



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CESAR FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE
CONTROLE FUZZY, PI E ADAPTATIVO APLICADO AO
PROCESSO DE FABRICACAO DE PAPEL RECICLADO
UTILIZANDO A FERRAMENTA DELTA TUNE**

Londrina
2009

CESAR FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE
CONTROLE FUZZY, PI E ADAPTATIVO APLICADO AO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL RECICLADO
UTILIZANDO A FERRAMENTA DELTA TUNE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica em Engenharia da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora. Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes

Londrina
2009

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F383e	Ferreira, Cesar. Estudo comparativo entre as técnicas de controle fuzzy,PI e adaptativo aplicado ao processo de fabricação de papel reciclado utilizando a ferramenta delta tune/ Cesar Ferreira. – Londrina, 2009. 89 f.: il. Orientador: Silvia Galvão de Souza Cervantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2009. Inclui bibliografia 1. Engenharia elétrica – Controle Pi – Automação industrial – Teses. 2. Controle fuzzy e adaptativo – Máquinas para fabricação de papel reciclado – Teses. 3. Máquinas para fabricação de papel reciclável – Teses. 4. Leitura – Teses. I. Cervantes, Silvia Galvão de Souza. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título. CDU 621.3:676.05
-------	---

CESAR FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE CONTROLE
FUZZY, PI E ADAPTATIVO APLICADO AO PROCESSO DE
FABRICACAO DE PAPEL RECICLADO UTILIZANDO A
FERRAMENTA DELTA TUNE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica em Engenharia da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora. Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dr. Alessandro Goedel
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR

Dr. Leonimer Flavio Melo
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dr. Ernesto Fernando Ferreyra Ramirez
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 18 março de 2009.

As pessoas marcam a nossa vida para sempre, porque ajudam na formação, nos apresentam projetos, sonhos e nos desafiam a construí-los. Dedico este trabalho a meus pais, pois desde o nascimento me prepararam para enfrentar a vida com sabedoria.

Agradecimentos

Aos meus familiares e a minha esposa Michele, que me deram o apoio decisivo para continuar o trabalho.

A minha orientadora Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes pela paciência, compreensão, dedicação e apoio.

Aos membros da banca examinadora pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

A Sonoco do Brasil Ltda e aos colaboradores, pelo apoio e orientação para a elaboração deste trabalho.

Por fim, a todos aqueles que não foram citados, mas que contribuíram, de alguma maneira, para o sucesso na concretização deste trabalho.

Resumo da dissertação de mestrado apresentada a UEL como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

FERREIRA, Cesar. **Estudo comparativo entre as técnicas de controle Fuzzy, PI e adaptativo aplicado ao processo de fabricação de papel reciclado utilizando a ferramenta delta Tune**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2009.

RESUMO

Este trabalho descreve um estudo comparativo entre as técnicas de controle *fuzzy* e adaptativo aplicados ao controle convencional PI. Foram estudadas diferentes etapas do processo de fabricação de papel reciclado. Os estudos objetivam atingir a máxima eficiência de cada um dos tipos de controlador, sendo realizadas simulações em malha fechada, análises de casos, monitoramento e cálculos para encontrar a nova sintonia dos controladores. Foram desenvolvidos algoritmos em *matlab* para o controle *fuzzy* e adaptativo e as simulações comparadas com os obtidos no processo fabril. Assim, foi determinado o melhor tipo de técnica de controle para cada aplicação estudada, melhorando o processo e diminuindo-se os pontos críticos com o objetivo de otimizar a produção de papel reciclado.

Palavras-chave: Controle PI. Lógica *fuzzy*. Controle adaptativo. Automação industrial.

FERREIRA, Cesar. **Comparative study among the techniques of fuzzy control, adaptive and PI applied to the manufacturing process of recycled paper using the tool delta Tune.** 2009. 89 p. Dissertation (Master's Degree in Electrical Engineering) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2009.

ABSTRACT

This work shows a comparative study among fuzzy, adaptive and conventional PI control during recycled paper manufacturing process. Studies were conducted to reach the maximum efficiency for each type of controllers. The controller's transfer function parameters were evaluated through data obtained from case-studies of a real process. Through this study the best technique of control for application was determined, improving the process, reducing the critical points, in order to optimize the manufacturing process.

Key words: PI controller. *Fuzzy* Logic. Adaptive Controller. Industrial automation.

Lista de Figuras

Figura 2.1	– Diagrama de blocos do sistema.....	19
Figura 2.2	– Resposta de um sistema sob controle on-off.....	20
Figura 2.3	– Resposta de um sistema sob controle proporcional	20
Figura 2.4	– Aplicação da ação integral e proporcional.....	20
Figura 2.5	– Resposta ao salto unitário na entrada.....	23
Figura 2.6	– Diagrama de bloco para controle on-off	24
Figura 2.7	– Forma de onda em $u(t)$ para controle on-off.....	24
Figura 2.8	– Forma de onda em $y(t)$ para controle on-off.....	25
Figura 2.9	– Diagrama de blocos de um sistema em lógica fuzzy	27
Figura 2.10	– Diagrama esquemático do controle FLC	29
Figura 2.11	– Função de associação error	30
Figura 2.12	– Função de associação delta error.....	30
Figura 2.13	– Função de associação output.....	30
Figura 2.14	– Relacionamento não-linear do bloco FLC	31
Figura 2.15	– Ação derivativa no bloco FLC	31
Figura 2.16	– Diagrama de controle adaptativo	34
Figura 2.17	– Controle Adaptativo por Escalonamento de Ganhos	34
Figura 2.18	– Controle Adaptativo Self-Tuning.....	35
Figura 2.19	– Sistema Adaptativo por Modelo de Referência	36
Figura 3.1	– Diagrama de blocos do processo de reciclagem de papel.....	39
Figura 3.2	– Exemplo de degrau para calculo da FTS.....	41
Figura 3.3	– Diagrama de bloco com a FT do processo separada do CT.....	41
Figura 3.4	– Diagrama de bloco do sistema em malha fechada	42
Figura 3.5	– Delta Tune monitorando exemplo sob controle PI	43
Figura 3.6	– Delta Tune simulando exemplo sob controle PI	44
Figura 3.7	– Ajuste fino da sintonia PI no Delta Tune	45
Figura 3.8	– Sintonia pelo método PID	45
Figura 3.9	– Diagrama de blocos do controle adaptativo	46
Figura 3.10	– Característica do K_p em função do erro.....	46
Figura 3.11	– Característica do T_i em função do erro	47
Figura 3.12	– Característica do k_p em função da consistência.....	49

Figura 3.13	– Característica do T_i em função da consistência.....	49
Figura 3.14	– Delta Tune simulando exemplo sob controle fuzzy.....	50
Figura 3.15	– Área de simulação do Delta Tune sob controle fuzzy.....	51
Figura 3.16	– Ajuste fino da sintonia fuzzy no Delta Tune.....	52
Figura 4.1	– Diagrama esquemático do processo de vazão.....	54
Figura 4.2	– Degrau na malha FIC-06.....	56
Figura 4.3	– MatLab simulando a malha FIC-06 sob controle PI.....	57
Figura 4.4	– Delta Tune simulando a malha FIC-06 sob controle PI.....	58
Figura 4.5	– Ajuste fino da sintonia PI no Delta Tune.....	59
Figura 4.6	– Sintonia pelo método PID.....	59
Figura 4.7	– Característica do K_p em função do erro.....	60
Figura 4.8	– Característica do T_i em função do erro.....	61
Figura 4.9	– Sintonia manual para o controle adaptativo.....	61
Figura 4.10	– Simulação Fuzzy para consistência de 5%.....	62
Figura 4.11	– Simulação Fuzzy para consistência de 3%.....	62
Figura 4.12	– Característica do K_p em função da consistência.....	63
Figura 4.13	– Característica do T_i em função da consistência.....	63
Figura 4.14	– Delta Tune simulando a malha FIC-06 sob controle fuzzy.....	64
Figura 4.15	– Ajuste fino da sintonia fuzzy no Delta Tune.....	65
Figura 4.16	– Comparação da sintonia adaptativa, PI e fuzzy.....	66
Figura 4.17	– Atuação do controle PI para consistência de 5%.....	67
Figura 4.18	– Atuação do controle PI para consistência de 3%.....	68
Figura 4.19	– Atuação do controle fuzzy para consistência de 5%.....	68
Figura 4.20	– Atuação do controle fuzzy para consistência de 3%.....	69
Figura 4.21	– Simulação do controle PI para consistência de 3%.....	69
Figura 4.22	– Simulação do controle fuzzy para consistência de 3%.....	70
Figura 4.23	– Diagrama esquemático do processo de nível.....	70
Figura 4.24	– Ajuste fino da sintonia PI no Delta Tune.....	71
Figura 4.25	– Característica do K_p em função da diferença da PV ao SP.....	72
Figura 4.26	– Característica do T_i em função da diferença da PV ao SP.....	73
Figura 4.27	– Sintonia manual para o controle adaptativo.....	73
Figura 4.28	– Ajuste fino da sintonia fuzzy no Delta Tune.....	74
Figura 4.29	– Comparação da sintonia adaptativa, PI e fuzzy.....	75
Figura 4.30	– Diagrama esquemático do processo de consistência.....	77

Figura 4.31 – Ajuste fino da sintonia PI no Delta Tune.....	78
Figura 4.32 – Ajuste fino da sintonia fuzzy no Delta Tune.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	– Tabela guia para efetuar o ajuste manual	22
Tabela 2.2	– Ajuste pré-determinado do método da resposta ao salto	23
Tabela 2.3	– Tabela de ajuste para o método do período crítico.....	25
Tabela 4.1	– Comparações entre controladores.....	53
Tabela 4.2	– Sintonia Manual do Controle Adaptativo.....	60
Tabela 4.3	– Sintonia do Controle Fuzzy	63
Tabela 4.4	– Comparação entre fuzzy, PI e PID para controle de vazão	67
Tabela 4.5	– Sintonia Manual do Controle Adaptativo.....	72
Tabela 4.6	– Sintonia Automática do Controle Adaptativo	74
Tabela 4.7	– Comparação entre PI, adaptativo e fuzzy para controle de nível	75
Tabela 4.8	– Comparação entre PI, adaptativo e fuzzy para controle de nível on- line	76
Tabela 4.9	– Sintonia do Controle Adaptativo	78
Tabela 4.10	– Comparação entre PI, adaptativo e fuzzy para controle de consistência.....	79
Tabela 4.11	– Comparação entre PI, adaptativo e fuzzy para controle de consistência on-line	79
Tabela 5.1	– Produtividade.....	84

Simbologia

A	ganho integral equivalente.
CO	Controller Output.
CT	controlador.
d	máximo valor da taxa de variação da saída.
E	erro.
FLC	Fuzzy Logic Control.
FT	Função Transferência.
FTNS	Nova Função Transferência do Sistema.
FTS	Função Transferência do Sistema.
FTP	Função Transferência do Processo.
IAE	Integral Absolute Error.
ISE	Integral Square Error.
K_p	ganho proporcional.
K_u	ganho crítico.
L	atraso aparente.
P	Proporcional.
PI	Proporcional Integral.
PID	Proporcional Integral Derivativo.
PV	Process Value.
SP	Set Point.
STR	Self-Tuning Regulator.
T_d	tempo derivativo.
T_i	tempo integral.
t_p	tempo de pico.
T_u	período crítico.
TA-01	Tanque de Água 01.
TM-01	Tanque de Massa 01.
w_n	frequência natural.
ζ	coeficiente de amortecimento.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Proposta do trabalho	15
1.2	Organização	15
2	FUNDAMENTOS DE CONTROLE	17
2.1	Introdução	17
2.1.1	Conceitos básicos	17
2.1.2	Equipamentos convencionais de controle	18
2.2	Controle PID	19
2.2.1	Conceitos de controle PID	19
2.2.2	Métodos de ajuste dos parâmetros PID	21
2.3	Controle Fuzzy	26
2.3.1	Fundamentos de Lógica Fuzzy	26
2.3.2	Lógica Fuzzy no Delta Tune	28
2.3.3	Aplicações de Lógica Fuzzy	32
2.4	Controle Adaptativo	33
2.4.1	Controle Adaptativo por Escalonamento do Ganho	34
2.4.2	Sistema Adaptativo por Self-Tuning	35
2.4.3	Sistema Adaptativo por Modelo de Referência	35
2.4.4	Modelo de Erro	36
2.4.5	Mecanismo de Adaptação	36
2.4.6	Aplicações de Controle Adaptativo	37
2.5	Conclusão	37
3	METODOLOGIA	38
3.1	Introdução	38
3.2	Descrição do Processo	38
3.3	Sintonia do Controle PI	40
3.3.1	Sintonia Manual	40
3.3.2	Sintonia Automática	43
3.4	Sintonia do controle Adaptativo	46
3.4.1	Sintonia Manual	46
3.4.2	Sintonia Automática	47

3.5 Sintonia do Controle em Lógica Fuzzy	48
3.5.1 Sintonia Manual.....	48
3.5.2 Sintonia Automática.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1 Introdução	53
4.2 Controle de Vazão.....	54
4.2.1 Controle de vazão através do algoritmo PI.....	55
4.2.2 Controle de vazão através do algoritmo Adaptativo.....	60
4.2.3 Controle de vazão através da Lógica Fuzzy.....	61
4.2.4 Comparação entre as técnicas PI, adaptativo e fuzzy	66
4.3 Controle de Nível.....	70
4.3.1 Controle de nível através do algoritmo PI	71
4.3.2 Controle de nível através do algoritmo Adaptativo	71
4.3.3 Controle de nível através da Lógica Fuzzy	74
4.3.4 Comparação entre as técnicas PI, Adaptativo e fuzzy	75
4.4 Controle de Consistência.....	76
4.4.1 Controle de consistência através do algoritmo PI.....	77
4.4.2 Controle de consistência através do algoritmo Adaptativo	78
4.4.3 Controle de consistência através da Lógica Fuzzy	78
4.4.4 Comparação entre as técnicas PI, adaptativo e fuzzy	78
5 CONCLUSÕES	81
5.1 Análise de resultados	81
5.2 Conclusões gerais	82
6 PUBLICAÇÕES REALIZADAS	83
BIBLIOGRAFIA	84
APÊNDICE A – Algoritmo PI.....	86
APÊNDICE B – Algoritmo Fuzzy.....	87
APÊNDICE C – Algoritmo Adaptativo.....	88

INTRODUÇÃO

A aplicação de melhorias contínuas no processo de produção tem tornado as empresas cada vez mais competitivas no mercado. A busca de soluções para os problemas existentes em cada fase do processo de produção, seja no mercado, seja por desenvolvimento tecnológico de sistemas internos, tem se tornado mais acessível e crescente, (FENG et al., 2002).

A maioria dos processos de controle industrial hoje no mundo opera com controladores proporcional-integral-derivativo (*PID*), (SILVA; DATTA; BHATTACHARYYA, 2002). Isto se deve muitas vezes aos fornecedores de equipamentos que disponibilizam apenas esta opção aos operadores. Assim, processos que possuem não-linearidades, atrasos de transportes e/ou parâmetros variantes no tempo são geralmente controlados de forma insatisfatória pelos controladores *PID* clássicos, (FIGUEIREDO; JOTA, 2004). Controladores auto-sintonizáveis e aplicação de lógica *fuzzy* ao controlador *PID* têm apresentado resultados melhores que os até então obtidos com os controladores *PID* clássicos, (FENG et al., 2002), (FERNANDES et al., 2005).

Este trabalho foi desenvolvido sobre uma proposta à empresa Sonoco do Brasil, unidade de Londrina, para correção de variações indesejáveis em algumas etapas do processo de fabricação de papel, aplicando-se técnicas de lógica *fuzzy* e controle adaptativo ao controlador *PI* e *PID*. O processo tem como matéria-prima papel reciclável e a principal automação é voltada à diluição e ao tratamento do papel.

O estudo comparativo entre as técnicas de controle trabalha com três processos sendo eles linear e não-linear:

- Controle de vazão de massa de papel não-linear;
- Controle de nível de água linear;
- Controle de consistência de massa de papel linear.

Este estudo visa demonstrar a melhor técnica de controle para cada processo. Com a aplicação da melhor técnica de controle em processo real propõe-se alcançar os seguintes objetivos:

- Minimização das perturbações que agem sobre o processo e seu efeito sobre a variável controlada;
- Redução nas variações das variáveis de controle (vazão, nível ou consistência da massa de papel);
- Redução no tempo em que as variáveis de controle levam para entrar em regime permanente;
- Diminuição dos pontos críticos do processo.

Através destas melhorias pretende-se demonstrar resultados práticos alcançados como redução no tempo de inicialização do processo de fabricação de papel e tempo de retorno a produção em função de problemas no processo, como também aumento de produção e produtividade.

1.1 Proposta do trabalho

Aproveitar as vantagens das novas tecnologias em controle de processo significa escolher uma solução que atenda às necessidades atuais e antecipe as exigências do futuro. Devido ao grande avanço tecnológico, existem outras formas para controle de processo além do controle tradicional *PI*.

Pretende-se comparar técnicas de controle avançado como *Fuzzy* e Adaptativo ao *PI* e *PID* para diversas aplicações lineares e não-lineares em controle de processo industrial.

Propõe-se projetar um sistema controlado por *PI*, *PID*, *Fuzzy* ou Adaptativo, que englobe as variáveis de entrada e atue na saída de forma a minimizar as variações do processo. Para isso será necessário configurar três módulos de controle para cada aplicação.

Serão feitas simulações em a malha fechada, análises de casos, monitoramento, cálculos do novo controlador no *software Delta Tune*[®], (*software* de controle de processo da Emerson, licença comercial para Sonoco do Brasil Ltda) e também em processo real para as três técnicas de controle estudadas.

Após análise dos resultados, o objetivo é demonstrar a melhor técnica de controle para cada aplicação estudada.

1.2 Organização

Este trabalho está dividido em capítulos, distribuídos da seguinte forma:

No Capítulo 2 são descritos os fundamentos básicos de controle, detalhando o algoritmo *PI*, *Fuzzy* e Adaptativo.

No Capítulo 3 está a metodologia para cada técnica de controle, tanto em modo manual com o auxílio do *software MatLab* quanto em modo automático com o auxílio do *software Delta Tune*.

No Capítulo 4 são descritos os estudos de cada malha de controle com todas as técnicas de controle para cada aplicação, as melhorias efetuadas e suas análises.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões gerais.

FUNDAMENTOS DE CONTROLE

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta conceitos básicos de controle para a representação dos fenômenos transientes inerentes aos processos, utilizados neste trabalho.

O capítulo se limita às representações que podem ser visualizadas pelo comportamento de um sistema controlado pelas técnicas de controle *PI*, lógica *fuzzy* e controle adaptativo ao longo do tempo.

2.1.1 Conceitos básicos

Um sistema é linear se ele satisfaz o princípio da superposição. Considera-se um sistema que ao ser excitado pela entrada $u_1(t)$ produz a saída $y_1(t)$ e quando excitado por $u_2(t)$ produz $y_2(t)$. Se tal sistema satisfizer o princípio da superposição então, quando excitado por $au_1(t) + bu_2(t)$, sua saída será $ay_1(t) + by_2(t)$, sendo a e b constantes possivelmente complexas. Informalmente pode-se dizer que um sistema linear tem variáveis constantes, independente do ponto de operação, (AGUIRRE, 2007).

A consideração de invariância temporal implica que o comportamento do sistema sendo modelado não varia com o tempo. As variáveis do sistema não têm valores constantes, pelo contrário, normalmente os valores das variáveis que caracterizam este sistema variam com o tempo, sendo que tal evolução temporal é determinada por uma lei. Normalmente, refere-se a esta lei como sendo a dinâmica do sistema. Portanto, ser invariante no tempo não significa que o sistema é estático, mas certamente implica que a dinâmica que está regulando a evolução temporal é a mesma.

No estudo do comportamento dinâmico dos sistemas, podem-se provocar diversos tipos de perturbações sobre o sistema para posterior análise, (AGUIRRE, 2007):

- Perturbação em pulso;
- Perturbação em degrau;

- Perturbação em rampa;
- Perturbação senoidal.

Na modelagem de perturbações em degrau, pode-se simplificar a abordagem matemática considerando que a perturbação ocorre em $t = 0$. Com isto, além de evitar o uso da função degrau (substituída por uma simples constante), simplificam-se as condições que influenciam no processo.

A simplificação envolve, portanto, a solução de uma equação diferencial que inclui o efeito da perturbação, considerando como condição inicial a informação do estado estacionário na ausência da perturbação externa, (OGATA, 1998).

2.1.2 Equipamentos convencionais de controle

Sensores e transmissores são os elementos de medição que tem por função medir alguma propriedade do sistema e convertê-la em um sinal elétrico que possa ser utilizado para controle. Em alguns casos, o elemento sensor gera um tipo de sinal que não é diretamente compatível com o sistema de controle. Neste caso, utiliza-se um transmissor para gerar um sinal compatível a partir do sinal recebido do sensor. Em muitos casos, o próprio transmissor é também o elemento sensor.

Tipicamente, o sensor e o transmissor estão localizados perto do processo, e por isso são denominados “elementos de campo”.

Um controlador comercial apresenta as seguintes características:

- recebe um sinal de entrada com o valor da variável controlada ($PV = process\ value$);
- recebe um sinal de referência - ($SP = set\ point$);
- gera um sinal de saída para o elemento final de controle ($CO = controller\ output$);
- recebe um comando de seleção de pelo menos dois modos: Manual e Automático;

Em modo Manual, o controlador opera como um simples controle remoto. O operador informa o sinal de saída desejado, e o controlador transmite este valor para o elemento final de controle.

Em modo Automático, são aplicados os valores de PV e SP para determinar, por meio de um algoritmo, o valor do sinal de saída CO .

Um conceito importante para os algoritmos de controle mais comuns é o de erro, aplicado a controladores, o erro representa a diferença entre o SP e a PV descrito na equação 2.1:

$$e = SP - PV \quad (2.1)$$

A Figura 2.1 apresenta o diagrama de blocos do sistema com representação do erro.

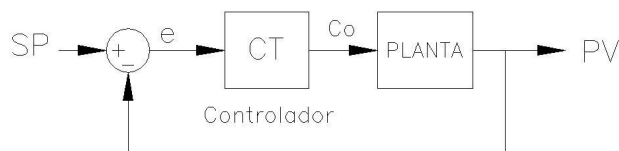


Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema

Qualitativamente, o desempenho de um controlador pode ser avaliado pela sua capacidade de manter a variável controlada próxima ao ponto desejado, mesmo em presença de perturbações externas, (SIGHIERI; NISHINARI, 1973).

Em aplicações práticas, porém, pode ser desejável mensurar o desempenho de um controlador por meio de um índice que permita buscar melhorias neste desempenho. Alguns índices sugeridos na literatura e na prática são dados a seguir conforme Ogata (1998). Em geral, consideram-se a resposta do controlador e uma perturbação em degrau.

