utiliza-se a configuração básica composta de uma servoválvula eletro-hidráulica de simples estágio, tipo carretel, de 4 vias e um cilindro hidráulico de duplo efeito com carga acoplada.

O cilindro utilizado para análise é mostrado na Figura A1-2.



Figura A1.2 - Cilindro.

Pode-se observar que quando a pressão Pa da câmara A for superior à pressão Pb da câmara B ocorrerá um movimento da carga (Ma) para a direita. A vazão de fluído hidráulico Qa que entra na câmara A será, neste ponto, considerada igual à vazão que sai da câmara B. Esta vazão é chamada de vazão de controle Qc.

Se a massa Ma da carga for muito superior à inércia do pistão e do fluído hidráulico movimentado, pode-se facilmente obter a força útil disponível para movimentar a carga,

$$F_{util} = A_P (P_a - P_b) = M_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} + B \frac{dx_a}{dt}$$

onde,

.

Fútil é a força disponível para atuar na carga;

A<sub>p</sub> é a área da coroa do pistão;

(Pa-Pb) é a diferença de pressão entre a câmara A e a câmara B;

$$\frac{d^2 x_a}{dt^2}$$
 é a aceleração da massa Ma;

B é o coeficiente de atrito viscoso;

$$\frac{dx_a}{dt}$$
 é a velocidade da massa M<sub>a</sub>;

$$B\frac{dx_a}{dt}$$
 é a força de atrito viscoso.

Para o caso em que os vazamentos internos entre as câmaras do cilindro são desprezíveis, a equação que representa este fenômeno é dada por,

$$Q_c = \left(\frac{Vt}{4\beta_e}\right)\left(\frac{dP_c}{dt}\right) + Ap\frac{dx_a}{dt}$$

onde  $\beta_e$  é o módulo de elasticidade efetivo. Corresponde ao inverso do coeficiente de compressibilidade do óleo. Um valor típico para óleos de sistemas hidráulicos é 17 .10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>.

A equação que relaciona o deslocamento do carretel com a vazão de controle pode ser dada pela expressão,

$$Q_c = K_{qo} X_v - K_{co} P_c$$

onde  $K_{qo}$  é a variação de vazão  $Q_c$  que se obtém quando se desloca o carretel de uma unidade na região próxima ao ponto de operação.

Desconsiderando os efeitos da dinâmica do motor-força e da servoválvula em relação à dinâmica do atuador com a carga acoplada, pode-se obter uma relação matemática simplificada entre  $V_{ca}$  e  $X_v$ ,

$$X_v = K_s V_{ca}$$

onde  $K_s$  é a constante de proporcionalidade entre a tensão de entrada da servoválvula e o deslocamento do carretel.

A obtenção dos coeficiente  $K_{eqo}$  e  $K_{co}$  é feita a partir de catálogos de fabricantes de válvulas.

A equação que rege todo o sistema em malha fechada é dada por,

١

$$\frac{x_a}{v_r} = \frac{K_a A_p K_{eqo}}{(M_a V_1 / 4\beta_e) s^3 + (M_a K_{co} + BV_1 / 4\beta_e) s^2 + (BK_{co} + A_p^2) s + K_d K_a A_p K_{eqo}}.$$

Especificou-se um sistema para poder movimentar uma carga de até 150 Kg. A resposta do sistema quando se aplica um sinal degrau é apresentada na Figura A1.3. Os parâmetros encontrados para o sistema são descritos na Tabela A1.1.



Figura A1.3 - Deslocamento da haste para uma entrada degrau.