- coeficiente de amortecimento, obtido ao comparar a resposta do controlador a de um sistema de segunda ordem; é recomendado um valor entre 0,3 e 0,5;
- máximo sobre-sinal, ou seja, o máximo desvio do ponto de operação observado logo após a perturbação;
- velocidade de resposta, definida como o tempo necessário para atingir o ponto de operação (não necessariamente se estabilizando no ponto de operação);
- taxa de decaimento, medida como a razão entre as amplitudes de duas oscilações sucessivas;
- tempo de resposta, considerado como o tempo a partir do qual as oscilações se limitam a uma certa fração (geralmente 5%) de variação em torno do ponto de operação;
- alguns índices calculados por integração de uma função do erro ao longo do tempo: ISE (*Integral Square Error*) e IAE (*Integral Absolute Error*), (OGATA, 1998).

2.2 Controle *PID*

2.2.1 Conceitos de controle *PID*

Controlador *on-off*. Este não consegue manter a variável em um ponto desejado. O comportamento da variável controlada equivale a uma oscilação próxima aos valores equivalentes aos comandos liga e desliga do controlador. A Figura 2.2 ilustra a resposta de um sistema sob controle *on-off*, mostrando que a oscilação não é necessariamente senoidal. A linha reta indica o valor da referência, observa-se que a média não equivale necessariamente ao valor desejado.

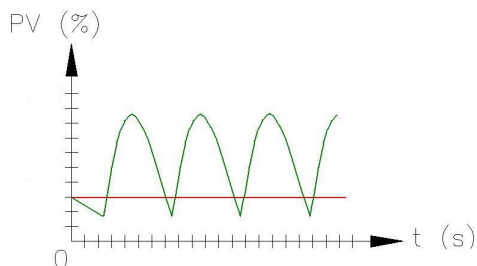


Figura 2.2 – Resposta de um sistema sob controle *on-off*

Uma característica do controle *on-off* é que o valor médio da variável controlada muda conforme a perturbação externa. Este efeito é observado em sistemas de condicionamento de ar, pois mesmo mantido o ponto desejado, a temperatura média é maior em dias quentes.

Outro controlador é o Proporcional (“P”). Uma característica deste controlador é de não zerar o desvio do ponto de operação, deixando um erro residual (*offset*). A Figura 2.3 ilustra o comportamento de uma variável controlada após atuação do controlador proporcional sob perturbação externa em degrau. A referência está indicada pela linha reta. O controle faz a variável oscilar em busca da referência e entrar em regime permanente com um erro residual.

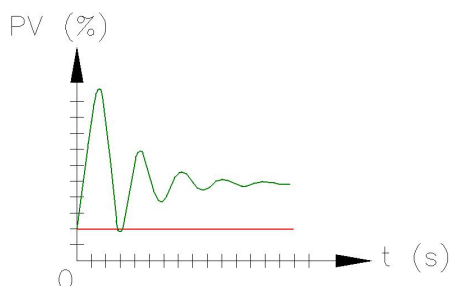


Figura 2.3 – Resposta de um sistema sob controle proporcional

No controlador Proporcional Integral (“PI”), ao ser adicionada a integral do erro, o desvio do ponto de operação não é mantido por muito tempo. Desta forma, elimina-se o erro residual.

O gráfico da Figura 2.4 ilustra a aplicação da ação integral conjuntamente com a ação proporcional. A partir deste gráfico pode-se dar uma interpretação para T_i , pois o tempo integral ou *reset-time*, corresponde ao tempo em que a parcela relativa à parte proporcional da ação de controle é duplicada.

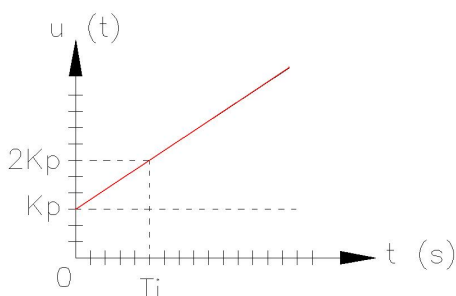


Figura 2.4 – Aplicação da ação integral e proporcional

Note-se que tem-se um zero em $\frac{-1}{T_i}$ que tende a compensar o efeito desestabilizador do pólo na origem.

Para altos valores de T_i , tem-se a predominância da ação proporcional, sendo que $T_i \rightarrow \infty$ corresponde ao controlador proporcional. Note-se que, neste caso, existe um erro em regime permanente. A medida que diminui-se T_i a ação integral começa a predominar sobre a ação proporcional e a resposta tende a se aproximar mais rapidamente da referência, ou seja, o erro em regime tende a ser anulado mais rapidamente.

No controlador Proporcional Integral Derivativo (“PID”) a ação derivativa usa a informação de processo que permite prever, em curto prazo, a tendência da variável de processo. Assim, ao observar que a variável está aumentando, a ação derivativa atuará no sentido de reduzi-la, mesmo que o erro e a integral do erro apontem em outra direção. Desta forma, a ação derivativa torna a resposta do controlador mais rápida.

O uso de ação derivativa requer cuidado, e deve ser evitada em variáveis cuja medição esteja sujeita a ruídos (como vazão em escoamento turbulento). Neste caso, o comportamento oscilante da vazão faz com que a derivada mude continuamente de sinal, com efeito negativo sobre o desempenho do controlador.

A ação derivativa deve ser evitada em situações onde o erro varie bruscamente, em forma de degrau. Um exemplo é dado por cromatógrafos de processo, que atualizam suas leituras em intervalos de alguns minutos. Nestes instantes, a derivada é infinita, um controlador *PID* abre ou fecha completamente a válvula de controle nesta situação. Outro exemplo ocorre quando o ponto de operação é alterado manualmente, especialmente em sistemas digitais. Atualmente, uma das formas de evitar este problema consiste em calcular a derivada da variável de processo em vez da derivada do erro.

Os controladores possuem parâmetros ajustáveis que permitem alterar seu comportamento de modo a obter o melhor desempenho para cada aplicação. Altos ganhos, por exemplo, fazem com que o controlador atue com mudanças rápidas na saída, enquanto baixos ganhos provocam pouca alteração na saída, caracterizando um comportamento passivo do controlador.

Um campo interessante da teoria de controle, com muita aplicação prática, é a sintonia do algoritmo *PID*. Hoje, dispõe-se de um conjunto de regras empíricas e matemáticas que permitem sistematizar a busca de melhores desempenhos através da sintonia de parâmetros, (OGATA, 1998).

2.2.2 Métodos de ajuste dos parâmetros *PID*

Vários métodos de ajuste de controladores *PID* são conhecidos e utilizados na prática de sistemas de controle. Os métodos requerem informações sobre a dinâmica do processo a ser controlado e a natureza desta informação é que os caracteriza. A fim de obter um método prático de ajuste, deve ser possível obter estas informações a partir de ensaios simples sobre o processo, ao mesmo tempo em que estas informações devem ser suficientes para possibilitar um ajuste adequado do controlador.

Logo, a quantidade adequada de informação a ser obtida do processo deve ser selecionada mantendo-se um compromisso entre a simplicidade e o desempenho do controlador.

Os modelos utilizados para o projeto nem sempre são suficientemente completos e os métodos, por se tratarem de alocação genérica, muitas vezes fornecem ajustes que podem ser melhorados. Por esta razão, é conveniente, após ter obtido um ajuste para o *PID*, efetuar manualmente um ajuste fino dos parâmetros do controlador observando o desempenho do sistema. Para tanto é preciso conhecer o efeito de cada uma das ações de controle sobre o desempenho do processo. Os princípios apresentados na Tabela 2.1 são regras que auxiliam no ajuste fino dos controladores *PID*. Esta Tabela apresenta um sumário para guiar o operador na realização do ajuste manual, (OGATA, 1998).

Tabela 2.1 – Tabela guia para efetuar o ajuste manual

Problema	Medida de ajuste
Resposta muito lenta	Aumentar a constante proporcional
Resposta excessivamente oscilatória	Aumentar tempo derivativo
Sobrepassagem excessiva	Reduzir taxa de integral
Resposta inicial rápida e em seguida muito lenta	Aumentar taxa de integral

Os métodos de *Ziegler-Nichols* foram introduzidos em 1942. São considerados clássicos e aplicados até hoje em sua forma original, ou com algumas modificações. Os dois métodos básicos de ajuste visam obter uma mesma resposta pré-especificada para o sistema em malha fechada, e diferem no que diz respeito à natureza da informação sobre a dinâmica do processo que é exigida por cada um deles, (BERTO; Sá; JR, 2004).

O método da resposta ao salto, ou método do domínio do tempo, requer o conhecimento de duas grandezas que caracterizam a resposta ao salto de um processo. Já o método do período crítico, exige o conhecimento de duas grandezas características da resposta em frequência do processo. Obtidas estas informações, basta recorrer a equações extremamente simples para calcular os ganhos do controlador. Estas equações foram determinadas de maneira empírica por meio de ensaios de processos industriais típicos. As equações originalmente propostas por Ziegler e Nichols fornecem uma resposta que foi posteriormente considerada insatisfatória. Diferentes equações foram então propostas com base nos mesmos ensaios, obtendo-se melhor desempenho.

Método da resposta ao pulso

A resposta típica de um processo industrial a um pulso unitário na sua entrada é apresentada na Figura 2.5.

Esta resposta pode ser caracterizada por dois parâmetros: o atraso aparente L e o ganho integral equivalente A . Estes parâmetros são obtidos traçando uma reta tangente à curva de resposta no seu ponto de inflexão, ou seja, o ponto em que a taxa de variação da resposta é máxima. Os parâmetros são dados então pela interseção desta reta com os eixos coordenados, conforme indicado na Figura 2.5. Um salto de amplitude diferente da unidade pode ser usado, sendo neste caso necessário normalizar o ganho integral equivalente dividindo-o pela amplitude deste salto, conforme equações 2.2 e 2.3.

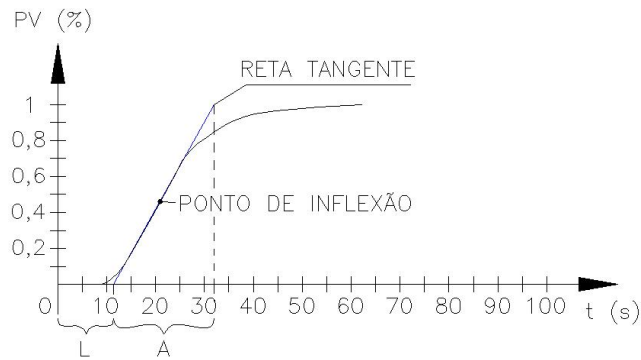


Figura 2.5 – Resposta ao salto unitário na entrada

$$L = t_d - \frac{y_d}{d} \quad (2.2)$$

$$A = dL = dt_d - y_d \quad (2.3)$$

onde d é o máximo valor da taxa de variação da saída, t_d é o instante de tempo em que este valor é observado e y_d é o valor da saída no instante.

Ziegler e Nichols propuseram as equações apresentadas na Tabela 2.2 para cálculo dos parâmetros do controlador a partir dos parâmetros (A e L):

Tabela 2.2 – Ajuste pré-determinado do método da resposta ao salto

Tipo de controlador	K	T_i	T_d
P	A/L	∞	0
PI	$0,9A/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2A/L$	$2L$	$0,5L$

Os valores apresentados na Tabela 2.2 foram determinados de maneira empírica de forma a obter uma resposta com amortecimento de $1/4$ na resposta à referência para processos industriais típicos. Enquanto a rejeição às perturbações muitas vezes apresenta um comportamento satisfatório, este amortecimento usualmente não é satisfatório na resposta à referência, causando em muitos casos uma sobrepassagem excessiva e baixa tolerância às variações na dinâmica do processo. Em função destas características, outras equações foram propostas e diversas modificações sobre o método são utilizadas.

Método do período crítico

Um sistema em malha fechada com controle proporcional, ao apresentar um aumento progressivo no ganho, tenderá à oscilação. O ganho necessário para causar esta oscilação é chamado ganho crítico do processo e o período da oscilação observado é o período crítico.

Estes parâmetros podem ser determinados pelo ensaio em malha fechada com ganho proporcional, porém este procedimento é pouco eficiente. Primeiramente, uma vez que o ganho deve aumentar de

forma gradativa, o procedimento torna-se demorado. Depois, é necessário previamente, obter alguma informação sobre a dinâmica do processo a fim de permitir o valor inicial do ganho e sua taxa de variação. Finalmente, a natureza linear da oscilação faz com que ela nunca seja sustentada, mas sempre amortecida ou instável.

Um método mais eficiente na determinação destes parâmetros é o ensaio de realimentação com relé. Tem-se o sistema em malha fechada com um relé na realimentação, como na Figura 2.6. A saída do relé oscila entre dois valores, e o valor médio é aquele necessário para fazer com que a saída seja igual à referência.

O sistema de identificação está apresentado na Figura 2.6, observa-se que o erro $e(t)$ é a diferença entre a entrada $r(t)$ e a saída $y(t)$. A Figura 2.7 apresenta a forma de onda na saída do relé $u(t)$ e a Figura 2.8 apresenta a forma de onda na saída $y(t)$. Observa-se que a saída $y(t)$ se altera em função da saída do relé $u(t)$.

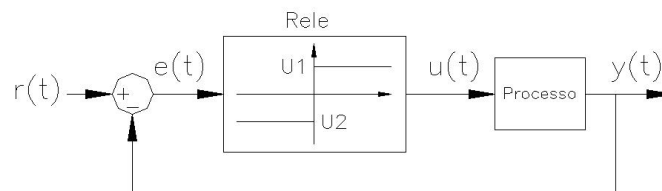


Figura 2.6 – Diagrama de bloco para controle *on-off*

O período desta oscilação é o período crítico do processo T_u . O outro parâmetro a ser determinado é o ganho crítico K_u . Pelo método da função descritiva, pode-se demonstrar que o ganho crítico é diretamente proporcional à amplitude da oscilação provocada pela realimentação com relé:

$$K_u = \frac{\pi}{d} H \quad (2.4)$$

onde H é a amplitude da oscilação observada.

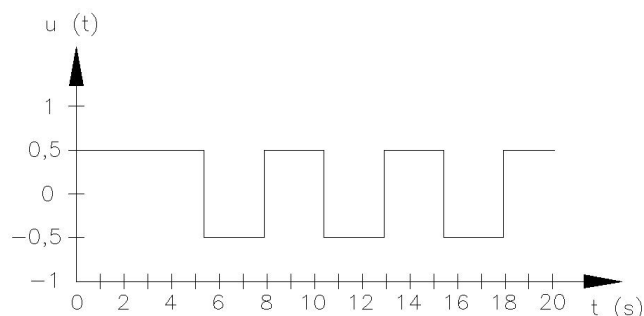


Figura 2.7 – Forma de onda em $u(t)$ para controle *on-off*

Como o processo deve ser mantido próximo do seu ponto de operação, o sistema do relé deverá somar à saída do relé o valor da tendência (*bias*) que a saída do *PID* apresentava antes do início do teste. O valor do *bias* será o valor médio da saída do *PID*. Caso este valor não seja adequado, o sistema

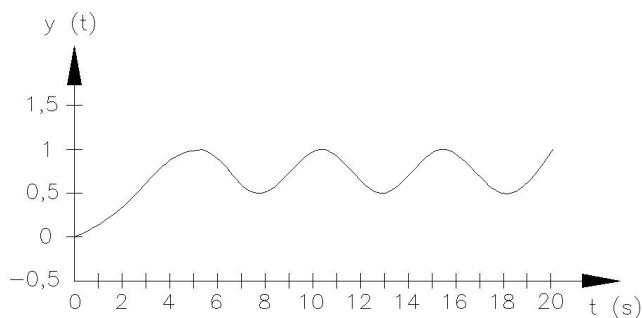


Figura 2.8 – Forma de onda em $y(t)$ para controle *on-off*

não oscilará, ou oscilará de forma assimétrica. Neste caso, o valor de *bias* deve ser recalculado. Assim, torna-se conveniente fazer com que a saída do relé varie seguindo uma rampa nos primeiros momentos do ensaio, até atingir a amplitude desejada, como medida de prevenção contra possíveis oscilações excessivamente grandes.

Obtidos o ganho e o período crítico, aplicam-se as equações propostas. A Tabela 2.3 dispõe as equações originalmente apresentadas por *Ziegler e Nichols* para o ajuste do método.

Tabela 2.3 – Tabela de ajuste para o método do período crítico.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_u$	∞	0
PI	$0,45K_u$	$T_u/1,2$	0
PID	$0,6K_u$	$0,5T_u$	$0,125T_u$

O método de ajuste do período crítico consiste portanto nos seguintes passos:

- colocar o sistema em malha fechada com controle liga-desliga, de forma a provocar uma oscilação na saída do processo;
- verificar a amplitude e a frequência da oscilação resultante;
- calcular o ganho crítico;
- consultar a Tabela 2.3.

Na prática o relé deve ser dotado de histerese, a fim de evitar chaveamento, devido ao ruído. Este método pode ser diretamente aplicado a uma classe de sistemas para os quais o método da resposta ao salto não é adequado. Este método é menos sensível à presença de ruído do que o método da resposta ao salto. No entanto, para sistemas demasiadamente simples o método fica prejudicado, pois neste caso as características da oscilação - amplitude e frequência - são univocamente determinadas pelas características do relé, independentemente das características do processo, (OGATA, 1998).

2.3 Controle *Fuzzy*

Lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, sistemas especialistas e algoritmos genéticos fazem parte de um novo paradigma conhecido por sistemas inteligentes. Estes sistemas procuram fornecer respostas que solucionam problemas de forma apropriada às situações específicas dos mesmos, mesmo sendo novas ou inesperadas.

A operação destes sistemas inspira-se, em geral, em sistemas biológicos. A capacidade criativa dos seres humanos, de raciocinar de maneira incerta ou difusa contrasta com a forma de operar de computadores e máquinas, regidos por raciocínio binário e preciso. No momento em que estas máquinas transcendessem a esta restrição, tornar-se-iam inteligentes, podendo raciocinar de forma difusa. Esta forma de raciocínio é conhecida em inglês por *fuzzy*, tendo como tradução em português nebuloso, difuso, (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

O controle *fuzzy* aplica através de algoritmos o conhecimento humano e especialista na solução de problemas com incertezas, no caso as não-linearidades e atrasos de transporte. Uma vantagem do método é que o mesmo não precisa inicialmente ser modelado matematicamente, (FENG et al., 2002).

A utilização de regras nebulosas (regras *fuzzy* e variáveis linguísticas) confere ao sistema de controle várias vantagens, incluindo: simplificação do modelo do processo; melhor tratamento das imprecisões inerentes aos sensores utilizados; facilidade na especificação das regras de controle; satisfação de múltiplos objetivos de controle; e facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos. Contudo, tanto as leituras de sensores quanto os sinais esperados pelos atuadores do sistema de controle não pertencem à linguagem desta lógica, fazendo-se necessário que conversões da lógica aritmética para a lógica *fuzzy* sejam realizadas. Assim, estes tipos de sistemas possuem elementos adicionais denominados fuzzificador e defuzzificador e estão posicionados na entrada e saída do sistema de controle, respectivamente, (FERNANDES et al., 2005).

2.3.1 Fundamentos de Lógica *Fuzzy*

Um sistema baseado em Lógica *Fuzzy* pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes:

- Fuzzificador;
- Regras, ou base de conhecimentos;
- Inferência, ou lógica de tomada de decisões;
- Defuzzificador.

A Figura 2.9 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de lógica *fuzzy*.

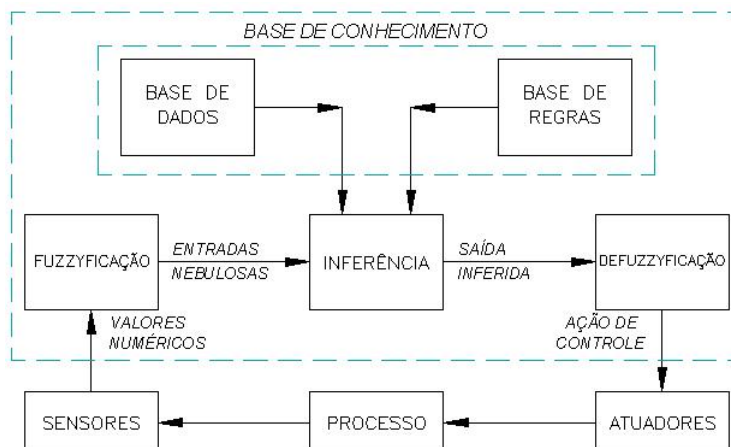


Figura 2.9 – Diagrama de blocos de um sistema em lógica *fuzzy*

O *Fuzzificador* é responsável pela identificação dos valores numéricos fornecidos pelos sensores, normalizando estes valores em um universo de discurso padronizado, formando um conjunto nebuloso (*fuzzy*) a ser inserido no bloco de inferência mostrado na Figura 2.9, (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

A *Base de Conhecimento* representa o modelo do sistema a ser controlado, consistindo numa base de dados e uma base de regras lingüísticas. A base de dados fornece definições numéricas e a base de regras caracteriza os objetivos do controlador e sua estratégia usada, geralmente fornecida por pessoas especialistas no sistema.

É importante que exista uma quantidade de regras pré-definidas para mapear as diversas combinações possíveis, garantindo que haverá uma regra específica ativa para qualquer entrada do sistema.

A *Inferência* é realizada mapeando valores lingüísticos de entrada em valores lingüísticos de saída com o uso das regras. Estas regras usam implicações difusas para simulações de decisões humanas, gerando ações de controle, chamados de conseqüentes, partindo-se de um conjunto de condições de entrada, chamada de antecedentes.

O *Defuzzificador* obtém uma única ação de controle a partir do conjunto nebuloso obtido. O procedimento consiste na identificação do domínio das variáveis de saída em um único universo de discurso e com a ação de controle nebulosa inferida, uma ação de controle não-nebulosa é tomada.

A base dos sistemas *fuzzy* é a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Estes conjuntos são uma extensão dos conjuntos convencionais, os quais permitem somente que elementos sejam verdadeiros ou falsos (lógica booleana, bivalente). Conjuntos *fuzzy* permitem que seus elementos possuam um certo grau de pertinência associado, sendo esta propriedade conhecida como multivalência. Isto permite a aproximação com o mundo real, que não é bivalente, com um vasto número de opções ao invés de somente duas. A lógica *fuzzy*, então, permite trabalhar com tais incertezas de fenômenos naturais de forma rigorosa e sistemática, (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

A determinação do grau de pertinência, para conjuntos *fuzzy* contínuos, se dá pela análise de funções de pertinência. Estas funções possibilitam o cálculo do grau de pertinência de acordo com o valor assumido pela variável. Elas representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*.

Os modelos de sistemas *fuzzy* podem ser divididos em dois tipos: os clássicos e os de interpolação. Os clássicos se caracterizam pela conclusão de cada regra especificar um termo nebuloso dentro de um conjunto fixo de termos, sendo estes termos, conjuntos nebulosos convexos representados graficamente por funções com: triângulos, trapézios e funções de sino. O sistema nebuloso por interpolação se caracteriza por apresentar uma conclusão através de uma função estritamente monotônica, usualmente diferente para cada regra, (SILVA, 2002).

A seguir dois modelos de sistema por interpolação:

Takagi-Sugeno - a função que caracteriza este modelo é baseada em uma combinação linear de entradas, tendo como parâmetros um conjunto constante;

Tsukamoto - geralmente a função é não-linear tendo como domínio os possíveis graus de compatibilidade entre cada premissa e as entradas.

Em ambos os modelos de sistema por interpolação, obtém-se para cada regra, um único valor para a variável de controle. Finalmente, uma ação de controle global é obtida, fazendo-se uma média ponderada dos valores individuais obtidos, onde cada peso é o próprio grau de compatibilidade entre a premissa da regra e as entradas, normalizado, (FERNANDES et al., 2005).

2.3.2 Lógica Fuzzy no Delta Tune

O *Delta Tune*[®] é o *software* utilizado para realizar a sintonia das malhas de controle, este *software* realiza a sintonia *on-line* nas malha de controle existente no processo de reciclagem de papel.

O bloco de controle em lógica *fuzzy* (*FLC - Fuzzy Logic Control*) fornece a potencialidade do controle *PID* com o benefício adicionado da resposta superior às variações do *Setpoint* (*SP*) e distúrbios externos da carga.

O bloco *FLC* opera usando regras *fuzzy* pré-definidas, associação de funções e parâmetros ajustáveis conhecidos como fatores de escala. Este bloco traduz os valores absolutos da malha de controle em valores *fuzzy* calculando o erro (*e*) e a faixa de variações do erro (*delta error*) selecionando o grau de associação para cada conjunto de funções pré-definidas. Aplicam-se então as regras *fuzzy* e, finalmente, retraduz-se os valores em uma ação de controle, (KNIGHT, 2004).

A Figura 2.10 apresenta o diagrama esquemático do controle em lógica *fuzzy*. Este diagrama apresenta os componentes internos do bloco *FLC*, (KNIGHT, 2004).

Na modalidade cascata (*Cas*), o *setpoint* (*SP*) é ajustado por um controlador mestre. Na modalidade remota da cascata (*RCas*), o *setpoint* é o resultado de cálculos de outras variáveis; em automático

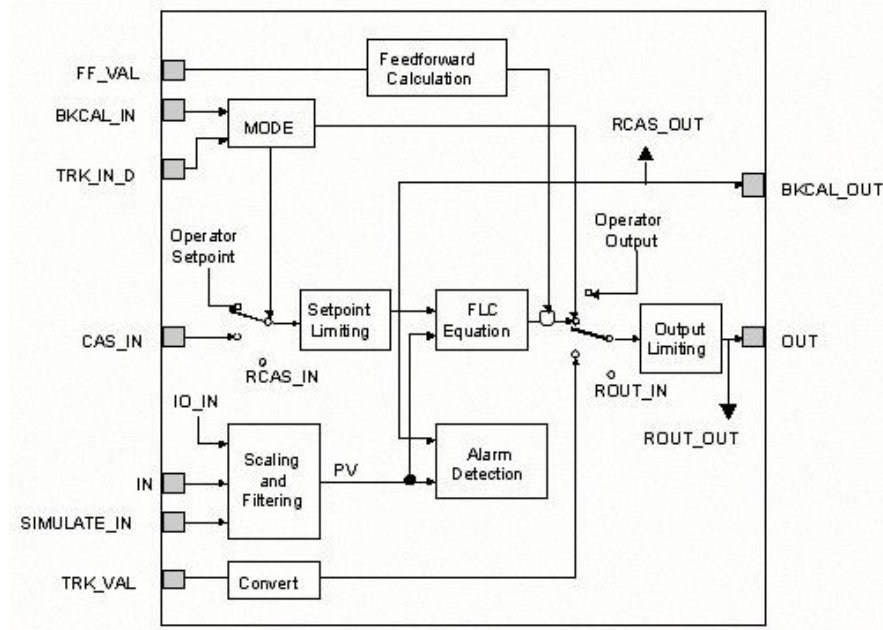


Figura 2.10 – Diagrama esquemático do controle *FLC*

(*Auto*), o *SP* é ajustado pelo operador, nestas modalidades apresentadas, a saída é calculada para manter o *setpoint*. Em manual (*Man*), a saída é ajustada pelo operador.

O bloco *FLC* pode ser conectado diretamente às variáveis do processo, bem como receber sua entrada de um outro bloco na conexão de entrada (*IN*), ou fornecer um valor de saída a um outro bloco através da conexão da saída (*OUT*).

Para conectar o controlador a um controlador mestre usa-se *BKCAL-OUT* e a um controlador escravo usa-se *BKCAL-IN* para compensar limites de variações e para fornecer transferência de dados à malha de controle fechada.

CAS-IN é o valor remoto do *SP* de um outro bloco, *FF-VAL* é o valor da entrada de controle *feedforward*, *SIMULATE-IN* é o valor simulado da variável do processo, *TRK-IN-D* seleciona o modo de controle e *OUT* é o valor do sinal de saída do bloco.

No bloco *FLC* encontram-se o fuzzificador, as regras, a inferência e o defuzzificador.

Este bloco utiliza duas funções de associações: os sinais de entrada que são: *error* e *delta error*, e o sinal de saída (*output*) que é a alteração na ação do controle. As relações entre estas três variáveis representam um controlador não-linear. A não-linearidade resulta da tradução de variáveis do processo a um jogo *fuzzy* (*fuzzificador*), à inferência da regra, e a retradução de um jogo *fuzzy* a um sinal contínuo (*defuzzificador*).

As duas funções de associações para o *error*, *delta error* e *output* são negativas e positivas. A escala de associação (S_e e S_{Δ_e}) é o valor e a variação do erro apresentados nas Figuras 2.11 e 2.12, respectivamente, determinam o grau de associação, (KNIGHT, 2004).

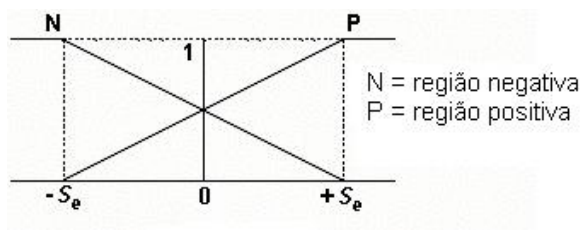


Figura 2.11 – Função de associação *error*

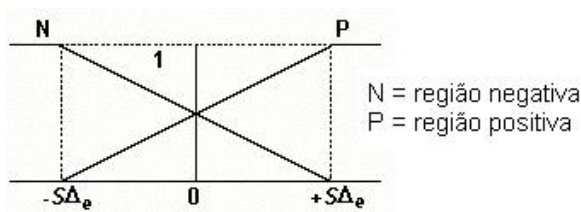


Figura 2.12 – Função de associação *delta error*

As variações da função de associação *output* representam os jogos *fuzzy* cuja sustentação é um único ponto com uma associação de função. A escala de associação ($S\Delta_u$) determina o valor da alteração na saída para um *error* e um *delta error* conforme apresentado na Figura 2.13.

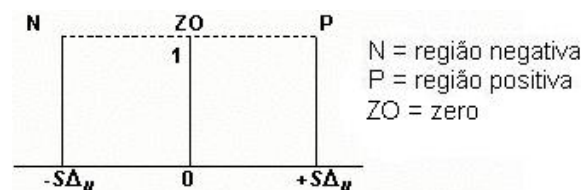


Figura 2.13 – Função de associação *output*

Existem quatro regras de lógica *fuzzy* que o bloco *FLC* usa para realizar o controle, estas estão descritas a seguir:

- Regra 1, se o *error* for N e o *delta error* for N, altera-se *output* para P.
- Regra 2, se o *error* for N e o *delta error* for P, altera-se *output* para ZO.
- Regra 3, se o *error* for P e o *delta error* for N, altera-se *output* para ZO.
- Regra 4, se o *error* for P e o *delta error* for P, altera-se *output* para N.

As duas funções de associação relacionadas com as variáveis permitem ao controle que três condições sejam realizadas na saída.

Para as regiões onde o erro absoluto é maior que o fator de escala do erro ou o *delta error* é maior que a variação no fator de escala do erro, os valores para o *error* e o *delta error* são fixados no fator de escala do erro e alteram-se em função do fator de escala do erro, respectivamente. A Figura

2.14 apresenta uma curva do exemplo *FLC* que ilustra como a mudança no ganho do controlador é contínua usando somente duas funções de associação na entrada e três funções de associação na saída, (KNIGHT, 2004).

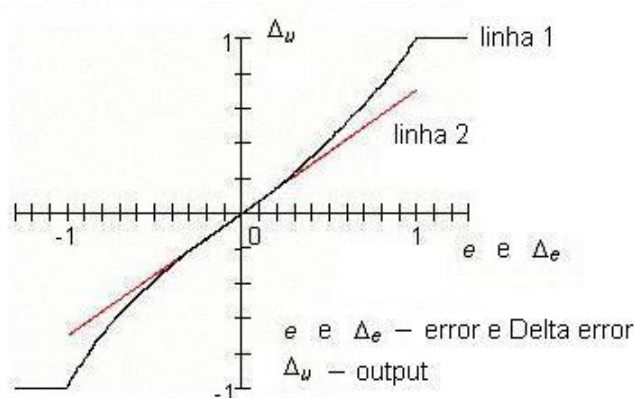


Figura 2.14 – Relacionamento não-linear do bloco *FLC*

A linha 01 apresenta o relacionamento não-linear do bloco *FLC* quando o *error* é igual ao *delta error*. A linha 02 apresenta o relacionamento linear de um controlador padrão *PI*. Observa-se também que o ganho do bloco *FLC* é similar ao ganho do controlador *PI* quando o erro e delta error forem pequenos. O ganho do bloco *FLC* aumenta gradualmente com o erro e a alteração no aumento do erro.

Para ajudar antecipar uma mudança rápida no processo com o bloco *FLC*, a ação derivativa é inserida na realimentação da malha de controle conforme apresentado na Figura 2.15.

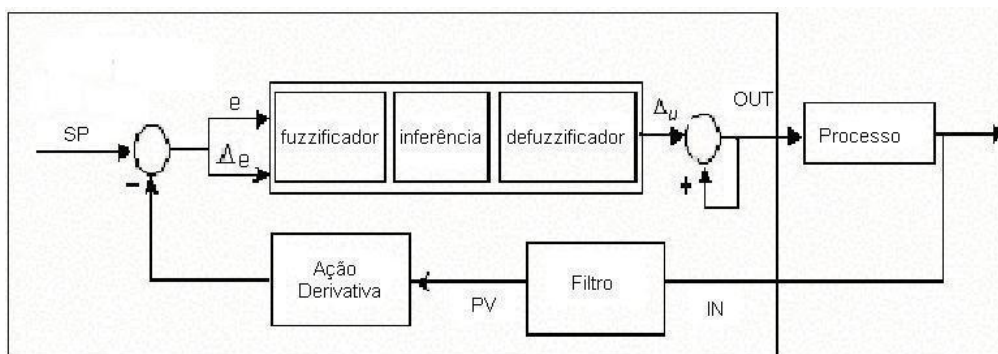


Figura 2.15 – Ação derivativa no bloco *FLC*

O *Delta Tune*[®] é o *software* usado na empresa para realizar a sintonia dos fatores de escala (S_e , $S\Delta_e$ e $S\Delta_u$). Para pequenas alterações no *error*, *setpoint* e na saída d o bloco *FLC* relacionam-se os fatores de escala com o ganho proporcional (K_p) e o tempo integral (T_i), que seriam usados em um bloco *PI*, (KNIGHT, 2004).

Seguem as equações para sintonia dos fatores de escala de forma manual.

$$S\Delta_e = \beta\Delta Y_s \quad (2.5)$$

$$S\Delta_u = 2S\Delta_e K_p \quad (2.6)$$

$$S_e = S_e0 = T_i S\Delta_e \quad (2.7)$$

onde:

$S\Delta_e$ = variações do *error*;

S_e = *error*;

$S\Delta_u$ = variações em *out*;

S_e0 = variações do *error* para um segundo de varredura.

β é uma função do processo que relaciona o tempo morto (DT), ou seja, o tempo em que a variável do processo leva para começar a se alterar após o degrau, com o período ou tempo final constante (TC) e tem valores na seguinte escala: $0,2 < \beta < 0,5$, conforme Knight (2004).

A seguir apresenta-se a equação para cálculo do *Beta*.

$$\beta = 0,2 + \frac{DT}{TC} \quad (2.8)$$

O bloco de lógica *fuzzy* fornece a taxa de varredura e recalcula o fator de escala do erro (S_e).

$$S_e = \frac{S - e0}{\Delta t} = \frac{T_i S\Delta_e}{\Delta t} \quad (2.9)$$

O bloco *FLC* é projetado para realizar a sintonia via *Delta Tune*. Entretanto, se a opção de ajuste dos fatores de escala for manual, a ação derivativa não será ajustada no bloco *FLC*, não sendo permitido o acesso manual ao termo derivativo. Isto pode afetar o desempenho do bloco significativamente, (KNIGHT, 2004).

2.3.3 Aplicações de Lógica Fuzzy

Em Guimarães e Silva(2003) é apresentada a lógica *fuzzy* aplicada ao controle de um modelo de gerador de vapor de tubo reto. Foram utilizadas para o controle *fuzzy* três relações de implicação diferente para alcançar o melhor resultado. Este trabalho relata que o controle baseado em lógica nebulosa pode ser utilizado como uma alternativa interessante aos controladores clássicos PI, uma vez que se aproximam mais da experiência humana.

O controle em lógica *fuzzy* também é aplicado para sintonia de controle PID, em Fernandes (2005) são apresentados os melhores resultados através da aplicação de lógica *fuzzy* para sintonia PID comparados aos tradicionais em uma aplicação de controle de nível de tanques acoplados.

De acordo com Fuente (2006), o controle *fuzzy* resolveu o problema de controle na neutralização do PH, pois este processo não-linear era controlado por um controlador PI. O controle em lógica *fuzzy* usou variáveis auxiliares para identificar o processo adequando a performance para toda região de operação.

Outra aplicação é a utilização do controle *fuzzy* e sistemas *neuro-fuzzy* como técnicas de aprendizagem para proporcionar ao controle de máquinas a capacidade de raciocinar dos seres humanos. Em Rodrigues e Araújo (2006) são aplicados estes modelos em uma planta real do tipo *ball and beam*, que é composto basicamente por um sistema trave-bola, um servo motor com uma caixa redutora e uma régua com uma bola de referência.

2.4 Controle Adaptativo

O controle adaptativo é mais uma técnica de controle que foi aplicada ao processo visando adaptar o controle *PID* para que o mesmo altere a característica da malha em função do erro. O controle utilizado no trabalho foi o controle adaptativo por escalonamento de ganho.

Adaptar significa mudar um comportamento para se ajustar às novas circunstâncias. Um sistema adaptativo é qualquer sistema projetado sobre o conceito de adaptação. Assim, um controlador adaptativo é definido para modificar seu comportamento em resposta às mudanças na dinâmica do processo e na característica do distúrbio, (ASTRON; WITTENMARK, 1995).

Os controles clássico e robusto provêm respectivamente padrões de estabilidade relativa e medidas de custo garantido que representam um fator de segurança para variações e incertezas no sistema de controle. No entanto, algumas plantas apresentam variações tão amplas e com efeitos significativos sobre o comportamento dinâmico que um ganho de realimentação linear e com coeficientes constantes é incapaz de fornecer a flexibilidade necessária para atender às especificações de desempenho. Sendo assim, passa a ser necessário medir continuamente estas variações e então ajustar devidamente os parâmetros de controle (ganhos não-lineares), (BERTO; Sá; JR, 2004).

Um sistema de controle adaptativo realiza fundamentalmente três funções que lhe são inerentes: a identificação da planta, ou seja, a obtenção contínua de informações sobre os parâmetros do processo; a comparação do desempenho do sistema com o ótimo ou o desejado, a fim de tomar decisões de maneira a levar o processo nessa direção; e a atuação no processo de acordo com as decisões tomadas.

Sistemas de controle adaptativo são caracterizados pela existência de duas malhas de realimentação:

- malha de controle convencional;
- malha de adaptação, responsável por monitorar o desempenho e ajustar os parâmetros do controlador de acordo com as condições de operação em vigor. A Figura 2.16 apresenta um diagrama de bloco com as duas malhas de realimentação.

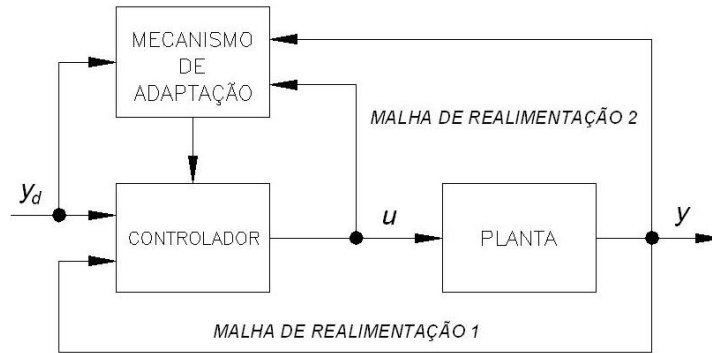


Figura 2.16 – Diagrama de controle adaptativo

Na verdade, controle adaptativo é uma extensão natural de sistemas realimentados clássicos (os quais já se ajustam a novas circunstâncias), buscando projetar controladores dotados de maior grau de autonomia. É importante mencionar que a teoria de controle adaptativo foi muito ativa nos anos 50, pois a motivação era desenvolver sistemas de controle de voo para aeronaves supersônicas, já que ganhos constantes não eram suficientes para sustentar a operação na região supersônica. Muitas das principais idéias de controle adaptativo foram concebidas nesta época, mas não havia *hardware* para implementações confiáveis, já que se empregavam computadores analógicos dedicados, (ABDALLAH, 2005).

2.4.1 Controle Adaptativo por Escalonamento do Ganho

Os sistemas adaptativos, baseados em escalonamento de ganho, foram originalmente desenvolvidos em conexão com os sistemas de controle de voo, (ASTRON; WITTENMARK, 1995). Este esquema consiste na utilização de variáveis auxiliares que sejam observáveis, e que tenham um bom grau de correlação com variações no comportamento dinâmico da planta, para efetuar ajustes nos parâmetros do controlador conforme apresentado na Figura 2.17, (ABDALLAH, 2005).

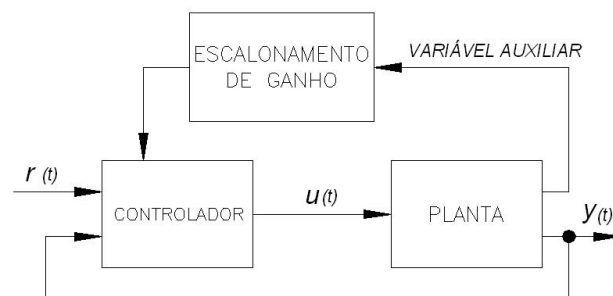


Figura 2.17 – Controle Adaptativo por Escalonamento de Ganhos

2.4.2 Sistema Adaptativo por *Self-Tuning*

Os reguladores auto ajustáveis (*Self-Tuning* regulator - STR) foram desenvolvidos originalmente em *Kalman* (1958), e melhor detalhado em *Astron e Wittenmark* (1995). Este sistema de controle envolve as estimações *on-line* dos parâmetros, que são utilizados no projeto ou ajuste dos ganhos do controlador, como no esquema ilustrado na Figura 2.18. Neste sistema é possível escolher diferentes estruturas de estimador, como mínimos quadrados, mínimos quadrados estendido e generalizado, filtro estendido de *Kalman* entre outros, (KALMAN, 1958).

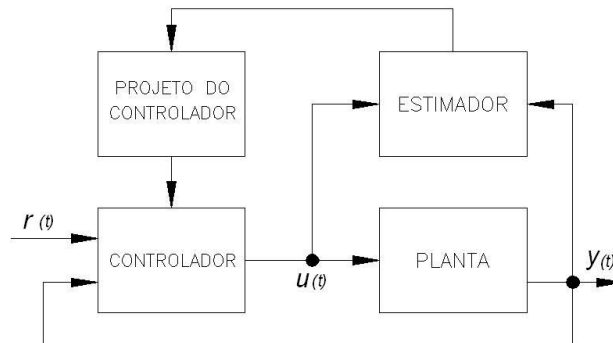


Figura 2.18 – Controle Adaptativo *Self-Tuning*

Diferentes estruturas de controle e diferentes métodos de cálculo dos parâmetros podem ser utilizados.

2.4.3 Sistema Adaptativo por Modelo de Referência

Controle Adaptativo por Modelo de Referência: é um método direto, pois as regras de ajuste indicam como os parâmetros do controlador devem ser ajustados. Existem duas idéias básicas envolvidas em sua concepção:

- o objetivo do sistema em malha fechada é formulado como um problema de seguimento de modelo;
- os parâmetros do controlador são ajustados por processos iterativos (por exemplo, pelo método do gradiente), usando uma taxa de adaptação. A Figura 2.19 apresenta um exemplo de uma técnica de controle adaptativo por modelo de referência.

No esquema direto o mecanismo de adaptação tem a função de minimizar o erro entre a saída do modelo de referência $y_m(t)$ e a saída da planta $y(t)$. No caso do esquema indireto é utilizado um esquema de identificação dos parâmetros da planta. O modelo identificado é utilizado no ajuste dos ganhos do controlador.

Como o erro está definido depois do processo, então, para ajustar o controlador não há resultados gerais referentes à estabilidade do sistema. A estabilidade vai depender do sinal de entrada e da taxa

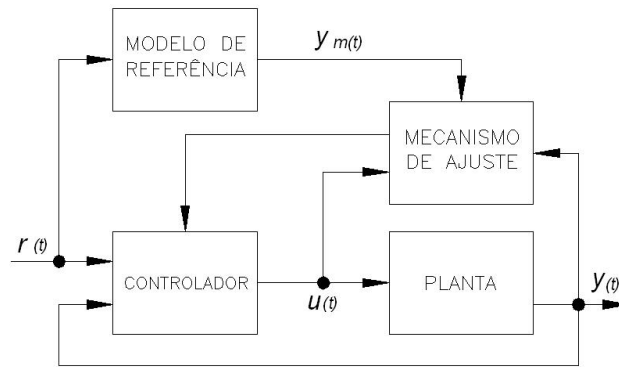


Figura 2.19 – Sistema Adaptativo por Modelo de Referência

de adaptação. Em muitos casos, os sistemas são estáveis para taxas de adaptação suficientemente pequenas. Existem dois módulos básicos:

- estimador recursivo de parâmetros da planta (identificação de sistemas);
- procedimento de projeto do controlador.

2.4.4 Modelo de Erro

O modelo de erro é usado pelo mecanismo de adaptação para estimar os ganhos do controlador e também para análise e prova de estabilidade de sistemas adaptativos. O modelo de erro pode ser representado, como no modelo de referência, de duas formas:

- Através do erro de estado $e_s(t)$ que é a diferença entre o vetor de estado do modelo de referência x_m e o vetor de estado da planta $x(t)$.

$$e_s(t) = x_m - x(t) \quad (2.10)$$

- Através do erro de saída $\epsilon_s(t)$ que é a diferença entre a saída do modelo de referência y_m e a saída da planta $y(t)$.

$$\epsilon_s(t) = y_m - y(t) \quad (2.11)$$

2.4.5 Mecanismo de Adaptação

O mecanismo de adaptação é o responsável por estimar os parâmetros do controlador baseado no modelo de erro. Os parâmetros são estimados tal que o comportamento do sistema seja próximo ao do modelo de referência.