Tubera fill functios para o sistema ciento manauneo.	Tabela A1.1 -	Parâmetros	para o sistema	eletro-hidráulico.
--	---------------	------------	----------------	--------------------

A <sub>P</sub>	10.10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>
P <sub>s</sub>	200 .10 <sup>5</sup> Pa
Ma	150 Kg
βe	7.10 <sup>8</sup> Pa
Т	40 °C
B	1200 N.s/m
Kco	3,3.10 <sup>-12</sup> (m <sup>3</sup> /s)/Pa
V <sub>t</sub>	7,9.10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>
Kego	2.10 <sup>-5</sup> (m <sup>3</sup> /s)/V
K <sub>d</sub>	10 v/ 0,25 m= 40V/m
Ka	30

## APÊNDICE 2

## Tabela de parâmetros para simulação

AP	$10.10^{-4} \text{ M}^2$
Ma	150 Kg
βe	7.10 <sup>8</sup> Pa
B	1200 N.s/m
Kco	3,3.10 <sup>-12</sup> (m <sup>3</sup> /s)/Pa
Vt	7,9 .10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>
Keqo	2.10 <sup>-5</sup> (m <sup>3</sup> /s)/V
Kd	10 v/ 0,25 m= 40V/m
Ka	30
Kc	0.9
Gf	0.035
k	8,7788.10-5
AT	5250 .10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup>
nf	6
ρ	7800 kg/m <sup>3</sup>
g	$10 \text{ m/s}^2$
Af	$0,1963 .10^4 m^2$

## **APÉNDICE 3**

%-..... -----% % % Solucao das LMIS % Arquivo: lmitsk.m % % Autor: josemar dos santos % % % Data: 2000/2001 %-----..... ---% clear all clc disp(' ='); disp(' Rotina para obtencao de ganhos para os controladores ); disp(' '); disp(' Escolha uma das opcocs para gerar os ganhos:'); disp(' '); disp(' 1) Utilizando Linearizacao por Serie de Taylor'); disp(' 2) Utilizando Linearizacao Teixeira & Zak (1999)'); ='); disp(' disp(' '); disp(' '); opcao=input('Digite sua opcao : '); format long if opcao = 10.0000010000000 A1=1.0c+006 \*[ 0 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -5.67088607594937 -0.23722261603376 -0.00012496202532 0

# 0

#### B1=[0; 0; 1.0e+005\*1.41772151898734; 0]; C1=[0 0 0 1]; % x0=(0.07, 0)

0.000006666666667

A2=1.0e+006 *[ 0	0.0000010000000	0	0
0	0	0.0000010000000	) 0
-5.67088607594937	-0.23722261603376	-0.00012496202532	0
0.000006666666667	0	0	-0.00000017735922];
B2=B1; C2=C1;			
A3=1.0c+006 *[ 0	0.00000100000000	0	0
0	0	0.00000100000000	0
-5.67088607594937	-0.23722261603376	-0.00012496202532	0
0.000006666666667	0	0	-0.00000016721587];

0

B3=B1; C3=C1;

-0.00000018960498];

elseif opcao = 20.00000100000000 0 A1=1.0e+006 \*[ 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -0.23722261603376 -0.00012496202532 0 -5.67088607594937 -0.00000037859847]; 0.00000666656467 0 0 B1=[0; 0; 1.0e+005\*1.41772151898734; 0]; % x0=(0.07, 0) 0.00000100000000 0 0 A2=1.0c+006 \*[0 0.00000100000000 0 0 0 -0.00012496202532 -5.67088607594937 -0.23722261603376 0 -0.00000035421774]; 0.00000666655071 0 0 B2=B1; % x0=0.08 A3=1.0c+006 \*[ 0 0.00000100000000 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -0.00012496202532 0 -5.67088607594937 -0.23722261603376 0.00000666653689 0 0 -0.00000033401200]; B3=B1; %x0=0.09 end % Obtendo as LMIS setImis([]) X=lmivar(1,[4 1]) % variável X - matriz simétrica cheia de ordem 2 P12=Imivar(1,[4 1]) % variável P12 - matriz simétrica cheia de ordem 2 % variável P13 - matriz simétrica cheia de ordem 2 P13=Imivar(1,[4 1]) % variável P23 - matriz simétrica cheia de ordem 2 P23=lmivar(1,[4 1]) M1=Imivar(2,[14]) % variável M1 - matriz retangular de ordem 1X2 M2=Imivar(2,[1 4]) % variável M2 - matriz retangular de ordem 1X2 % variável M3 - matriz retangular de ordem 1X2 M3=lmivar(2,[1 4]) % 1a. LMI (Lado maior da desiguladade) lmiterm([-1 1 1 X],1,1) %X > 0% 2a. LMI (Lado maior da desiguladade) Imiterm([-2 1 1 P12],1,1) % P12 >= 0% 3a. LMI (Lado maior da desiguladade) lmiterm([-3 1 1 P13],1,1) % P13 >= 0 % 4a. LMI (Lado maior da desiguladade) lmiterm([-4 1 1 P23],1,1) % P23 >= 0 gama = 10; g = 2\*gama;% Restrição no estado do sistema % 5a. LMI (Lado menor da desiguladade) % C11 C12 C13 C23| < 0 % | C12 C22 % | C13 C23 C33 % C11 = lmiterm([5 1 1 X],A1,1,'s') % A1\*X + X\*A1' Imiterm([5 1 1 M1],B1,-1,'s') % -B1\*M1 - M1'\*B1' lmiterm([5 1 1 X],g,1) % 2\*gama\*X % C22 = % A2\*X + X\*A2' Imiterm([5 2 2 X],A2,1,'s') Imiterm([5 2 2 M2], B2,-1,'s') % -B2\*M2 - M2'\*B2' Imiterm([5 2 2 X],g,1) % 2\*gama\*X

% C33 =Imiterm([5 3 3 X],A3,1,'s') % A3\*X + X\*A3' % -B3\*M3 - M3'\*B3' Imiterm([5 3 3 M3],B3,-1,'s') lmiterm([5 3 3 X],g,1) % 2\*gama\*X % C12 = a1=A1/2; a2=A2/2; a3=A3/2; b1=B1/2; b2=b1; b3=b1; lmiterm([5 1 2 X],a1,1,'s') % 1/2\*(A1\*X + X\*A1') lmiterm([5 1 2 X],a2,1,'s') lmiterm([5 1 2 M2],b1,-1,'s') % 1/2\*(A2\*X + X\*A2') % 1/2\*(-B1\*M2 - M2'\*B1') lmiterm([5 1 2 M1],b2,-1,'s') % 1/2\*(-B2\*M1 - M1'\*B2') Imiterm([5 1 2 X],g,1) % 2\*gama\*X % P12 lmiterm([5 1 2 P12],1,1) % C13 =lmiterm([5 1 3 X],0,1) %0 % C23 = % 1/2\*(A3\*X + X\*A3') lmiterm([5 2 3 X],a3,1,'s') lmiterm([5 2 3 X],a2,1,'s' % 1/2\*(A2\*X + X\*A2') Imiterm([5 2 3 M3],b2,-1,'s') % 1/2\*(-B2\*M3 - M3'\*B2') % 1/2\*(-B3\*M2 - M2'\*B3') Imiterm([5 2 3 M2],b3,-1,'s') Imiterm([5 2 3 X],g,1) % 2\*gama\*X Imiterm([5 2 3 P23],1,1) % P23 x1=[0; 0; 0; 0.06]; % Condições iniciais do 10. modelo linear lmiterm([-6 1 1 0],1) %1 lmiterm([-6 2 1 0],x1) % x1 lmiterm([-6 2 2 X],1,1) % X mi = 100; m=mi^2; % Restrição do sinal de controle lmiterm([-7 1 1 X],1,1) % X lmiterm([-7 2 1 M1],1,1) % M1 lmiterm([-7 2 2 0],m) % mi^2 % X Imiterm([-8 1 1 X],1,1) lmiterm([-8 2 1 M2],1,1) % M2 Imiterm([-8 2 2 0],m) % mi^2 lmiterm([-9 1 1 X],1,1) % X lmiterm([-9 2 1 M3],1,1) % M3 % mi^2 lmiterm([-9 2 2 0],m) LMIs=getImis [tmin,xfeas]=feasp(LMIs); % Analise da Factibilidade % Obtençao das variaveis de interesse x=dec2mat(LMIs,xfeas,X) p12=dec2mat(LMIs,xfcas,P12) p13=dec2mat(LMIs,xfeas,P13) p23=dec2mat(LMIs,xfeas,P23) m1=dec2mat(LMIs,xfcas,M1) m2=dec2mat(LMIs,xfeas,M2) m3=dec2mat(LMIs,xfeas,M3) % Obtençao dos ganhos dos controladores F1=m1\*inv(x)