Um sistema de controle adaptativo deve prover continuamente o estado do processo, ou seja, identificá-lo; deve comparar o desempenho do sistema com o considerado ótimo ou desejável, decidir

adaptá-lo de modo que ele tenda a apresentar o desempenho desejado e finalmente realizar o ajuste propriamente dito.

2.4.6 Aplicações de Controle Adaptativo

Em Figueiredo (2004) são implementadas técnicas de controle adaptativo ao resfriamento de tiras laminadas a quente. Foram utilizados algoritmos de controle com identificação de parâmetros a partir de dados reais do processo. Este trabalho comprova que utilizando teoria de controle clássico e antecipando ações de controle baseado nos distúrbios medidos é possível atingir resultados melhores no controle de tiras laminadas a quente.

O controle adaptativo também é aplicado para sintonia de controle PID, em Abdallah (2005) é utilizado um método baseado em sistemas adaptativos por modelo de referência para estimar os parâmetros do controlador PID, este método é avaliado no controle de atitude de veículos lançadores.

Em Berto (2004) é apresentada uma solução para o problema de controle de um sistema de aquecimento resistivo de água com aplicação de controle adaptativo. A solução encontrada apresentou ótimos resultados, pois este processo não-linear passou a apresentar um controle único para que a temperatura fosse mantida no ponto de operação independente da vazão de água.

Outra aplicação é a utilização de controladores adaptativos para controle de temperatura em um túnel psicrométrico, o túnel é composto por um sistema de ventilação e outro de refrigeração. Este controle é voltado a manter a temperatura do ar no ponto de operação através de parâmetros estimados pelo algoritmo dos mínimos quadrados. Os parâmetros do sistema estimados em tempo real utilizaram o fator de esquecimento, para garantir avaliação contínua da sua dinâmica não-linear, (MONTENEGRO et al., 2006).

2.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os fundamentos básicos envolvendo controle de processo. Utilizou representações de fenômenos que ocorrem na presença de controle de processo.

Os conceitos básicos apresentados tem o objetivo de explicar o princípio de funcionamento dos equipamentos e os fundamentos de controle aplicados para melhoria do processo através da técnica de controle *on-off*, *P*, *PI*, *PID*, *Fuzzy* e Adaptativo.

METODOLOGIA

3.1 Introdução

Uma técnica proposta na obtenção de melhorias no controle de processos é a lógica *Fuzzy*. Ela aplica o conhecimento especialista na solução de problemas com incertezas, (no caso as não-linearidades) e atrasos de transporte através de algoritmos. Uma vantagem do método é que o mesmo não precisa inicialmente ser modelado matematicamente, (FENG et al., 2002).

As aplicações dos sistemas para controle de processo foram realizadas através de ferramentas disponibilizadas no sistema de controle da empresa Sonoco que é o sistema *Delta V* comercializado pela empresa *Emerson Process Management*, pois o mesmo apresenta além do controle tradicional *PI* o controle com lógica *fuzzy* e Adaptativo que é um diferencial dos fabricantes de *CLP* (controlador lógico programável). As comparações, de forma a validar os resultados, foram realizadas com o *MatLab*[®].

Para comparação entre as técnicas propostas, foram realizados estudos nas malhas de controle através de simulações em malha aberta e fechada. Também foram levantados dados para identificação do processo e calculadas as constantes do controlador. O controlador assim especificado foi utilizado nas simulações do novo controlador em processo real, tanto para o controlador *PI*, quanto para os controladores em Lógica *Fuzzy* e Adaptativo.

A seguir é apresentada a descrição do processo de fabricação de papel e a metodologia utilizada para a sintonia das técnicas de controle.

3.2 Descrição do Processo

O processo de fabricação de papel que será descrito ocorre na Indústria de Papel *Sonoco do Brasil Ltda*. Tal processo utiliza vários tipos de papel descartado para reciclagem. A Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos geral do processo de reciclagem de papel.

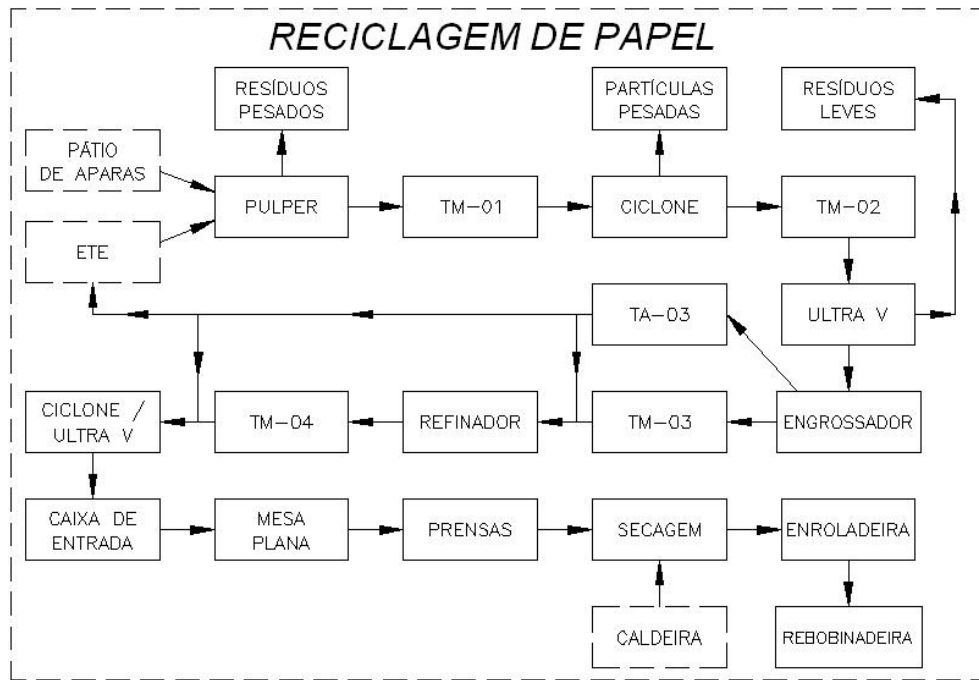


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do processo de reciclagem de papel

Todo papel para reciclagem fica localizado no pátio de aparas. O papel é adicionado a um tanque (*pulper*) onde ocorre a trituração, mistura com água e componentes químicos necessários para sua composição e tratamento. É também neste tanque que ocorre a separação e eliminação dos resíduos pesados. A água descartada durante todo processo é enviada para uma estação de tratamento (*ETE*). Esta água é reprocessada para reutilização das fibras de papel presentes na mesma. A massa proveniente desta estação de tratamento é encaminhada para o processo de reciclagem.

A massa proveniente do *pulper* é encaminhada para o tanque de massa (*TM-01*). Este tanque, como os demais tanques de massa, tem como função manter um volume mínimo tanto para garantia do processo como para evitar cavitação nas bombas de massa. A massa do *TM-01* é bombeada para o tanque 02 (*TM-02*), passando por um equipamento chamado ciclone, que tem função de eliminar partículas pesadas do processo.

A massa localizada no *TM-02* é bombeada para o tanque 03 (*TM-03*) passando por dois equipamentos, *Ultra V* e Engrossador: o *Ultra V* tem função de eliminar de forma centrífuga resíduos leves como plásticos, isopor, entre outros; o Engrossador tem função de separar água da massa através de uma tela que permite somente a passagem da água, deixando assim a massa com uma consistência maior, ou seja, um volume de água menor presente na massa de papel. A água por ação da gravidade é encaminhada para o tanque de água 03 (*TA-03*); esta água é reutilizada nos controles de consistência que existem na saída dos *TM-03* e tanque 04 (*TM-04*).

A massa localizada no *TM-03* é bombeada para o *TM-04* passando pelo refinador, este equipamento tem função de refinar a massa de papel, pois o refino da massa influencia na resistência e tração do produto final. A massa deste *TM-04* é bombeada para a caixa de entrada passando novamente por outro *Ultra V* e outro ciclone a fim de eliminar qualquer resíduo ainda presente no processo. Estes

equipamentos e tanques citados ficam localizados no Preparo de Massa que tem como função eliminar resíduos e preparar a massa para a Máquina de Papel; esta, por sua vez tem função de drenar, prensar e secar o papel.

A caixa de entrada, já localizada na Máquina de Papel, distribui o papel na tela formadora da mesa plana. A mesa plana possui um sistema de vácuo onde começa-se a drenar água da massa de papel. Depois este papel é encaminhado para as prensas que além de prensar o papel retira água do mesmo também por um sistema de vácuo. Na saída das prensas o papel é conduzido para a secagem que por sua vez finaliza o processo de secagem do mesmo através da troca térmica com o vapor produzido pela caldeira.

O papel já seco é enrolado continuamente nos rolos localizados na enroladeira. A Rebobinadeira rebobina os papéis destes rolos preparando-os como produto final para comercialização.

O estudo comparativo entre as técnicas de controle trabalha com três processos que se localizam entre os tanques *TM-01* e *TM-04* sendo eles linear e não-linear:

3.3 Sintonia do Controle PI

Para garantir precisão na sintonia do controle *PI*, o mesmo foi projetado através da técnica de controle manual e da sintonia automática (*Delta Tune*[®]) agregado ao *software* de controle *Delta V*, (KNIGHT, 2004). Este *software* realiza a sintonia *on-line* na malha de controle utilizando vários métodos como *Ziegler Nichols*, período crítico, entre outros (BERTO; Sá; JR, 2004), para a simulação foi utilizado o *software* MatLab, licença acadêmica da Universidade Estadual de Londrina.

Para alcançar o melhor desempenho dos controladores será comparado o controlador *PID* ao *PI* e selecionado o controlador com melhor performance. A técnica manual é realizada através do coeficiente de amortecimento, pois para garantir estabilidade ao processo é necessário que o sistema tenha o coeficiente próximo a um, (OGATA, 1998).

3.3.1 Sintonia Manual

A primeira etapa da técnica manual é a identificação do sistema a partir de medidas observadas, (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000). As simulações da sintonia manual é realizada com o auxílio do *software* MatLab e seu algoritmo está apresentado no Apêndice A.

Por se tratar de um processo existente em que seu controle já está sendo realizado por um controlador *PI* - (Proporcional-Integral), basta encontrar a função de transferência do sistema (*FTS*), e depois melhorar seu coeficiente de amortecimento (ζ). Finalizando estas etapas serão encontrados novos parâmetros para a malha estudada. A seguir serão detalhadas as etapas.

A equação 3.1 apresenta a equação do controlador *PI* em paralelo que é o controlador existente no processo.

$$CT = \frac{(T_i K_p)s + 1}{T_i s} \quad (3.1)$$

onde, CT é o controlador, K_p é o ganho proporcional e T_i é o tempo integral.

Para encontrar a função de transferência (FT) do sistema foi dado um degrau no *Setpoint* com o controle em manual. Em seguida volta-se o controle para automático e acompanha o desfecho do processo até atingir seu regime permanente em 5% do degrau.

A Figura 3.2 apresenta um exemplo de reação do processo ao degrau na malha até a mesma entrar em regime permanente, ou seja, após o degrau e com a liberação do controle para automático, o controlador faz com que a variável manipulada atue no processo alterando a variável do processo até que a mesma se estabilize no ponto de operação.

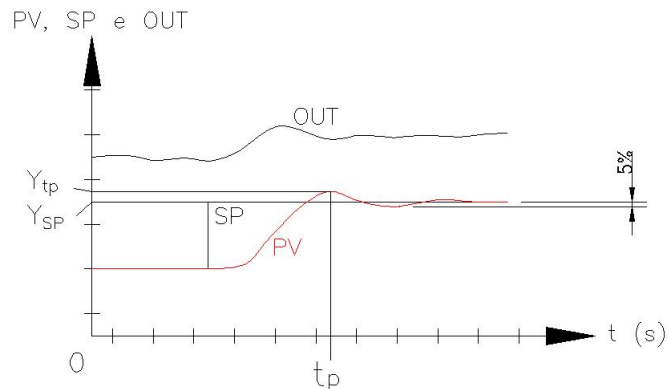


Figura 3.2 – Exemplo de degrau para cálculo da FTS

Através desta simulação obtém-se os seguintes parâmetros necessários para o cálculo da FT do sistema: tempo de pico (t_p), o valor de Y no tempo de pico (Y_{tp}), e o valor de Y no setpoint (Y_{SP}).

O tempo de pico limita-se no intervalo entre o início ao pico, neste intervalo o controlador atua na variável manipulada para que a variável do processo entre em regime permanente com o ponto de operação. Conforme apresentado na Figura 3.2 o sistema atingiu o ponto de operação e gerou um sobre-sinal antes da estabilização. O $Y(t_p)$ é o valor de Y no pico. O diagrama de bloco do sistema de controle em malha fechada é apresentado na Figura 3.3.

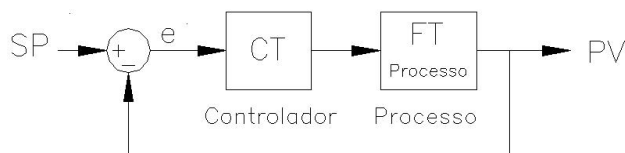


Figura 3.3 – Diagrama de bloco com a FT do processo separada do CT

Ao interligar o controlador com a função de transferência (FT) do processo tem-se a FT do sistema. Veja o diagrama de bloco do sistema em malha fechada apresentado na Figura 3.4.

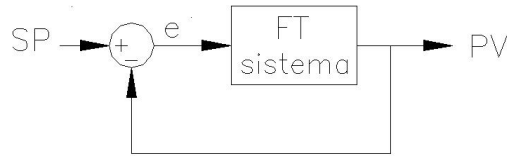


Figura 3.4 – Diagrama de bloco do sistema em malha fechada

As equações 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, a FT do sistema em malha aberta e a FT do sistema em malha fechada.

$$FTS = \frac{\omega_n^2}{s^2 + s(2\omega_n\zeta)} \quad (3.2)$$

$$FTS = \frac{\omega_n^2}{s^2 + s(2\omega_n\zeta) + \omega_n^2} \quad (3.3)$$

onde ω_n é a frequência natural e ζ é o coeficiente de amortecimento.

Substituindo os parâmetros encontrados através do degrau na malha de controle nas equações 3.4 e 3.5 obtém-se os valores de ζ e ω_n respectivamente.

$$\frac{Y(tp) - Y(SP)}{Y(SP)} = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.4)$$

$$tp = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.5)$$

Com os valores de ζ e ω_n encontra-se a FT do sistema. Assim, para melhorar a sintonia basta atuar no ζ , pois quanto mais próximo da unidade for o valor de ζ , o sistema torna-se criticamente amortecido que é o objetivo, pois para $\zeta > 1$ o sistema torna-se superamortecido, (OGATA, 1998).

Para encontrar os novos parâmetros de sintonia PI é necessário encontrar a função de transferência do processo (FTP). A FT do sistema é igual à FT do processo com a aplicação do controlador. Este passo está representado nas Figuras 3.3 e 3.4, e na equação 3.6, então conhecendo-se as características do controlador e a FTS , obtém-se a FTP conforme apresentado na equação 3.7.

$$FTS = FTPCT \quad (3.6)$$

$$FTP = \frac{\omega_n^2 T_i}{s^2(K_p T_i) + s(2\omega_n\zeta K_p T_i + 1) + 2\omega_n\zeta} \quad (3.7)$$

A nova sintonia será projetada de forma que se altere a FT do sistema sem alterar a FT do processo.

Se para o projeto de sintonia a prioridade é um sistema com maior amortecimento por exemplo, então, existe a necessidade de se aumentar o coeficiente de amortecimento (ζ). Para evitar alteração na FT do processo ao aumentar o valor de (ζ), deve-se encontrar o novo valor para ω_n fazendo com que a parte da equação onde tem-se $2\omega_n\zeta$ continue com o mesmo valor, ou seja, se aumentar o valor de (ζ) consequentemente o valor de ω_n será menor para que o resultado continue o mesmo.

Assim, tem-se uma nova função de transferência para o sistema ($FTNS$). Para implementação desta $FTNS$ são necessários novos valores de K_p e T_i , para isso, realiza-se o procedimento igual ao realizado para encontrar o valor de ω_n . Observa-se na equação 3.7 que o numerador é $\omega_n^2 T_i$, conhecendo ω_n e o valor resultante, encontra-se o T_i . O mesmo procedimento é realizado com o denominador para encontrar o K_p . Assim tem-se o projeto de sintonia manual para o controle PI

3.3.2 Sintonia Automática

O segundo método de sintonia conhecido como *auto tuning* é realizado com o auxílio do *software Delta Tune*[®] agregado ao sistema de controle da Sonoco, e também implementado em *Matlab*[®] para a comparação dos resultados.

A Figura 3.5 apresenta a monitoração de uma malha de controle, contendo histórico da malha, valores do PI atual, de entrada, de saída e o ponto de operação da malha. Estes valores são observados no campo Controller.

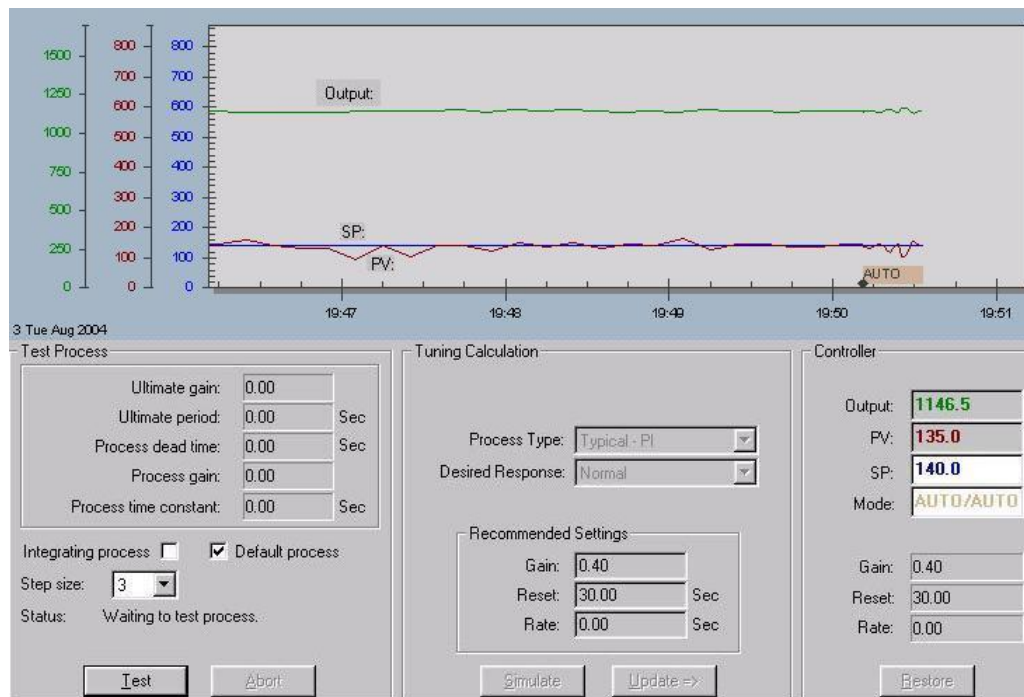


Figura 3.5 – *Delta Tune* monitorando exemplo sob controle PI

Para iniciar a simulação é necessário atribuir um valor no campo *Step size*. Este valor é atribuído avaliando-se que, quanto maior o *Step size*, maior a modulação da variável manipulada que neste caso

é um inversor de frequência. Para esta aplicação o *Step size* será de 7% de variação na rotação do inversor.

A Figura 3.6 apresenta o histórico da simulação em destaque. Ao alterar o botão *Test* o *Delta Tune* passa a malha para o modo Manual (*Lo*) e atua na variável manipulada diminuindo a rotação da bomba, conseqüentemente diminui-se a variável do processo que neste exemplo é vazão. Quando a vazão chega à proporção desejada pelo *Step size* aumenta-se a rotação da bomba até que a vazão aumente também de forma proporcional. Esta modulação ocorre até serem calculados os novos parâmetros do controlador, mas somente no ajuste fino é que será caracterizado o tipo de controle para o processo estudado, podendo ser amortecido ou não.

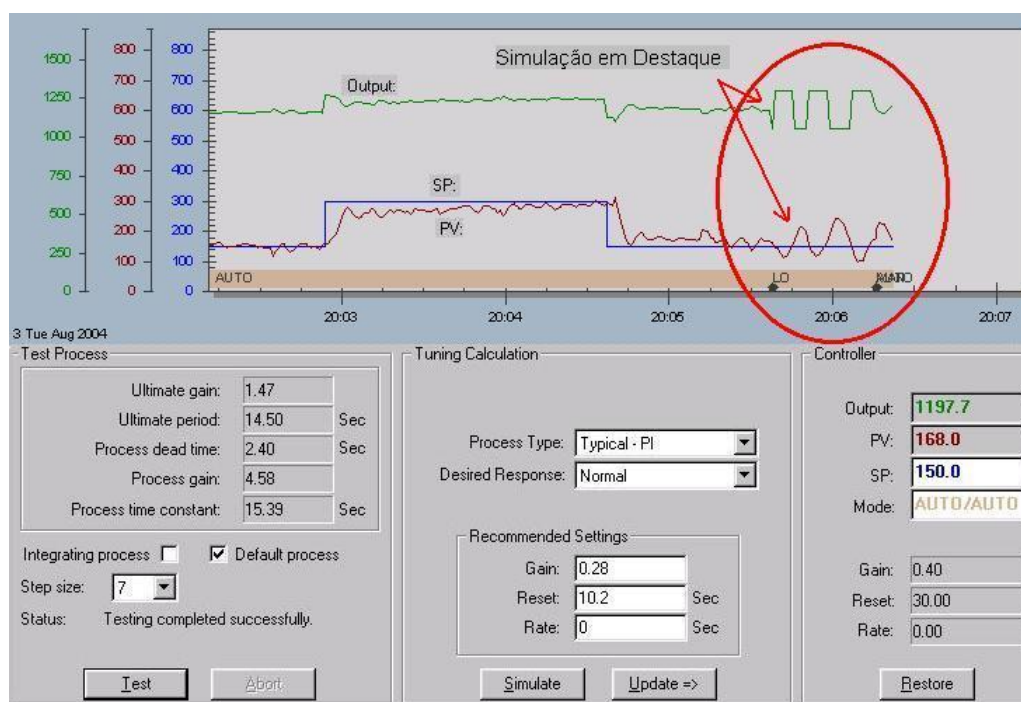


Figura 3.6 – *Delta Tune* simulando exemplo sob controle *PI*

No campo *Test Process* são apresentados parâmetros de análise específica do sistema para encontrar os novos parâmetros de sintonia. Observa-se também, que após o teste, o *software* recomenda valores na região intermediária entre as regiões amortecida e rápida para o ganho e o tempo integral que para este exemplo são: $K_p = 0,28$ e $T_i = 10,20$.

Para simular a melhora da sintonia e realização do ajuste fino habilita-se a função *Simulate*. A Figura 3.7 apresenta a tela do *software* para tal simulação, é nesta região que será caracterizado o sistema.

A faixa dos possíveis parâmetros de sintonia recomendável aparece na parte superior da Figura 3.7. Observa-se também na Figura 3.7 que a simulação fornece graficamente a atuação das variáveis em função do tempo e é dado automaticamente o desempenho do sistema através da integral do valor absoluto do erro (*IAE*) e o *overshoot*.

O ajuste fino é obtido com a escolha de um ponto na região de parâmetros recomendados. Ao

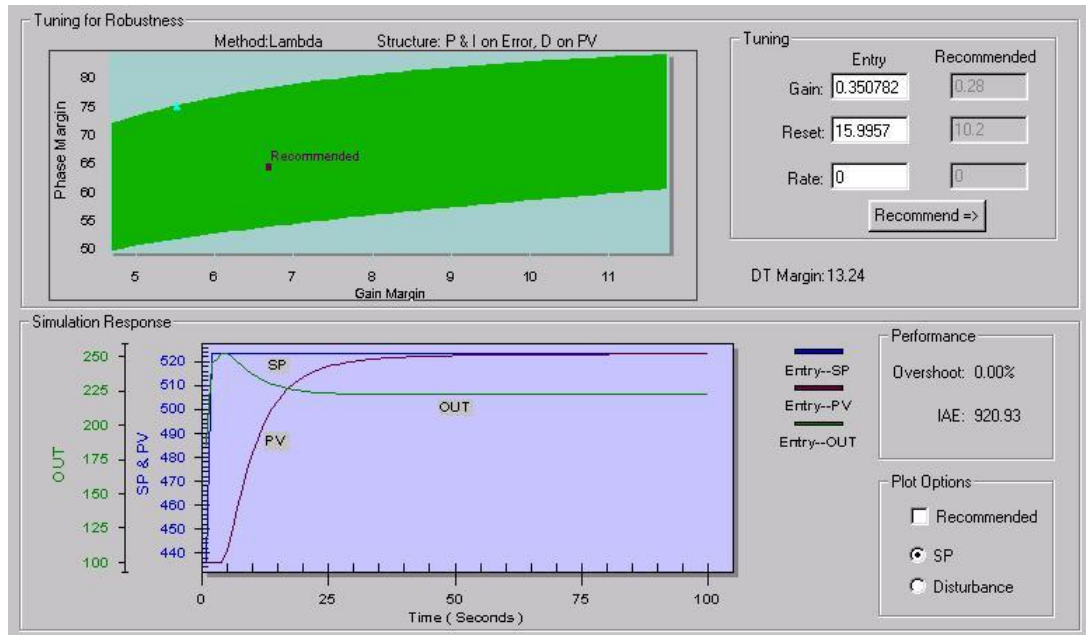


Figura 3.7 – Ajuste fino da sintonia *PI* no *Delta Tune*

escolher um ponto o resultado da simulação aparece graficamente na parte inferior da Figura 3.7 e também o desempenho correspondente. Faz-se uma busca nesta região até encontrar o ponto ideal, ou seja, sobresinal igual a zero e o menor valor para o IAE sem causar sobresinal. A Figura 3.7 apresenta o ajuste fino concluído.

O *software* permite utilizar outros métodos para sintonia. Na Figura 4.6 são apresentados novos valores de sintonia através do método *PID*.

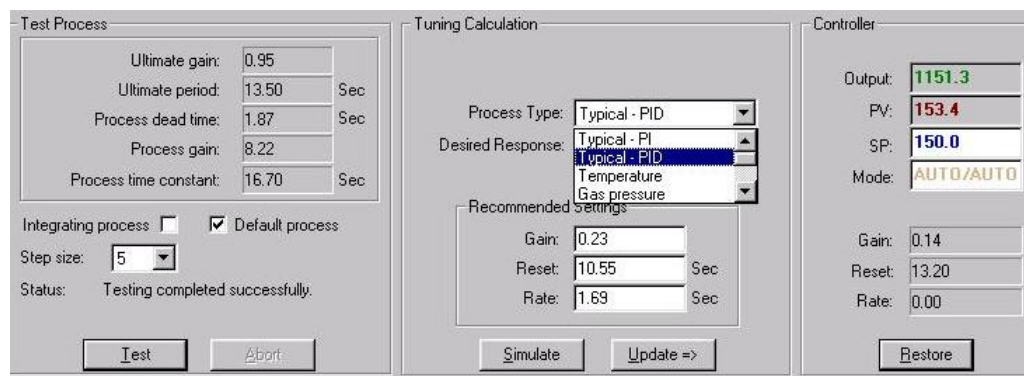


Figura 3.8 – Sintonia pelo método *PID*

Para encontrar a melhor técnica de controle será testados todos os métodos possíveis pelo *Delta Tune* tanto para *PID* quanto para *PI* visando encontrar a melhor sintonia para o controle. A sintonia independente do método segue o mesmo procedimento.

3.4 Sintonia do controle Adaptativo

Uma outra opção de controle é o controle adaptativo. Para garantir precisão na sintonia do controle adaptativo, o mesmo também foi projetado através da técnica de controle manual e da sintonia automática (*Delta Tune*).

O controle adaptativo tanto na opção de sintonia manual como na opção automática será o controle adaptativo por escalonamento de ganho. A Figura 3.9 apresenta o diagrama de blocos do controle adaptativo por escalonamento de ganho, observe que o escalonamento é realizado em função do erro.

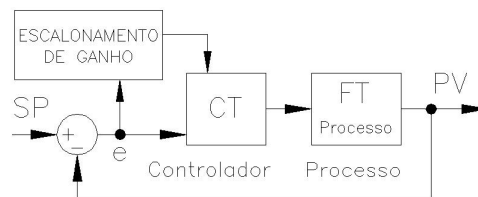


Figura 3.9 – Diagrama de blocos do controle adaptativo

3.4.1 Sintonia Manual

O algoritmo da sintonia manual está apresentado no Apêndice C. Esta sintonia utiliza-se dos mesmos passos da sintonia manual *PI* para encontrar a *FT* do sistema e projetar o ganho K_p e o tempo integral T_i . A diferença é que a sintonia adaptativa projeta o ganho e o tempo integral para uma condição amortecida e outra condição com resposta rápida. Definidos os ganho e o tempo integral encontra-se as equações para K_p e T_i , onde os mesmos variaram linearmente em função da diferença entre o ponto de operação (*SP*) e a (*PV*) que é o erro.

Este controle será parametrizado para garantir que a menor diferença entre *SP* e *PV* possibilite que o controle tenha uma característica amortecida e a maior diferença uma característica rápida. Estes valores variam linearmente entre os limites máximos e mínimos do K_p e T_i . As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam respectivamente a variação do K_p e T_i em função da diferença da *PV* ao *SP*.

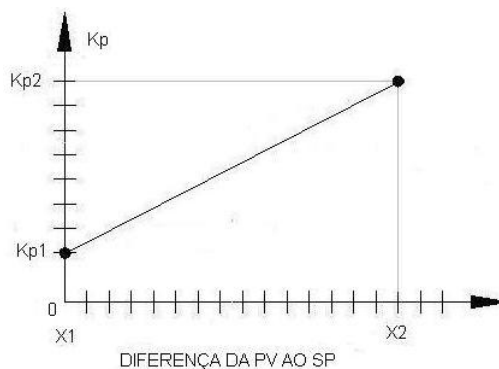


Figura 3.10 – Característica do K_p em função do erro

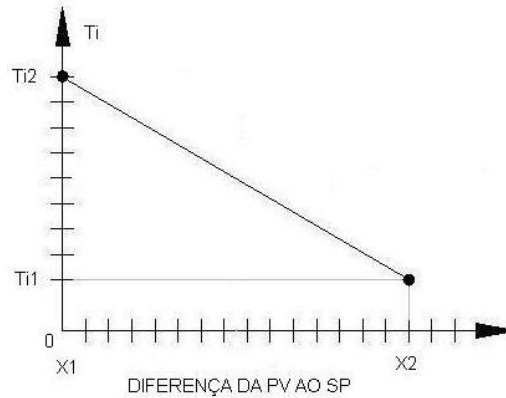


Figura 3.11 – Característica do T_i em função do erro

Através da Figura 3.10 é possível encontrar a equação da reta para K_p .

$$K_p = ax + b \quad (3.8)$$

Sendo:

$$a = \frac{K_{p2} - K_{p1}}{x_2 - x_1} \quad (3.9)$$

x = diferença da *PV* ao *SP*;

b = valor de K_p para $x = 0$.

Através da Figura 3.11 é possível encontrar a equação da reta para T_i .

$$T_i = ax + b \quad (3.10)$$

Sendo:

$$a = \frac{T_{i2} - T_{i1}}{x_2 - x_1} \quad (3.11)$$

x = diferença da *PV* ao *SP*;

b = valor de T_i para $x=0$.

Assim têm-se a sintonia adaptativa para a técnica de controle manual.

3.4.2 Sintonia Automática

O controle Adaptativo é outra opção do sistema de controle *Delta V*. Para iniciar o controle Adaptativo na malha é necessário acrescentar ao bloco principal *PI* o controle adaptativo por escalona-

mento de ganho.

Para implementar o controle adaptativo na malha de controle foram acrescentados ao bloco lógico *PI* um bloco de cálculo com as equações do ganho e do tempo integral já apresentadas na sintonia manual.

Para realizar a sintonia, será utilizado o mesmo método já apresentado para o controle *PI*, porém será realizado em duas etapas, primeiramente o controle será parametrizado para garantir que a menor diferença entre *SP* e *PV* possibilite ao controle característica amortecida. Nesta etapa encontra-se os valores de k_{p1} e T_{i1} para o menor valor de *IAE* com sobressinal igual a zero. Na segunda etapa o controle será parametrizado para garantir que a maior diferença possibilite uma característica rápida. Nesta etapa encontram-se os valores de k_{p2} e T_{i2} para o menor valor de *IAE* desprezando o sobressinal.

3.5 Sintonia do Controle em Lógica Fuzzy

A terceira opção de controle utilizando a lógica *fuzzy*. Para garantir precisão na sintonia do controle *fuzzy*, o mesmo também foi projetado através da técnica de controle manual e da sintonia automática (*Delta Tune*).

3.5.1 Sintonia Manual

A primeira técnica de sintonia *fuzzy* será a técnica manual com o auxílio do *software MatLab*. A sintonia *fuzzy* utiliza-se dos mesmos passos da sintonia manual *PI* para encontrar a *FT* do sistema, projetar o ganho k_p e o tempo integral T_i . A diferença é que a sintonia *fuzzy* projeta o ganho e o tempo integral para dois valores de outra variável que influencia diretamente no processo. Após, encontram-se as equações para k_p e T_i , onde os mesmos irão variar linearmente em função desta variável.

O algoritmo da sintonia *fuzzy* apresentado no Apêndice B depende do valor de outra variável além da variável controlada, que neste exemplo é a consistência, porém o mesmo foi projetado para receber o valor da consistência do processo e posicionar o controle em novos valores de k_p e T_i , conforme rampas que serão apresentadas a seguir.

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam respectivamente a variação do k_p e T_i em função da consistência.

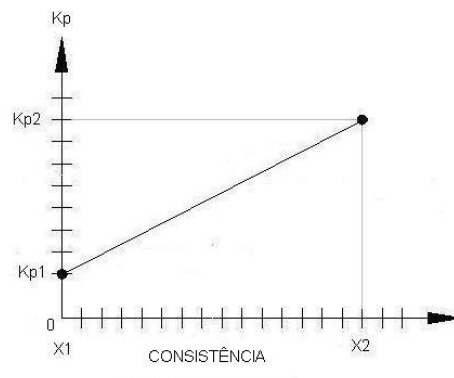


Figura 3.12 – Característica do k_p em função da consistência

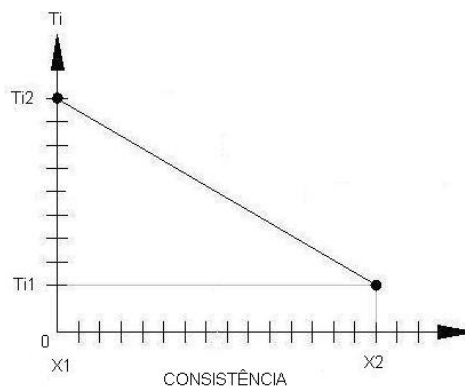


Figura 3.13 – Característica do T_i em função da consistência

Através da Figura 3.12 é possível encontrar a equação da reta para k_p .

$$k_p = ax + b \quad (3.12)$$

Sendo:

$$a = \frac{k_{p2} - k_{p1}}{x_2 - x_1} \quad (3.13)$$

x = valor da consistência;

b = valor de k_p para $x = 0$.

Através da Figura 3.13 é possível encontrar a equação da reta para T_i .

$$T_i = ax + b \quad (3.14)$$

Sendo:

$$a = \frac{T_{i2} - T_{i1}}{x_2 - x_1} \quad (3.15)$$

x = valor da consistência;

b = valor de T_i para $x=0$.

Assim têm-se a sintonia *fuzzy* para a técnica de controle manual.

3.5.2 Sintonia Automática

A segunda etapa é a sintonia *fuzzy* através do *Delta Tune*.

Para iniciar o controle *fuzzy* nesta malha é necessário substituir o bloco principal *PID* da malha pelo bloco de lógica *fuzzy*. A configuração deste bloco inicia-se com uma sintonia padrão, sua parametrização ocorre através do ajuste de três campos distintos (*Error*, *Delta Error* e *Output*). Esta sintonia pode ser realizada por tentativa e erro ou através do *Delta Tune*.

Para iniciar a simulação é necessário atribuir um valor no campo *Step size*. Sabendo-se que quanto maior o *Step size*, maior será a modulação da variável manipulada, que para este exemplo, é a velocidade do motor e na variável do processo, vazão de massa de papel. Foi atribuído um *Step size* de 7% de variação na velocidade do motor para não prejudicar o processo com oscilações conforme apresentado na Figura 3.14.

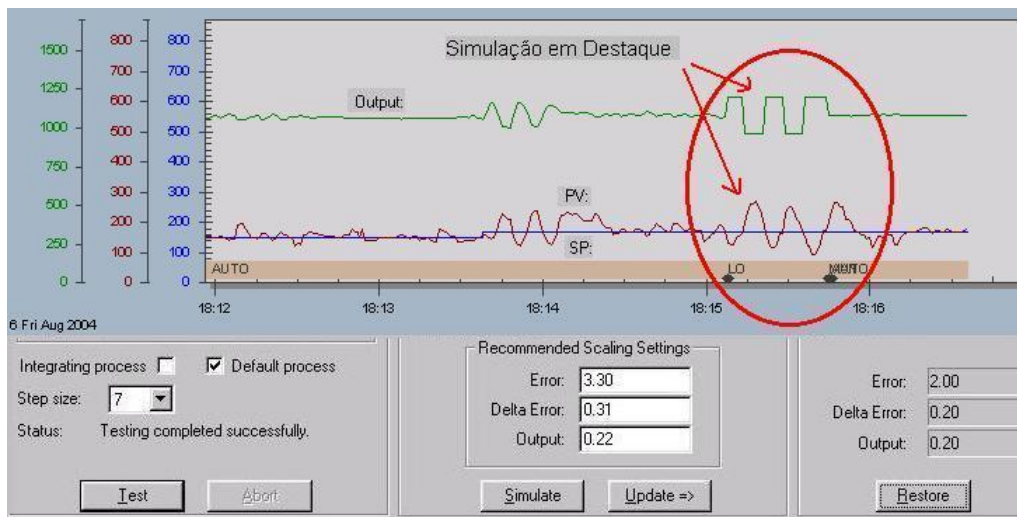


Figura 3.14 – *Delta Tune* simulando exemplo sob controle *fuzzy*

A Figura 3.14 apresenta o histórico da simulação em destaque. Ao alterar o botão *Test*, altera-se a malha para o modo Manual (*Lo*) e a variável manipulada atua diminuindo a rotação da bomba, conseqüentemente diminui-se a vazão. Quando a vazão chega à proporção desejada, aumenta-se a

rotação da bomba até que a vazão aumente também de forma proporcional. Esta modulação ocorre até o sistema conseguir calcular os novos parâmetros do controlador, mas somente no ajuste fino que será caracterizado o tipo de controle para o processo estudado, podendo ser amortecido ou não.

No campo *Test Process* são apresentados parâmetros de análise específica do sistema para encontrar os novos valores para sintonia. Observa-se também que após o teste os novos valores recomendados são: *Error* = 3,30, *DeltaError* = 0,31 e *Output* = 0,22.

Com estes valores do controlador é habilitada a função *Update*. Desta forma, o processo assumirá os novos valores do controlador.

Para simular a melhora da sintonia e a realização do ajuste fino habilita-se a função *Simulate*. Na Figura 3.15 é apresentada a tela para tal simulação.

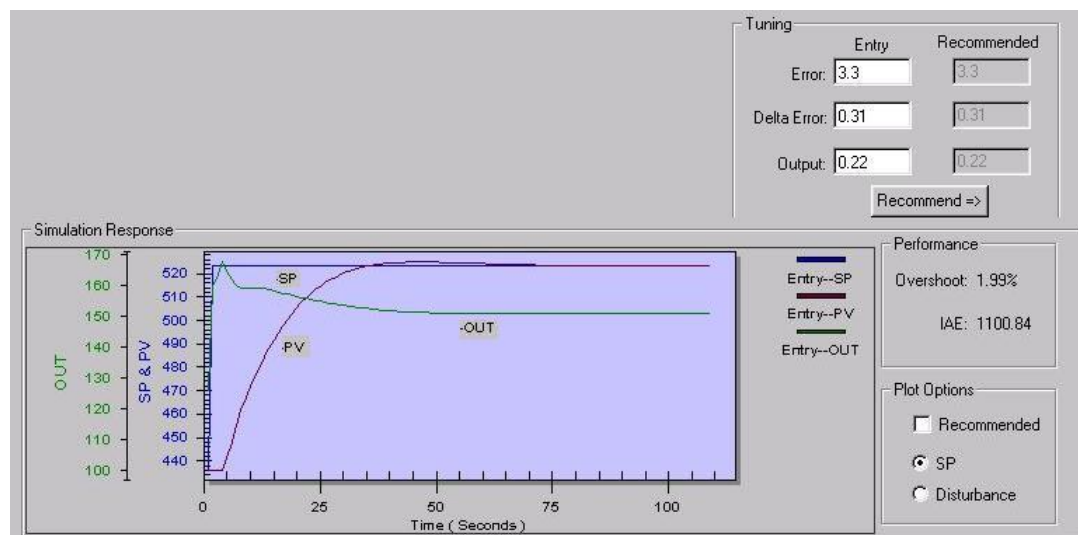


Figura 3.15 – Área de simulação do *Delta Tune* sob controle *fuzzy*

Ao comparar a área de simulação *fuzzy* à simulação *PI* da Figura 3.7, observa-se que na Figura 3.15 a simulação não apresenta a faixa com os possíveis parâmetros de sintonia na parte superior do gráfico. Observa-se também que a simulação fornece graficamente a atuação das variáveis em função do tempo e é dado automaticamente o desempenho do sistema através da integral do *IAE* e do *Overshoot*.

Para realizar o ajuste fino é necessário variar os três campos distintos (*Error*, *Delta Error* e *Output*). Assim,

- Quanto maior for o *Error*, maior será o amortecimento da variável;
- Quanto menor for o *Delta Error*, maior será a oscilação da variável;
- Quanto maior for o *Output*, maior será a oscilação da variável.

As relações entre estas três variáveis representam um controlador não-linear. A não-linearidade resulta da tradução de variáveis do processo através do *fuzzificador*, à inferência da regra, e o retorno ao sinal contínuo através do *defuzzificador*.

As duas associações de funções para o *error*, *delta error* e *output* são negativas e positivas. A escala de associação do valor do error (S_e) e a variação do erro ($S\Delta_e$) respectivamente, determinam o grau de associação. A escala de associação de saída ($S\Delta_u$) determina o valor da alteração na saída para um *error* e um *delta error*.

Existem quatro regras de lógica *fuzzy* que o bloco *FLC* usa para realizar o controle:

- Regra 1, se o *error* for N e o *delta error* for N, altera-se *output* para P.
- Regra 2, se o *error* for N e o *delta error* for P, altera-se *output* para ZO.
- Regra 3, se o *error* for P e o *delta error* for N, altera-se *output* para ZO.
- Regra 4, se o *error* for P e o *delta error* for P, altera-se *output* para N.

As duas funções de associação relacionadas com as variáveis permitem ao controle que três condições sejam realizadas na saída.

A Figura 3.16 apresenta o controlador com o melhor desempenho, assim é possível verificar que com os novos parâmetros diminui-se tanto o *overshoot* quanto à área de atuação da variável fora do ponto de operação.

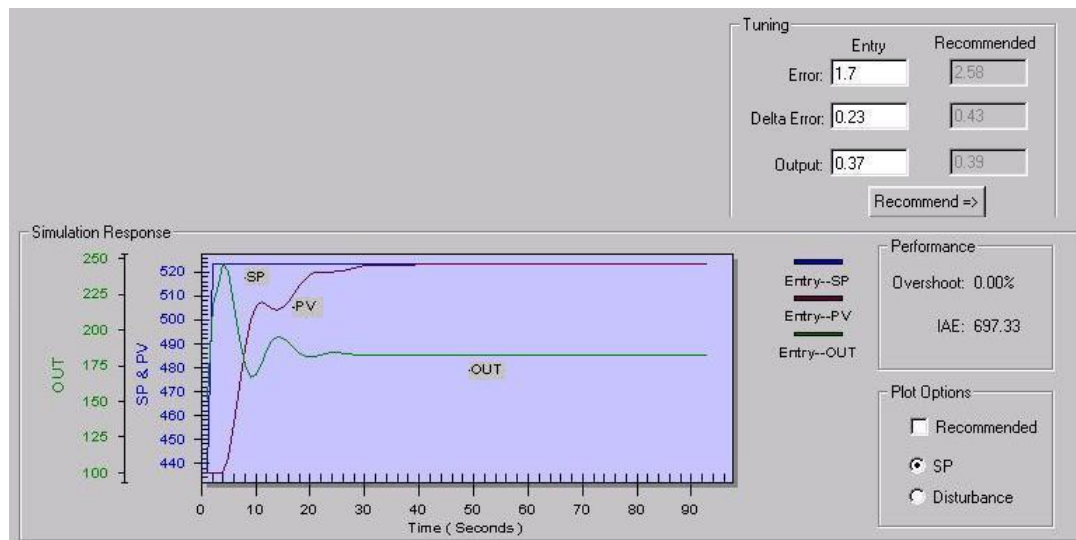


Figura 3.16 – Ajuste fino da sintonia *fuzzy* no *Delta Tune*

O ajuste fino deve ser realizado até encontrar o melhor desempenho para a malha.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

O estudo comparativo entre as técnicas de controle trabalha com três processos sendo eles linear e não-linear:

- Controle de vazão não-linear;
- Controle de nível linear;
- Controle de consistência linear.

A Tabela 4.1 mostra quais as comparações entre controladores e em quais processos serão realizadas.

Tabela 4.1 – Comparações entre controladores

Processos	Controle <i>PI</i>	Adaptativo	<i>Fuzzy</i>
Vazão	Automático e Manual	Manual	Automático e Manual
Nível	Automático e Manual	Automático e Manual	Automático e Manual
Consistência	Automático e Manual	Automático e Manual	Automático e Manual

Para o processo não-linear, não foi possível aplicar a sintonia automática do controle adaptativo, pois este processo foi alterado tornando-se linear antes do desenvolvimento do controle adaptativo. Esta alteração ocorreu em função de variações na consistência da massa de papel que impossibilitava o controle de consistência no *TM-04*. Atualmente não há sub processos não lineares identificados no processo de fabricação de papel.