F1=m1\*inv(x) F2=m2\*inv(x) F3=m3\*inv(x) P=inv(x)

.....% % % % Solucao das equacoes diferenciais % % **Resultados finais** % % % % Arquivo: tsk.m % % Autor: josemar dos santos % % Data: 2000/2001 % %----clear all clc global A1 B1 C1 A2 B2 C2 A3 B3 C3 F1 F2 F3 Aalfa Balfa Calfa Falfa % Sistema Lineares disp( '); disp(' Rotina para geracao dos resultados finais ); disp(' '); disp(' Escolha uma das opcoes para gerar os resultados'); disp(' dependendo do tipo de Linearização utilizado para gerar os ganhos'); disp(' ); disp( 1) Utilizando Linearizacao por Serie de Taylor'); 2) Utilizando Linearizacao Teixeira & Zak (1999)'); disp(' disp( -); disp(' '); disp(' '); opcao=input('Digite sua opcao : '); format long if opcao = 10.00000100000000 A1=1.0e+006 \*[ 0 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -5.67088607594937 -0.23722261603376 -0.00012496202532 0 0.000006666666667 0 0.00000016721587]; 0 B1=[0; 0; 1.0c+005\*1.41772151898734; 0]; C1=[0 0 0 1]; % A2=1.0e+006 \*[ 0 0.00000100000000 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -5.67088607594937 -0.23722261603376 -0.00012496202532 0 0.00000016721587]; 0.000006666666667 0 0 B2=B1; C2=C1; A3=1.0e+006 \*[ 0 0.00000100000000 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -5.67088607594937 -0.23722261603376 -0.00012496202532 0 0.00000666666667 0 0 0.00000016721587]; B3=B1; C3=C1; % Ganhos dos controladores obtidos via LMIs F1 =[-39.23118152791039 -1.63088643088031 0.00003834519788 0.71926936311320]; F2 =[-39.07973618735969 -1.62100304505265 0.00027920298669 0.84269411154401]; F3 =[-38.78395637757785 -1.60751716755027 0.00042404707700 1.14649427197219]; elseif opcao = 2A1=1.0e+006 \*[ 0 0.00000100000000 0 0 0.00000100000000 0 0 0 -5.67088607594937 -0.23722261603376 -0.00012496202532 0 0.00000666656467 0 0 -0.00000037859847]; B1=[0; 0; 1.0e+005\*1.41772151898734; 0]; % x0=(0.07, 0)

A2=1.0c+006 *[ 0	0.00000100000000	0	0
0	0	0.00000100000000	0
-5.67088607594937	-0.23722261603376	-0.00012496202532	0
0.00000666655071	0	0	-0.00000035421774];

B2=B1; % x0=0.08

A3=1.0e+006 *[ 0	0.00000100000000	0	0
0	0	0.0000010000000	0
-5.67088607594937	-0.23722261603376	-0.00012496202532	0
0.00000666653689	0	0	-0.00000033401200];

B3=B1; %x0=0.09

% Ganhos dos controladores obtidos via LMIs utilizando linearização Teixeira & Zak (1999)

% Inicializacao de variáveis Aalfa = zeros(4); Balfa = zeros(4,1); Calfa = zeros(1,4); Falfa = zeros(1,4);

% Auto valores dos sistema lineares locais em malha fechada eig(A1-B1\*F1); cig(A2-B2\*F2); eig(A3-B3\*F3);

% Simulaçao do sistema fuzzy global tempo = [0 3];