A seguir são apresentadas discussões e resultados dos três processos estudados.

4.2 Controle de Vazão

A primeira aplicação estudada refere-se ao controle de vazão de massa de papel não-linear, cuja consistência da massa de papel apresenta uma variação de 2,5% a 6%; neste processo será feita uma comparação entre a técnica de controle *PI* e o controle *fuzzy*. A Figura 4.1, ilustra o diagrama esquemático do processo.

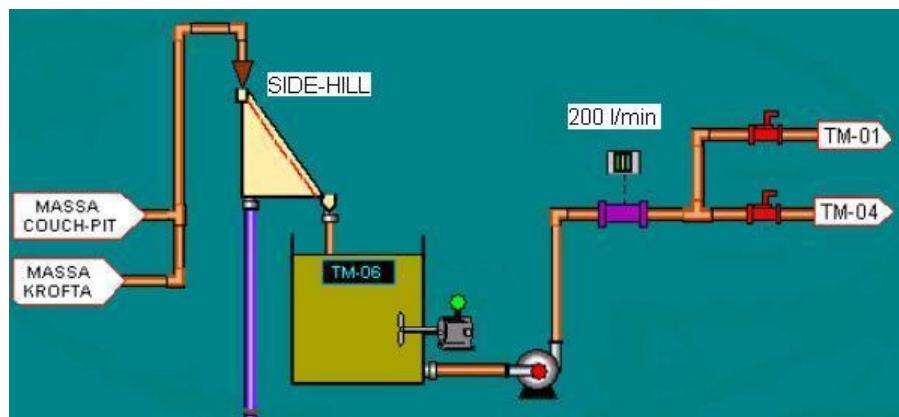


Figura 4.1 – Diagrama esquemático do processo de vazão

A água descartada durante todo processo é enviada para uma estação de tratamento (*Krofta*). Esta água é reprocessada para reutilização das fibras de papel remanescentes. A massa proveniente desta estação de tratamento e toda massa de descarte durante o processo (*couch-pit*) são encaminhadas para o tanque de massa 06, (*TM-06*). A água e a massa de papel são encaminhadas (separadamente) para distintos tanques por ação da gravidade. A massa fica armazenada no *TM-06*, onde é realizado o controle na vazão de saída. A saída deste tanque é bombeada para o *TM-04* ou para *TM-01*, devendo a vazão ser mantida constante. No tanque *TM-04* a massa já está sem impurezas e com o grau de refino desejado. No *TM-01* a massa ainda contém impurezas, não exigindo controle preciso, ao bombear a massa para o *TM-01*, a mesma sofrerá um reprocesso de mais de 40 minutos até chegar no *TM-04* gerando custo desnecessário. Os equipamentos envolvidos para o controle de vazão são três:

- Medidor de vazão eletromagnético;
- Controlador;
- Inversor de frequência modulando a rotação da bomba na saída do *TM-06*.

O processo de vazão de massa de papel é não-linear em função de variações em sua consistência. A vazão de saída do tanque deve ser constante e independente da consistência da massa. Desta forma, após medida esta consistência, um sinal é enviado ao inversor de frequência de forma a aumentar ou diminuir a rotação do motor da bomba que controla a vazão.

Como não existe controle de consistência no tanque *TM-06* é possível perceber a não-linearidade do processo através da rotação da bomba. Esta rotação aumenta em aproximadamente 500 rpm para

manter a mesma vazão de 200 l/min quando no tanque há uma massa de papel com consistência de 6%.

Procura-se realizar o controle na saída do *TM-06* para obtenção de uma vazão constante na entrada do *TM-01* e principalmente na entrada do *TM-04*. Se ocorrerem variações bruscas na saída do *TM-06* quando a massa de papel estiver sendo bombeada para o *TM-04*, a consistência do *TM-04* pode ser alterada causando danos na qualidade do papel ou também pode interromper a produção por quebra de papel. A massa é selecionada para os tanques *TM-01* ou *TM-04* através de duas válvulas manuais localizadas após o medidor de vazão.

A escala do medidor é de zero à 872 l/min, devido a estas condições faz-se necessário limitar a rotação da bomba entre 800 e 1600 rpm. Com uma rotação inferior a 1030 rpm, a bomba não consegue vencer a pressão da massa em uma tubulação vertical em sua seqüência, sendo assim o medidor indica zero l/min. Com a rotação acima de 1600 rpm a vazão estará acima do valor máximo da escala do medidor.

A coluna vertical também garante que a tubulação fique completamente preenchida, evitando erros de medições realizadas pelo medidor de vazão eletromagnético.

Para evitar variações no controle de vazão, é projetado um controlador com característica amortecida mantendo em seu desempenho zero de *overshoot* e com o menor *IAE* possível. A seguir serão apresentados os métodos de sintonia para controle através da técnica de controle *PI*.

4.2.1 Controle de vazão através do algoritmo *PI*

- **Sintonia Manual**

A vazão deverá ser mantida entre 120 e 250 l/min durante o teste. Terminado o teste, a vazão deverá estar em regime permanente em torno do ponto de operação para aplicação. Por se tratar de um processo existente em que seu controle já está sendo realizado por um controlador *PI* - (Proporcional-Integral), basta encontrar a função de transferência do sistema e depois melhorar seu coeficiente de amortecimento (ζ). Finalizando estas etapas serão encontrados novos parâmetros de sintonia para a malha de controle de vazão.

Os parâmetros iniciais do controlador *PI* são $K_p = 0,40$ e $T_i = 30$, estes parâmetros são os parâmetros atuais da malha.

Aplica-se um sinal degrau na subida da variável de controle, para minimizar as variações de pico do processo, pois quanto maior for o pico, maiores serão as variações na consistência da massa de papel.

Para o cálculo foi dado um degrau no *Set Point* de 150 l/min para 200 l/min com o controle em manual. Em seguida voltou-se o controle para automático e acompanhou-se o desfecho do processo até atingir seu regime permanente em 5% do degrau.

Assim, encontra-se a FT do sistema a partir dos seguintes dados:

T_p = tempo de pico = 6,3 s;

$Y(t_p)$ = valor de Y no $T_p = 202,9$ l/min.

Substituindo estes valores nas equações 3.4 e 3.5 encontra-se os valores de ζ e ω_n respectivamente, sendo $\zeta = 0,8031$ e $\omega_n = 0,8368$

As equações 3.2 e 3.3 apresentam respectivamente a FT do sistema em malha aberta e a FT do sistema em malha fechada. Substituindo os valores de ζ e ω_n na equação 3.3 obtém-se:

$$FTs = \frac{0,70}{s^2 + 1,3441s + 0,70} \quad (4.1)$$

Assim, a equação 4.1 é portanto a função de transferência do sistema em malha fechada e pela sua análise conclui-se que o sistema é amortecido devido ao valor de $\zeta = 0,8031$, pois $\zeta = 1$ torna-se o sistema criticamente amortecimento, (OGATA, 1998). A Figura 4.2 apresenta a simulação da FT do sistema em malha fechada através do *software MatLab*[®] que é o degrau realizado no controle de vazão. O Apêndice A apresenta o algoritmo *PI* para esta simulação.

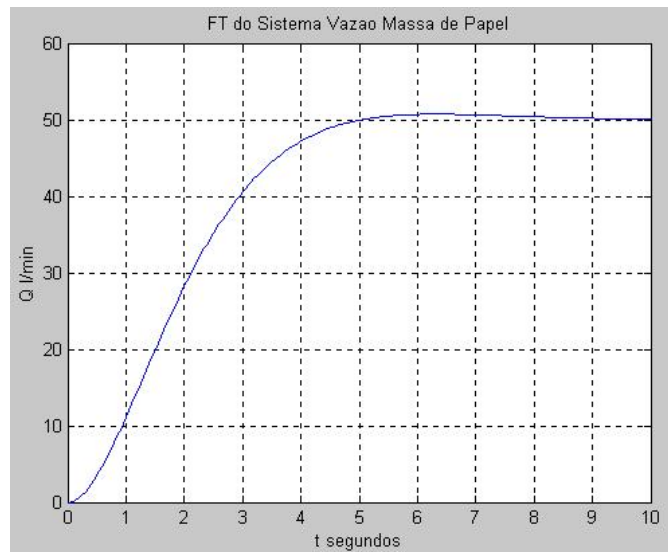


Figura 4.2 – Degrau na malha FIC-06

O controlador é regido pela equação 3.1 já apresentada no capítulo 3.

Para encontrar os novos parâmetros de sintonia *PI* é necessário encontrar a função de transferência do processo. A FT do sistema em malha aberta é igual a FT do processo com a aplicação do controlador. Conhecendo-se a equação do controlador e a FT do sistema, por manipulação algébrica obtém-se a FT do processo conforme apresentado na equação 4.2.

$$FTP = \frac{21}{12s^2 + 28,1292s + 1,3441} \quad (4.2)$$

Devido à necessidade de se aumentar o coeficiente de amortecimento (ζ), o novo projeto de sintonia tem como base um sistema com maior amortecimento e sem *overshoot*, ($\zeta = 0,87$). Para evitar alteração na *FT* do processo, deve-se encontrar o novo valor para ω_n através da equação 4.3:

$$2\omega_n\zeta = 1,3441 \quad (4.3)$$

Logo $\omega_n = 0,7725$.

Substituindo os valores de ζ e ω_n na equação 3.3 obtém-se a nova *FT* do sistema em malha fechada.

$$FTNS = \frac{0,597}{s^2 + 1,3441s + 0,597} \quad (4.4)$$

A Figura 4.3 apresenta a simulação da nova *FT* do sistema em malha fechada. Comparando esta Figura com a Figura 4.2, observa-se que além de aumentar o amortecimento eliminou-se o *overshoot*.

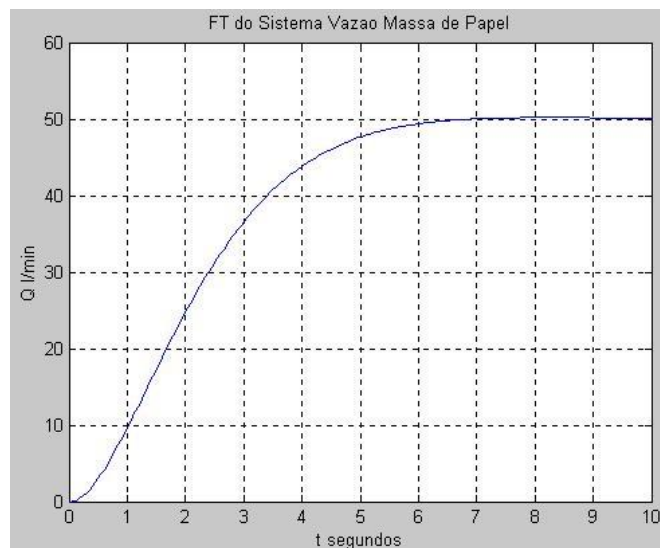


Figura 4.3 – *MatLab* simulando a malha FIC-06 sob controle *PI*

Conhecendo-se a nova *FT* do sistema, por manipulação algébrica obtém-se os valores do controlador. Executando esta etapa, além de provar a igualdade das *FTs* do processo, serão obtidos os seguintes parâmetros de sintonia: $K_p = 0,34$ e $T_i = 35,176$.

Analisando-se estes parâmetros nota-se que o sistema se tornou mais amortecido, pois diminuiu a ação do proporcional e aumentou a ação da integral para obter um coeficiente de amortecimento igual a 0,87. Se para a aplicação estudada fosse de interesse aumentar a velocidade de reação do processo sem se preocupar com o *Overshoot* do mesmo, bastaria diminuir o coeficiente de amortecimento. Para uma melhor análise e melhor ajuste fino do processo pode-se também calcular o novo tempo de pico do processo através da equação ???. O tempo de pico para a *FT* do sistema com os novos parâmetros de sintonia é igual a 8,25 segundos.

- **Sintonia Automática**

O segundo método de sintonia para o controle de vazão será com o auxílio do *software Delta Tune*[®] agregado ao sistema de controle da *Sonoco*, assim será possível comparar este método com o anterior para identificar a melhor técnica de sintonia.

Para iniciar a simulação é necessário atribuir um valor no campo *Step size*. Este valor é atribuído avaliando-se que, quanto maior o *Step size*, maior a modulação do inversor e da vazão no processo. A Figura 4.4 apresenta o campo *Step size* que será parametrizado em 7% a variação na rotação do inversor.

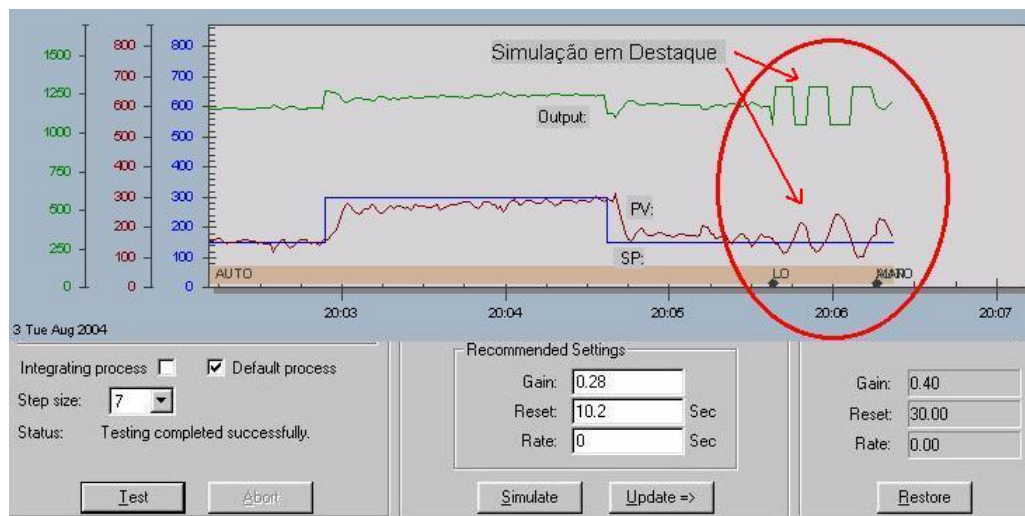


Figura 4.4 – *Delta Tune* simulando a malha FIC-06 sob controle *PI*

A Figura 4.4 apresenta o histórico da simulação em destaque. Ao alterar o botão *Test* o *Delta Tune* passa a malha para o modo Manual (*Lo*) e atua na variável do processo diminuindo a rotação da bomba, conseqüentemente diminui-se a vazão. Quando a vazão chega a proporção desejada pelo *Step size* aumenta-se a rotação da bomba até que a vazão aumente também de forma proporcional. Esta modulação ocorre até serem calculados os novos parâmetros do controlador, mas somente no ajuste fino é que será caracterizado o tipo de controle para o processo estudado, podendo ser amortecido ou não.

Para simular a melhora da sintonia e realização do ajuste fino habilita-se a função *Simulate*. A Figura 4.5 apresenta a tela do *software*.

A faixa dos possíveis parâmetros de sintonia recomendável aparece na parte superior da Figura e o ajuste fino é obtido com a escolha de um ponto desta região. Ao escolher um ponto o resultado da simulação aparece graficamente na parte inferior da Figura e também o desempenho correspondente. Faz-se uma busca nesta região até encontrar o ponto ideal, ou seja, que a simulação apresente um sobresinal igual a zero e o *IAE* o menor possível que é igual a 920,93 conforme apresentado na Figura 4.5.

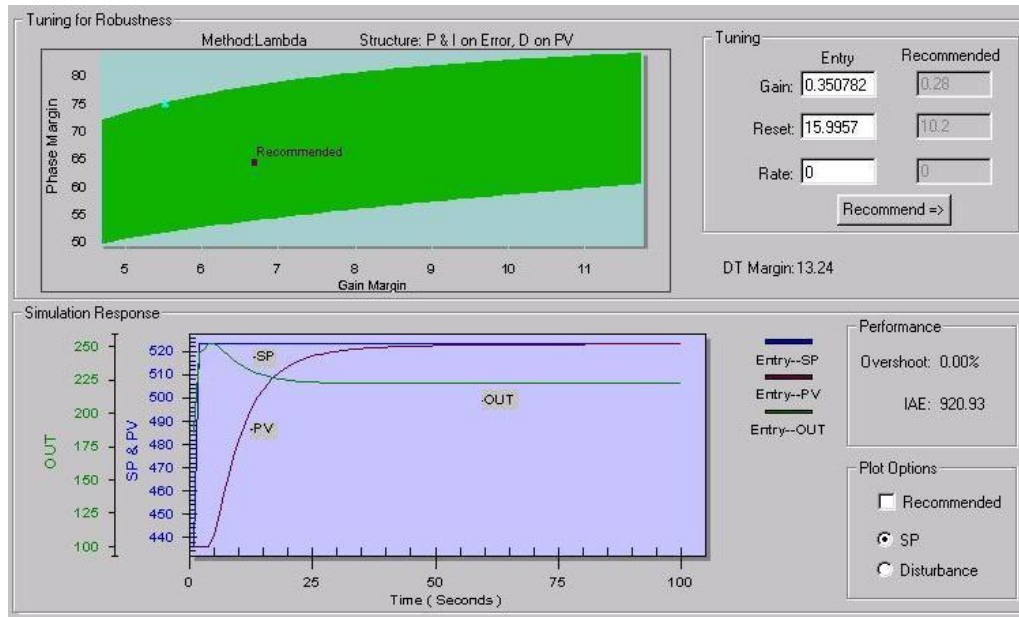


Figura 4.5 – Ajuste fino da sintonia *PI* no *Delta Tune*

O *software* permite utilizar outros métodos para sintonia, a figura 4.6 apresenta novos valores de sintonia através do método *Typical - PID*, por exemplo.

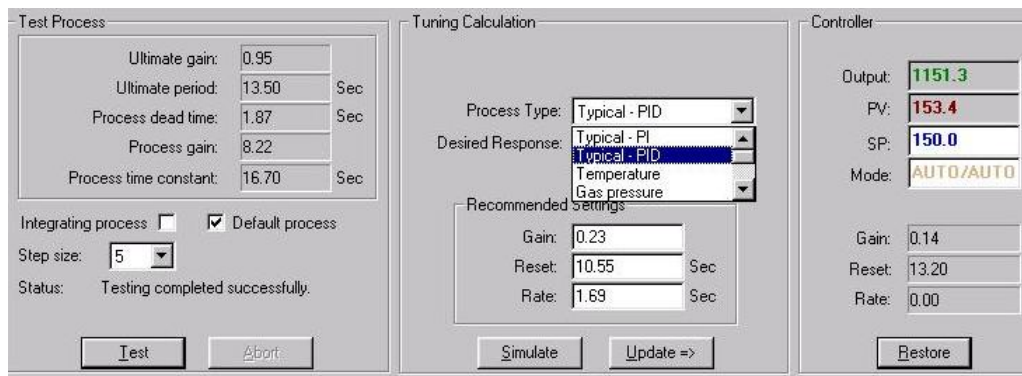


Figura 4.6 – Sintonia pelo método *PID*

Comparando o desempenho do *PI* com os diversos métodos de sintonia opcional do *software* chega-se a conclusão que o melhor método para esta aplicação é o *PI*.

- **Comparação entre a sintonia Manual e Automática**

Comparando a sintonia manual com a sintonia através do *Delta Tune* conclui-se que ambas as técnicas são precisas porém a sintonia através do *Delta Tune* tem a vantagem de estar *on-line* no processo o que proporciona a malha maior velocidade e precisão na sintonia.

A Figura 4.5 apresenta o melhor ajuste fino para o controle *PI* em relação as técnicas de sintonia apresentadas para a aplicação estudada.

4.2.2 Controle de vazão através do algoritmo Adaptativo

A sintonia manual utiliza-se dos mesmos passos da sintonia manual PI para encontrar a FT do sistema e projetar o ganho K_p e o tempo integral T_i . A diferença é que a sintonia adaptativa projeta o ganho e o tempo integral para duas regiões. A região 01 apresenta característica amortecida e a região 02 apresenta resposta rápida. Após encontra-se as equações para K_p e T_i , onde os mesmos irão variar linearmente em função da diferença entre o ponto de operação (SP) e a (PV).

Este controle será parametrizado para garantir que a menor diferença entre SP e PV possibilite que o controle tenha uma característica amortecida e a maior diferença uma característica rápida. Por se tratar de um processo não-linear, a característica amortecida do mesmo será projetada em função da menor consistência, pois é no menor valor de consistência que ocorrem mais variações.

A Tabela 4.2 apresenta a sintonia para as duas regiões do controle adaptativo sendo o desempenho final a resultante das duas regiões.

Tabela 4.2 – Sintonia Manual do Controle Adaptativo

Controlador	K_p	T_i
Região 01	0,24	40,0
Região 02	0,54	30,0

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam respectivamente a variação do K_p e T_i em função da diferença da PV ao SP (erro).

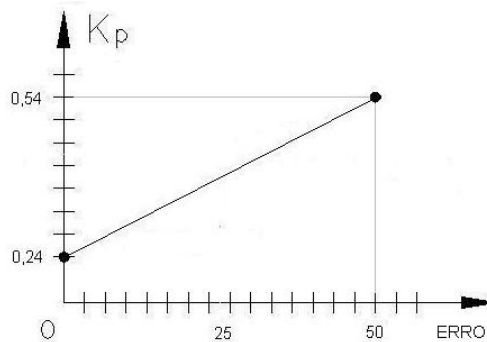


Figura 4.7 – Característica do K_p em função do erro

Através das Figuras 4.7 e 4.8 é possível encontrar as equações da reta para K_p e T_i que são apresentadas a seguir:

$$K_p = \frac{0,30}{50}x + 0,24 \quad (4.5)$$

$$T_i = \frac{-10}{50}x + 40 \quad (4.6)$$

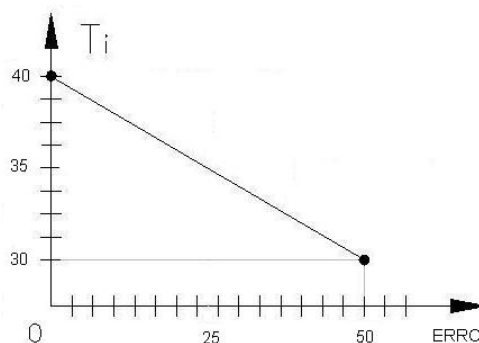


Figura 4.8 – Característica do T_i em função do erro

As equações representam a sintonia K_p e T_i do controle adaptativo. A Figura 4.9 apresenta o desempenho resultante desta sintonia para o controle adaptativo.

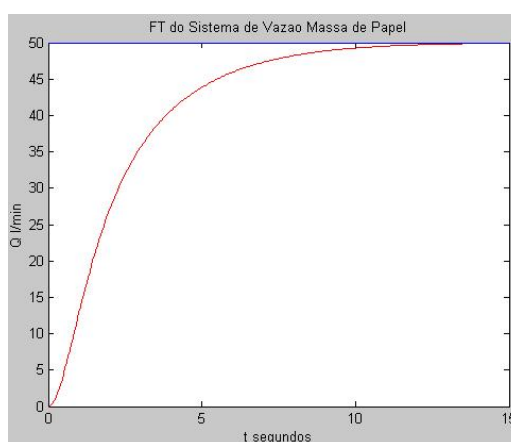


Figura 4.9 – Sintonia manual para o controle adaptativo

4.2.3 Controle de vazão através da Lógica Fuzzy

- **Sintonia Manual**

A Primeira técnica de sintonia para o controle *fuzzy* será manual também com o auxílio do *software MatLab*. A sintonia *fuzzy* utiliza-se dos mesmos passos da sintonia manual *PI* para encontrar a *FT* do sistema e projetar o ganho K_p e o tempo integral T_i . A diferença é que a sintonia *fuzzy* projeta o ganho e o tempo integral para dois valores de outra variável além da vazão, que neste caso é a consistência. Após constrói equações para K_p e T_i , onde os mesmos irão variar linearmente em função da consistência.

Nesta aplicação será projetado o ganho e o tempo integral para os valores de 5% e 3% de consistência. Como já sintonizado na sintonia manual do *PI* para consistência de 5% a equação 4.7 apresenta a *FT* do sistema em malha fechada.

$$FTNS = \frac{0,597}{s^2 + 1,3441s + 0,597} \quad (4.7)$$

A Figura 4.10 apresenta a simulação da FT do sistema para a consistência de 5%.

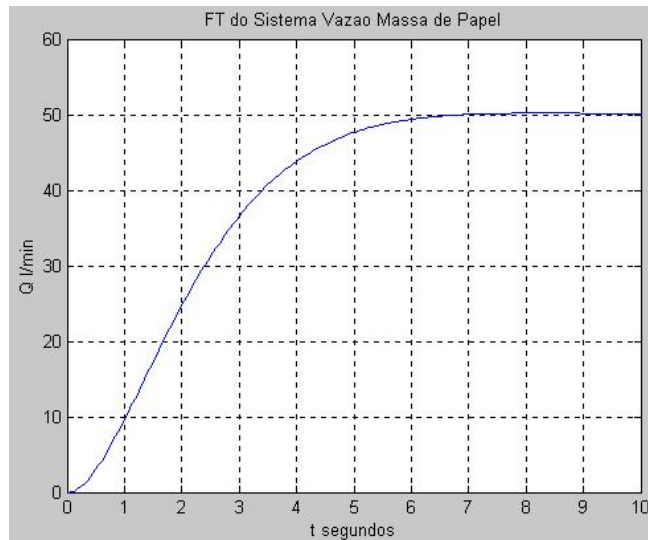


Figura 4.10 – Simulação *Fuzzy* para consistência de 5%

A Figura 4.11 apresenta a simulação da FT do sistema para a consistência de 3% e a Tabela 4.5 apresenta os valores de K_p e T_i para as consistências de 3% e 5%.

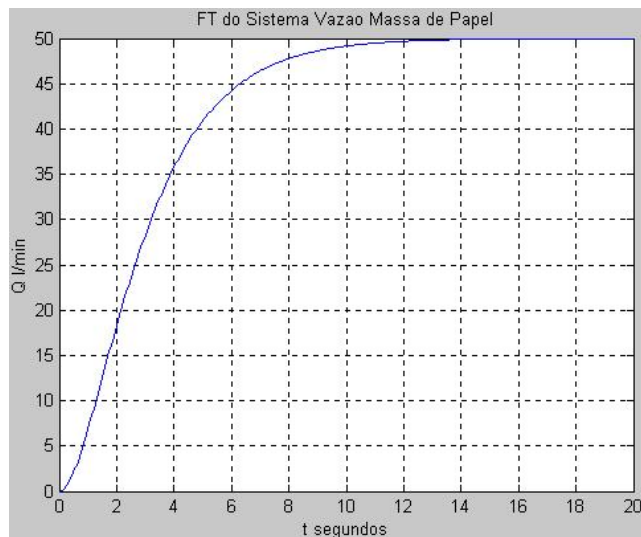


Figura 4.11 – Simulação *Fuzzy* para consistência de 3%

O algoritmo da sintonia *fuzzy* apresentado no Apêndice B depende do valor da consistência porém o mesmo foi projetado para receber o valor da consistência do processo e se posicionar nos valores de K_p e T_i que variam linearmente entre as regiões projetadas.

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam respectivamente a variação do K_p e T_i em função da consistência.

Tabela 4.3 – Sintonia do Controle *Fuzzy*

Valor da Consistência	K_p	T_i
3%	0,24	40,0
5%	0,34	35,0

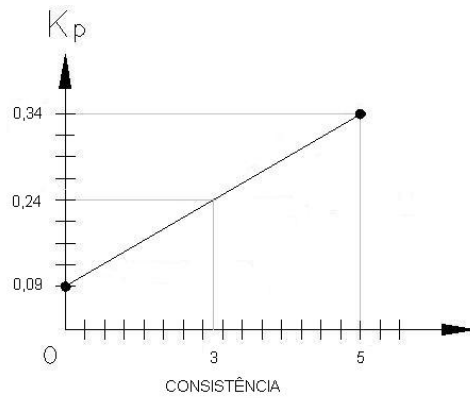


Figura 4.12 – Característica do K_p em função da consistência

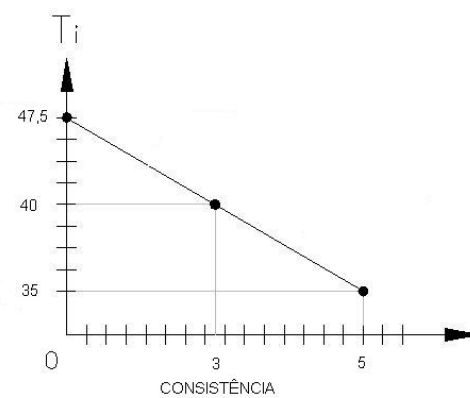


Figura 4.13 – Característica do T_i em função da consistência

Através das Figuras 4.12 e 4.13 é possível encontrar as equações da reta para K_p e T_i que são apresentadas a seguir:

$$K_p = \frac{0,1}{2}x + 0,09 \quad (4.8)$$

$$T_i = \frac{-5}{2}x + 47,5 \quad (4.9)$$

As equações representam a sintonia K_p e T_i do controle *fuzzy*.

• Sintonia Automática

O segundo método de sintonia para o controle de vazão será com o auxílio do *software Delta Tune*[®]. Assim, para iniciar o controle *fuzzy* nesta malha é necessário substituir o bloco principal *PI* da malha pelo bloco de lógica *fuzzy*. A configuração deste bloco inicia-se com uma sintonia padrão, sua parametrização ocorre através do ajuste de três campos distintos (*Error*, *Delta Error* e *Output*). Esta sintonia pode ser realizada por tentativa e erro ou através do *Delta Tune*.

A Figura 4.14 apresenta o histórico da simulação em destaque. Ao alterar o botão *Test*, altera-se a malha para o modo Manual (*Lo*) e a variável do processo é atuada diminuindo-se a rotação da bomba, conseqüentemente diminui-se a vazão. Quando a vazão chega à proporção desejada, aumenta-se a rotação da bomba até que a vazão aumente também de forma proporcional. Esta modulação ocorre até o sistema conseguir calcular os novos parâmetros do controlador, mas somente no ajuste fino que será caracterizado o tipo de controle para o processo estudado, podendo ser amortecido ou não.

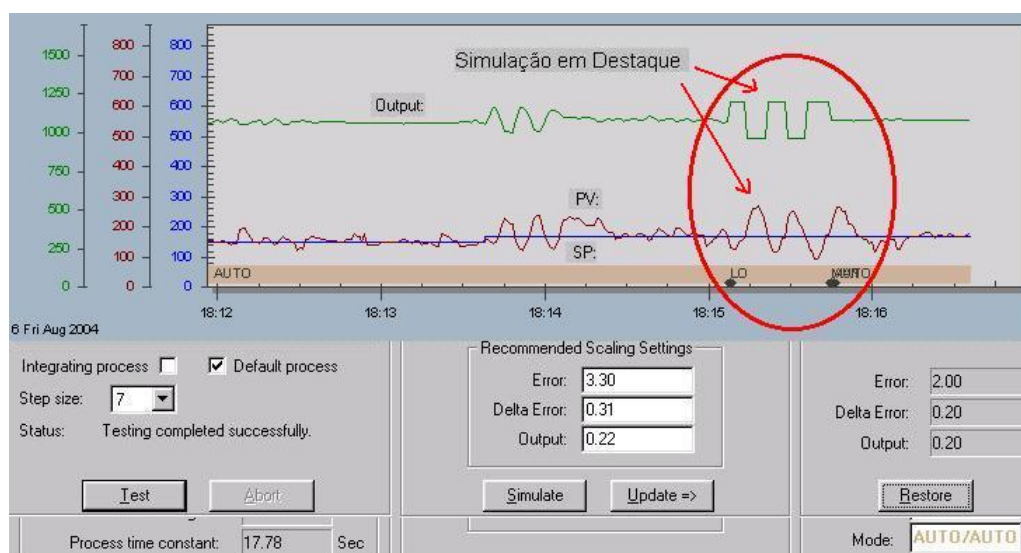


Figura 4.14 – *Delta Tune* simulando a malha FIC-06 sob controle *fuzzy*

Para simular a melhora da sintonia e a realização do ajuste fino habilita-se a função *Simulate*. Na Figura 4.15 é apresentada a tela para tal simulação.

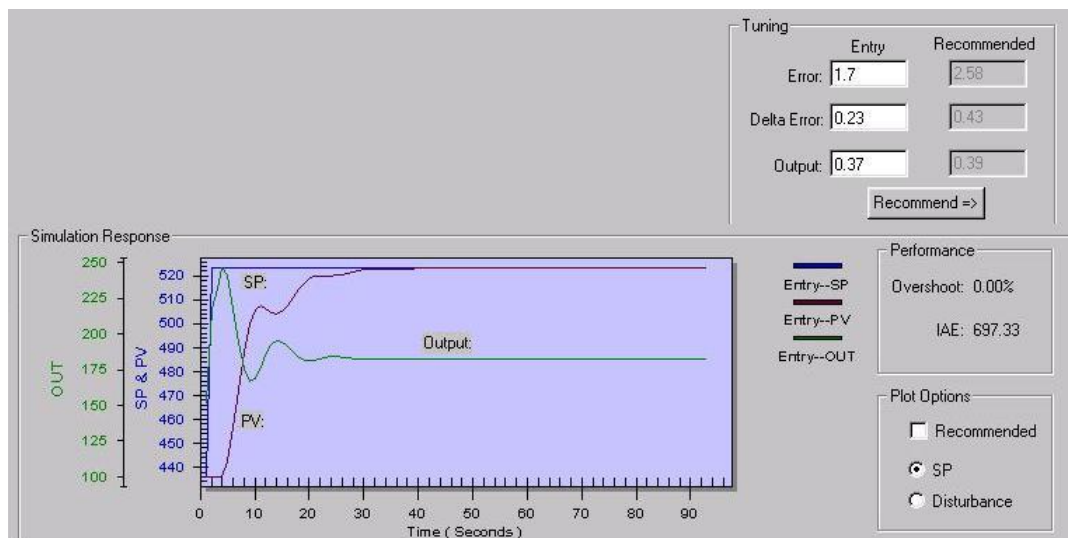


Figura 4.15 – Ajuste fino da sintonia fuzzy no *Delta Tune*

Observa-se que a simulação fornece graficamente a atuação das variáveis em função do tempo e é dado automaticamente o desempenho do sistema através da integral do $IAE = 1100,84$ e o $Overshoot = 1,99\%$.

Para realizar o ajuste fino é necessário variar os três campos distintos (*Error*, *Delta Error* e *Output*). Assim,

- Quanto maior for o *Error*, maior será o amortecimento da variável;
- Quanto menor for o *Delta Error*, maior será a oscilação da variável;
- Quanto maior for o *Output*, maior será a oscilação da variável.

A Figura 4.15 apresenta o controlador com o melhor desempenho que é permanecer sem sobresinal e com o menor valor possível para IAE que é igual a 697,33, sendo assim é possível verificar que com os novos parâmetros diminui-se tanto o valor de pico quanto a área de atuação da variável fora do ponto de operação.

• Comparação entre a sintonia Manual e Automática

Comparando a sintonia manual com a sintonia através do *Delta Tune* conclui-se que ambas as técnicas são satisfatórias porém a sintonia automática tem a vantagem de estar *on-line* no processo. A sintonia automática torna-se mais precisa e veloz, pois a técnica manual torna-se dependente de outro sinal além da vazão que é a consistência da massa de papel.

A Figura 4.15 apresenta o melhor ajuste fino para o controle fuzzy em relação as técnicas de sintonia apresentadas para a aplicação estudada.

4.2.4 Comparação entre as técnicas *PI*, adaptativo e *fuzzy*

A seguir será apresentada a comparação entre a técnica de controle *PI*, *fuzzy* e adaptativo para o controle de vazão não-linear. A Figura 4.16 apresenta a resposta do controle adaptativo comparado com a sintonia *PI* que também foi utilizada para a sintonia manual do controle *fuzzy*.

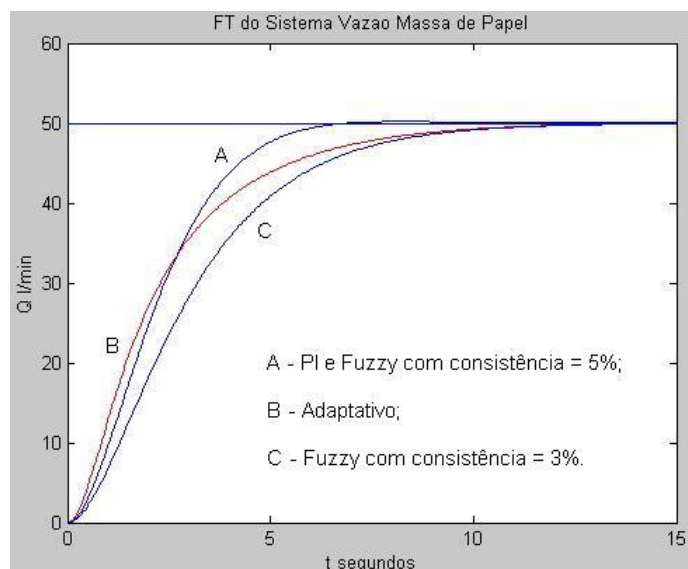


Figura 4.16 – Comparação da sintonia adaptativa, *PI* e *fuzzy*

Observa-se na Figura 4.16 que a resposta B na cor vermelha é o controle adaptativo, a resposta A é a sintonia *PI* que também representa a sintonia *fuzzy* para consistência de 5%, por último a resposta C, representa a sintonia *fuzzy* para consistência de 3%. Através desta Figura pode-se concluir que o controle adaptativo tem a resposta inicial mais rápida e ao se aproximar do *SP*, o mesmo se mantém com a característica amortecida que é a característica projetada para a condição de maior variação na consistência.

Assim, o controle adaptativo garante que para a menor diferença entre *SP* e *PV* o controle tenha uma característica amortecida e a maior diferença uma característica rápida, pois este controle supera os demais por tratar a malha com dois comportamentos sem alterar o resultado final.

Como o controle adaptativo foi desenvolvido depois da alteração no processo de controle de vazão tornando-o linear, não foi possível aplicar o mesmo no processo *on-line*. A seguir segue comparações entre *fuzzy* e *PI* para a sintonia automática e também aplicações no processo *on-line*.

Como o objetivo foi manter zero de *overshoot* e diminuir ao máximo a área de atuação da variável fora do ponto de operação *IAE*, observa-se a comparação na Tabela 4.4.

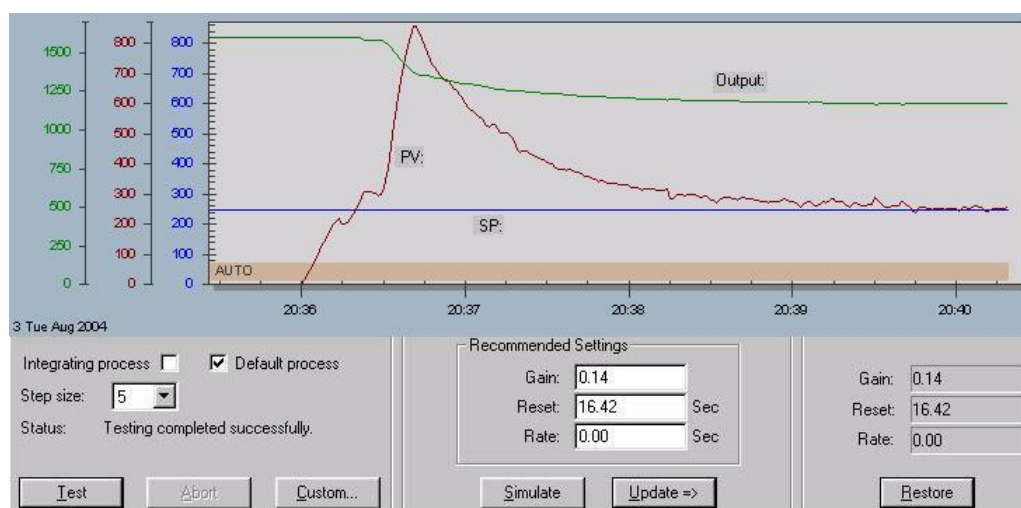
Comparando os desempenhos conclui-se que para esta aplicação onde no intervalo de tempo em que o processo se manteve linear o controle em Lógica *Fuzzy* é mais eficiente, pois mantém zero de *overshoot* com o menor *IAE*.

No período destas análises não ocorreram variações no processo, sendo assim neste período o

Tabela 4.4 – Comparação entre *fuzzy*, *PI* e *PID* para controle de vazão

Tipo de controlador	<i>overshoot</i>	<i>IAE</i>
<i>PI</i>	0,00	920,93
<i>PID</i>	0,24	1403,94
<i>Fuzzy</i>	0,00	697,33

processo apresentou um comportamento de processo linear. As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam dois gráficos para comparação de atuação do controle *PI* no mesmo processo, mas com consistências diferentes, a Figura 4.17 foi simulada tendo o processo uma consistência aproximada de 5%, já a Figura 4.18 foi simulada alguns dias depois tendo o processo uma consistência aproximada de 3%. O teste feito apresenta a mesma sintonia para as duas Figuras.

**Figura 4.17** – Atuação do controle *PI* para consistência de 5%

O teste realizado foi para minimizar outro problema desta malha, por não existir controle de nível no *TM-06* faz-se necessário parar a bomba para recuperação do nível. Quando tal procedimento é realizado, o controle, que atua na rotação da bomba, aumenta ao máximo a rotação da mesma. Após um intervalo, o nível se recupera e a bomba é ligada novamente. Assim, o inversor atua para corrigir a vazão com a rotação máxima, provocando um grande sobresinal na vazão para depois estabilizar.

Observa-se que na Figura 4.17 a variável atingiu o pico máximo de 820 l/min após 45 segundos e se estabilizou após um intervalo de tempo de 3,75 minutos mantendo as características da sintonia projetada, pois a rotação do motor foi modulada de forma lenta para evitar oscilações. Na Figura 4.18 a variável atingiu o pico máximo de 600 l/min após 37 segundos e não sofreu estabilização, pois não manteve as características da sintonia projetada alterando a rotação do motor de forma rápida causando oscilações no sistema impossibilitando o regime permanente.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam dois gráficos para comparação de atuação do controle *fuzzy* no mesmo processo, mas com consistências diferentes, a Figura 4.19 foi simulada tendo o processo uma consistência aproximada de 5%; já na Figura 4.20 a simulação quando o processo tinha 3% de

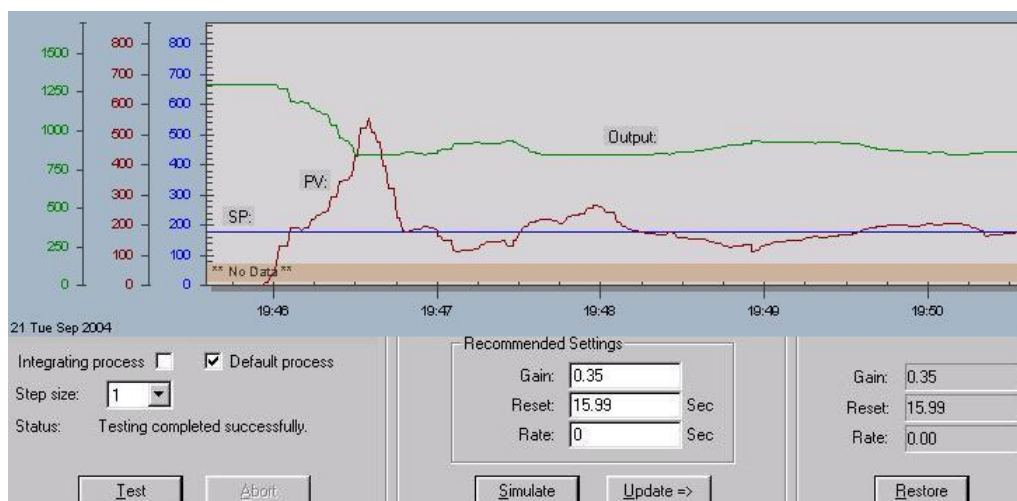


Figura 4.18 – Atuação do controle *PI* para consistência de 3%

consistência, aproximadamente. O teste feito apresenta a mesma sintonia para as duas Figuras.



Figura 4.19 – Atuação do controle *fuzzy* para consistência de 5%

O teste para o controle em Lógica *fuzzy* foi idêntico ao teste para o controle *PI*. Observa-se que na Figura 4.19 a variável atingiu o pico máximo de 840 l/min após 42 segundos e alcançou a estabilidade após um intervalo de 3 minutos mantendo as características da sintonia projetada. Na Figura 4.20 a variável atingiu o pico máximo de 820 l/min após 40 segundos e alcançou a estabilidade após um intervalo de 2 minutos mantendo também as características da sintonia projetada.

A vantagem da técnica que aplica lógica *fuzzy* é que uma vez projetado o controlador, mesmo diante de variações, as características do sistema são mantidas. Esta vantagem supera o controle *PI* que é projetado em função do processo, ou seja, se houver alteração no processo, ocorrerá alteração na característica projetada sendo então necessário realizar uma nova sintonia. Na comparação dos testes, observa-se que no controle *fuzzy* são mantidas as características para as duas simulações, já o controle *PI* não mantém a característica projetada, pois variando a consistência altera a *FT* do

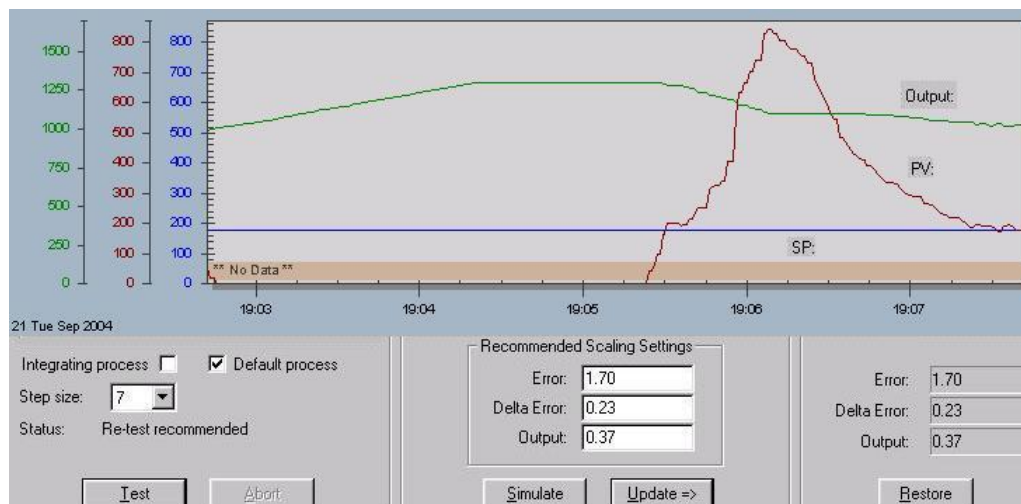


Figura 4.20 – Atuação do controle *fuzzy* para consistência de 3%

processo anulando o projeto. Observa-se na Figura 4.21 a resposta ao sistema projetado para o *PI* controlando a vazão com uma consistência de 3%.