% Intervalo de tempo

% Variaveis da planta

k=5.2673e-004; Gf=0.035; At=0.00525; Ap=0.001; Ma=150; Bc=7\*10^8; Kco=3.3\*10^-12; Keqo=2\*10^-5; Kd=40; BB=1200; Ka=30; Vt=7.9\*10^-5;

a=Ma\*Vt/(4\*Be); b=Ma\*Kco+BB\*Vt/(4\*Be); c=BB\*Kco+Ap^2; d=Ka\*Ap\*Keqo; d2=Kd\*Keqo\*Ka\*Ap;

x0=[0 0 0 0.06]'; [t2,x]=odc23('planta',tempo,x0); x4=x(:,4); % Condições iniciais

for i = 1:length(x)

```
%funcoes de pertinencia
  mu1=trapmf(x4(i),[0.001 0.005 0.07 0.08]);
  mu3=trapmf(x4(i),[0.08 0.09 0.2 0.5]);
  mu2=trimf(x4(i),[0.07 0.08 0.09]);
  % Termos de Ponderação das matrizes do sistema fuzzy
  alfa1 = mu1/(mu1+mu2+mu3);
  alfa2 = mu2/(mu1+mu2+mu3);
  alfa3 = mu3/(mu1+mu2+mu3);
  % Lei de controle global
  Falfa = alfa1*F1 + alfa2*F2 + alfa3*F3;
  % Saida do sistema
  xref1=(k/Gf)*sqrt(0.08);
  xref2=0;
  xref3=0;
  xref4=0.08;
  xref=[xref1;xref2;xref3;xref4];
  ubarra=(d2/d)*xref1;
  v(i)=-Falfa*(x(i,:)'- xref) + ubarra; % Sinal de controle
end
disp(' ');
disp(' ');
disp('Fim dos Calculos ...')
disp(' ');
disp(' ');
disp(
disp('
                    Plotando os resultados
                                                  );
disp(' ');
disp('
            Escolha uma das opcoes para plotar o grafico desejado ');
disp(' ');
disp(' ');
disp('
           1) Nivel de Aco no Tanque Submerso');
disp('
          2) Abertura da Valvula Tampao');
disp('
          3) Sinal de Controle');
disp(' ');
disp('=
```

disp(' ');

disp(' ');

opcaograf=input('Digite sua opcao : ');

if opcaograf = 1

plot(t2,x(:,4),'-b'); %plota o nivel de aco no tanque submerso

elseif opcaograf = 2

plot(t2,x(:,1),'-k'); %plota a abertura da valvula tampao

else opcaograf = 3

plot(t2,v,'-k'); %plota o sinal de controle

):

=');

%		%
%	Dados da Planta da Real e	%
%	Termos de ponderacao	%
%	-	%
% Arquivo: planta.m		%
% Autor: josemar dos santos		%
% Data: 2000/2001		%
%		%

function xdot=planta(t,x);

global F1 F2 F3 Falfa

%funcoes de pertinencia mu1=trapmf(x(4),[0.001 0.005 0.07 0.08]); mu3=trapmf(x(4),[0.08 0.09 0.2 0.5]); mu2=trimf(x(4),[0.07 0.08 0.09]);

% Termos de Ponderação das matrizes do sistema fuzzy alfa1 = mu1/(mu1+mu2+mu3); alfa2 = mu2/(mu1+mu2+mu3); alfa3 = mu3/(mu1+mu2+mu3);

% Lei de controle global Falfa = alfa1\*F1 + alfa2\*F2 + alfa3\*F3;

% Variaveis da planta k=5.2673e-004; Gf=0.035; At=0.00525; Ap=0.001; Ma=150; Be=7\*10^8; Kco=3.3\*10^-12; Kcq0=2\*10^-5; Kd=40; BB=1200; Ka=30; Vt=7.9\*10^-5;

a=Ma\*Vt/(4\*Be); b=Ma\*Kco+BB\*Vt/(4\*Be); c=BB\*Kco+Ap^2; d=Ka\*Ap\*Kcqo; d2=Kd\*Kcqo\*Ka\*Ap;

% Sistema real xref1=(k/Gf)\*sqrt(0.08); xref2=0; xref3=0; xref4=0.08; xref=[xref1;xref2;xref3;xref4]; ubarra=(d2/d)\*xref1; xdot=[(x(2)) (x(3)) -(b/a)\*(x(3))-(c/a)\*(x(2))-(d2/a)\*(x(1)) (1/At)\*(Gf\*(x(1))-k\*sqrt(x(4)))]-[0;0;d/a;0]\*(Falfa\*(x-xref)-ubarra);