Observa-se na Figura 4.21 que o desempenho do controle *PI* para esta nova condição do processo alterou-se, logo o valor do IAE ficou igual a 1613,34 e com sobresinal de 16,69%.

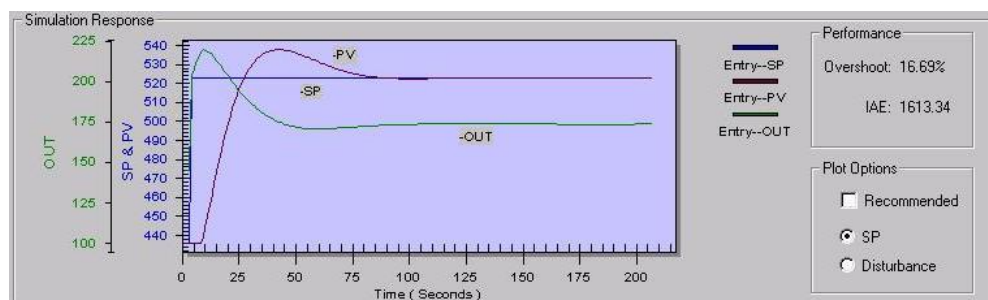


Figura 4.21 – Simulação do controle *PI* para consistência de 3%

Ao simular o controle em lógica *fuzzy* para consistência de 3% obtém-se o mesmo desempenho conforme apresentado na Figura 4.22.

Para conseguir realizar o controle de vazão de massa de papel pela técnica *PI* seria necessário monitorar esta malha e constantemente realizar novas sintonias. No entanto só seria possível se não existisse variação de consistência.

Conclui-se que para atingir a melhor eficiência no controle de vazão quando não-linear a melhor técnica de controle neste caso é o controle em Lógica *Fuzzy*.

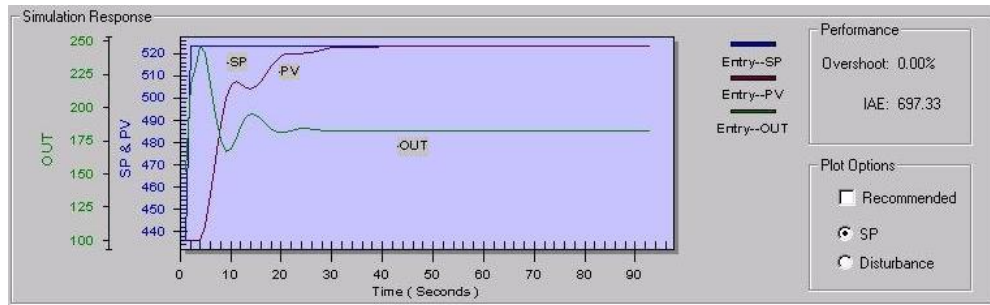


Figura 4.22 – Simulação do controle *fuzzy* para consistência de 3%

4.3 Controle de Nível

A segunda aplicação estudada se refere a um controle de nível de água. Nesta aplicação não existem variações que possam influenciar na linearidade da malha e neste processo será feita uma comparação entre as técnicas de controle *PI*, *fuzzy* e Adaptativo. A Figura 4.23 apresenta o diagrama esquemático do processo.

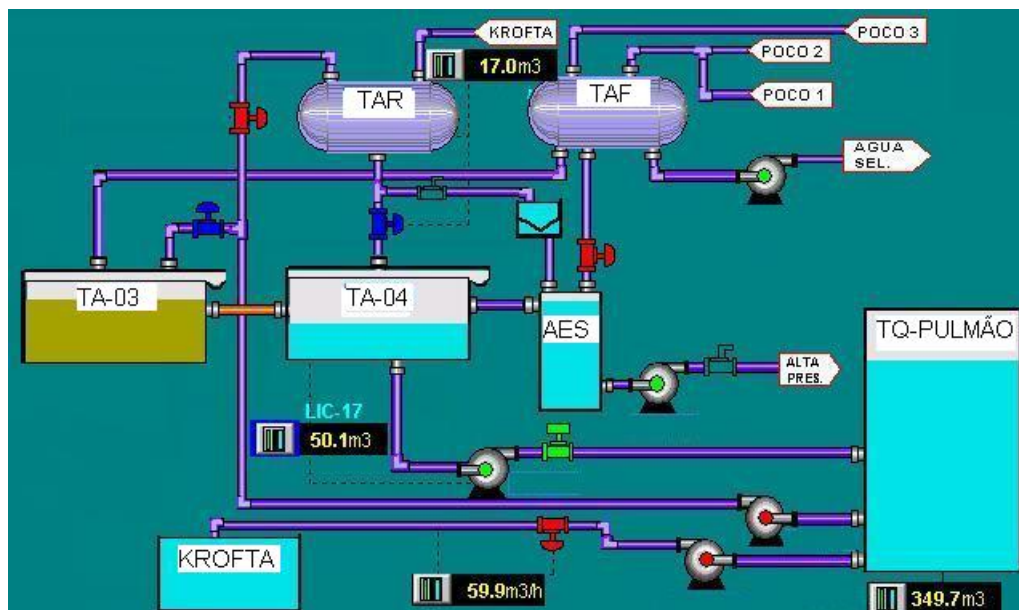


Figura 4.23 – Diagrama esquemático do processo de nível

O controle de nível é realizado na saída do tanque de água 04 (TA-04) e os equipamentos envolvidos para o controle de nível são três:

- Transmissor de Nível;
- Controlador;
- Inversor de Frequência.

Por ser um processo contínuo toda água que entra no TA-04 vai para o tanque Pulmão, o TA-04 recebe água do TAR, TA-03 e AES. É necessário manter nível de água neste tanque para flexibilizar ao processo a realização alguma manobra entre os tanques em caso manutenção e para evitar cavitação na bomba. O controle é realizado através da rotação da bomba, e apresenta seu ponto de operação em $50 m^3$.

O transmissor de nível está instalado na lateral do tanque na altura da sucção da bomba de água. A escala do transmissor é de 0 a $124 m^3$.

Através da medição de nível, o inversor é modulado para estabilizar ao máximo o nível desejado, pois o objetivo é eliminar ao máximo a variação de nível através do controle.

Nesta malha será aplicada a sintonia pelo método manual com o auxílio do *software MatLab* e pelo *software Delta Tune* para o controle adaptativo, para os demais controles só será realizada a sintonia pelo *Delta Tune*, pois como visto anteriormente, no controle de vazão a precisão e velocidade do método é superior ao manual.

4.3.1 Controle de nível através do algoritmo PI

Por se tratar de um processo crítico é importante manter a característica de amortecimento. O nível deverá se manter entre 45 e $70 m^3$ durante o teste. Terminado o teste, o nível deverá ser mantido em regime permanente em torno do ponto de operação para aplicação.

Como o objetivo é manter a característica amortecida, nesta aplicação será projetado o controle para manter zero de *overshoot* e com o menor *IAE* possível, a Figura 4.24 apresenta a tela do *software* para tal simulação.

A Figura 4.24 apresenta o controlador com o melhor desempenho tendo *IAE* igual a 1476,22 e sem sobresinal para um K_p de 4,52 e T_i de 276.

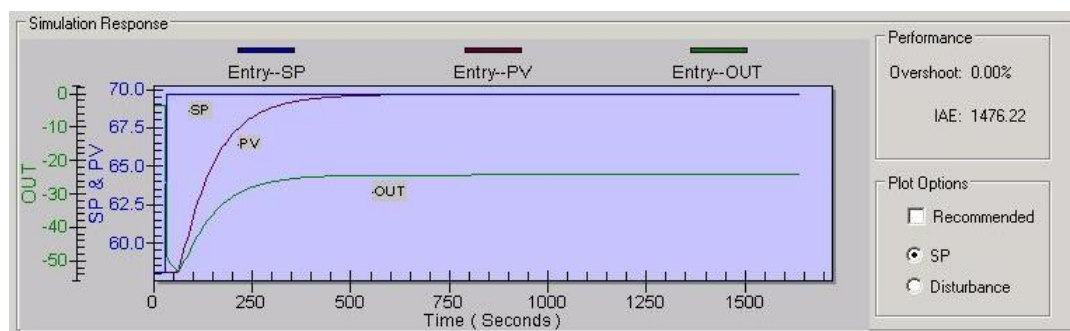


Figura 4.24 – Ajuste fino da sintonia PI no *Delta Tune*

4.3.2 Controle de nível através do algoritmo Adaptativo

- Sintonia Manual

A sintonia manual utiliza-se dos mesmos passos da sintonia manual PI para encontrar a FT do sistema e projetar o ganho K_p e o tempo integral T_i . A diferença é que a sintonia adaptativa projeta o ganho e o tempo integral para uma condição amortecida e outra condição com resposta rápida. Após encontra-se as equações para K_p e T_i , onde os mesmos irão variar linearmente em função da diferença entre o ponto de operação (SP) e a (PV).

Este controle será parametrizado para garantir que a menor diferença entre SP e PV possibilite que o controle tenha uma característica amortecida e a maior diferença uma característica rápida. Estes valores variam linearmente entre os limites máximos e mínimos do K_p e T_i .

A Tabela 4.5 apresenta a sintonia para as duas regiões do controle adaptativo sendo o desempenho final a resultante das duas regiões.

Tabela 4.5 – Sintonia Manual do Controle Adaptativo

Controlador	K_p	T_i
Região 01	4,00	300,0
Região 02	11,00	250,0

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam respectivamente a variação do K_p e T_i em função da diferença da PV ao SP .

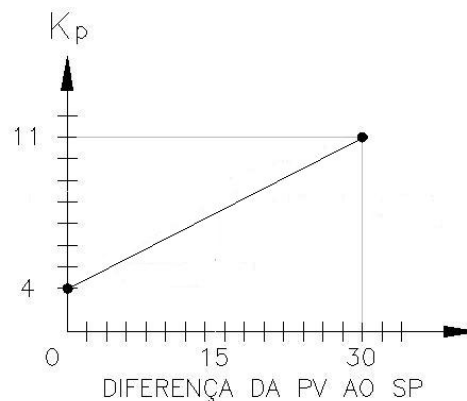


Figura 4.25 – Característica do K_p em função da diferença da PV ao SP

Através das Figuras 4.25 e 4.26 é possível encontrar as equações da reta para K_p e T_i que são apresentadas a seguir:

$$K_p = \frac{7}{30}x + 4 \quad (4.10)$$

$$T_i = \frac{-5}{3}x + 300 \quad (4.11)$$

As equações representam a sintonia K_p e T_i do controle adaptativo. A Figura 4.27 apresenta o



Figura 4.26 – Característica do T_i em função da diferença da PV ao SP

desempenho resultante desta sintonia para o controle adaptativo.

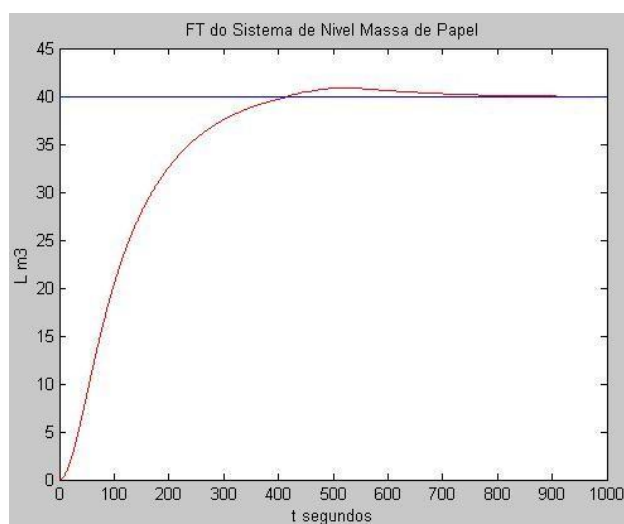


Figura 4.27 – Sintonia manual para o controle adaptativo

• Sintonia Automática

Para implementar o controle adaptativo na malha de controle foram acrescentados ao bloco lógico PI um bloco de cálculo com as equações do ganho e do tempo integral já explicadas na sintonia manual.

Para realizar a sintonia, monitora-se a malha de controle no *software*. No *software* serão visualizados procedimentos iguais ao da sintonia PI, pois o controle Adaptativo continua usando o algoritmo PI como controle principal, então, será sintonizado duas regiões, a região 01 com característica amortecida e a região 02 com característica rápida.

A Tabela 4.6 apresenta a sintonia para as duas regiões do controle adaptativo sendo o desempenho final a resultante das duas regiões visando o menor *overshoot* com o menor *IAE*.

Tabela 4.6 – Sintonia Automática do Controle Adaptativo

Controlador	<i>overshoot</i>	<i>IAE</i>	K_p	T_i
Região 01	0,00	1808,12	4,00	300,0
Região 02	12,35	760,74	11,00	250,0
Desempenho Final	0,00	760,74	4 à 11	250 à 300

Na sintonia através do *Delta Tune* já é possível visualizar o desempenho da malha conforme apresentado na Tabela 4.6.

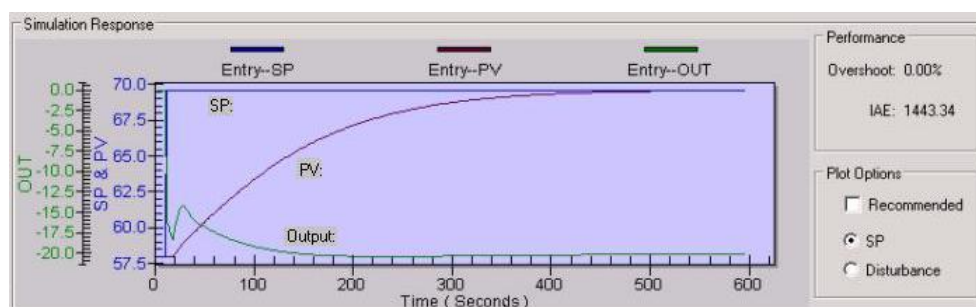
• Comparação entre a sintonia Manual e Automática

Ambas as técnicas são satisfatórias. A sintonia manual atinge o mesmo objetivo da sintonia automática com a desvantagem de se levantar dados para cálculo da FT do sistema e só então projetar o controlador da malha, porém esta técnica se torna eficiente para sintonia quando não se tem um software de sintonia.

4.3.3 Controle de nível através da Lógica Fuzzy

Para iniciar o controle *fuzzy* nesta malha é necessário substituir o bloco principal da malha pelo bloco de lógica *fuzzy*. A configuração deste bloco inicia-se com uma sintonia padrão, sua parametrização ocorre através do ajuste de três campos distintos (*Error*, *Delta Error* e *Output*). Esta sintonia pode ser realizada por tentativa e erro ou através do *Delta Tune*.

A Figura 4.28 apresenta a tela do *software* com o ajuste fino da malha.

**Figura 4.28** – Ajuste fino da sintonia *fuzzy* no *Delta Tune*

Esta Figura apresenta o melhor desempenho para a malha que é permanecer sem sobresinal e com o menor valor possível para *IAE* que é igual a 1443,00, tendo o valor do *error* em 16, o *delta error* em 0,17 e o valor de *output* em 2. Assim é possível verificar que com os novos parâmetros diminui-se tanto o valor de pico quanto à área de atuação da variável fora do ponto de operação.

4.3.4 Comparação entre as técnicas *PI*, Adaptativo e *fuzzy*

A seguir será apresentada a comparação entre a técnica de controle *PI*, *fuzzy* e adaptativo para o controle de nível linear. A Figura 4.29 apresenta a resposta do controle adaptativo comparado com a sintonia *PI* e *fuzzy*.

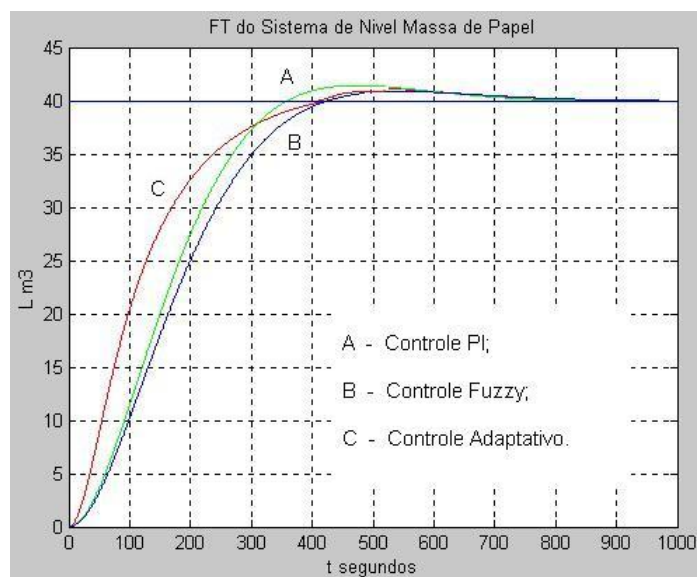


Figura 4.29 – Comparação da sintonia adaptativa, *PI* e *fuzzy*

Observa-se na Figura 4.29 que a resposta C na cor vermelha é o controle adaptativo, a resposta A em verde é o controle *PI* e a resposta B na cor azul é o controle *fuzzy*. Através desta Figura pode-se concluir que o controle adaptativo tem a resposta inicial mais rápida e ao se aproximar do *SP*, o mesmo se mantém com a característica amortecida que é a característica projetada para todos os controles.

Assim, a diferença é que o controle adaptativo garante que para a menor diferença entre *SP* e *PV* o controle tenha uma característica amortecida e a maior diferença uma característica rápida, pois este controle supera os demais por tratar a malha com dois comportamentos sem alterar o resultado final.

O objetivo foi manter zero de *overshoot* e diminuir ao máximo a área de atuação da variável fora do ponto de operação *IAE*, observa-se a seguir a comparação realizada no processo on-line apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Comparação entre *PI*, adaptativo e *fuzzy* para controle de nível

Tipo de controlador	<i>IAE</i>
<i>PI</i>	1476,22
Adaptativo	760,74
<i>Fuzzy</i>	1443,00

O bloco *PI* e o *fuzzy* foram projetados com característica amortecida, ou seja, para qualquer

variação no nível do tanque a resposta através da rotação da bomba será amortecida. O controle Adaptativo foi projetado para assumir a mesma característica amortecida do bloco *PI* e *fuzzy* quando a diferença entre *PV* e *SP* for mínima, mas ao aumentar a diferença entre ponto de operação e nível a característica do sistema se alterará deixando o sistema mais rápido, ou seja, quando o sistema está próximo ao ponto de operação, os controles são iguais e quando for necessário dar um degrau no ponto de operação por exemplo o controle adaptativo assumirá outra característica fazendo com que a malha chegue ao novo *SP* mais rápido.

A seguir será apresentada a resposta dos três tipos de controle para a situação de parada. Como existem muitas malhas de controle, o operador desliga as bombas e não altera o controle para manual. Conseqüentemente o sinal recebido pelo controle é de aumento de nível, desta forma automaticamente aumenta-se a rotação até seu valor máximo e o nível do tanque continua aumentando. No momento em que se liga a bomba o controle está com a rotação máxima, após aproximar-se o valor do nível ao *SP* os controles atuam em função da característica projetada para diminuir a rotação da bomba e conduzir a malha ao regime permanente.

A Tabela 4.8 apresenta o resultado da comparação entre as três técnicas para a situação de parada.

Tabela 4.8 – Comparação entre *PI*, adaptativo e *fuzzy* para controle de nível *on-line*

Tipo de controlador	tempo para regime	rampa de desaceleração	<i>overshoot</i>
<i>PI</i>	14,0 min	6,0 min	20%
Adaptativo	9,0 min	2,5 min	5%
<i>Fuzzy</i>	10,0 min	4,2 min	15%

Através da Tabela conclui-se que a técnica de controle Adaptativo é superior às técnicas de controle *fuzzy* e *PI*, pois levou o menor tempo para atingir o regime permanente com o menor *overshoot*.

4.4 Controle de Consistência

A ultima aplicação estudada é o controle de consistência de massa de papel linear. Nesta aplicação não existem variações que possam influenciar na linearidade da malha; neste processo será feita uma comparação entre a técnica de controle *PI*, *fuzzy* e adaptativo. A Figura 4.30 apresenta o diagrama esquemático do processo.

O controle de consistência é realizado na saída do tanque de massa 03 (TM-03) e os equipamentos envolvidos para o controle de consistência são três:

- Transmissor de Consistência;
- Controlador;
- Válvula eletropneumática.



Figura 4.30 – Diagrama esquemático do processo de consistência

Por ser um processo contínuo toda massa de papel que entra no TM-03 vai para o TM-04 passando pelos refinadores para refino da massa. É necessário manter o nível no TM-03 para diminuir variações na consistência da massa de papel. Este tanque (TM-03) serve também para flexibilizar o processo quando é necessário realizar alguma manutenção e evitar cavitação da bomba de massa. A massa de papel contida no TM-03 possui uma consistência acima de 4,2%. O controle é realizado através de uma válvula que interliga a tubulação de água com a tubulação de massa na sucção da bomba na saída do TM-03, este controle apresenta o ponto de operação em 4,2%.

O transmissor de consistência está instalado após a bomba de massa do TM-03. A escala do transmissor é de 2,5 a 6,0% e a consistência mínima a ser mantida é de 3,8%. Através da medição de consistência pelo transmissor, a válvula é modulada com o objetivo de estabilizar a consistência no ponto de operação.

Nesta malha será aplicada a sintonia pelo método do *software Delta Tune*, pois como visto anteriormente, no controle de vazão a precisão e velocidade do método é superior ao manual.

4.4.1 Controle de consistência através do algoritmo *PI*

Por se tratar de um processo crítico é importante manter a característica de amortecimento, pois variações na consistência afeta o controle de refino da massa. A consistência deverá ser mantida entre 4,0 à 4,3%. Finalizando o teste, a consistência deverá estar em regime permanente em torno do ponto de operação para aplicação.

Como o objetivo é manter a característica amortecida, nesta aplicação será projetado o controle para manter zero de *overshoot* e com o menor *IAE* possível, a Figura 4.31 apresenta a tela do *software* para tal simulação.

A Figura 4.31 apresenta o controlador com o melhor desempenho tendo *IAE* igual a 10,19 e sem sobresinal para um K_p de 2,02 e T_i de 48,5.

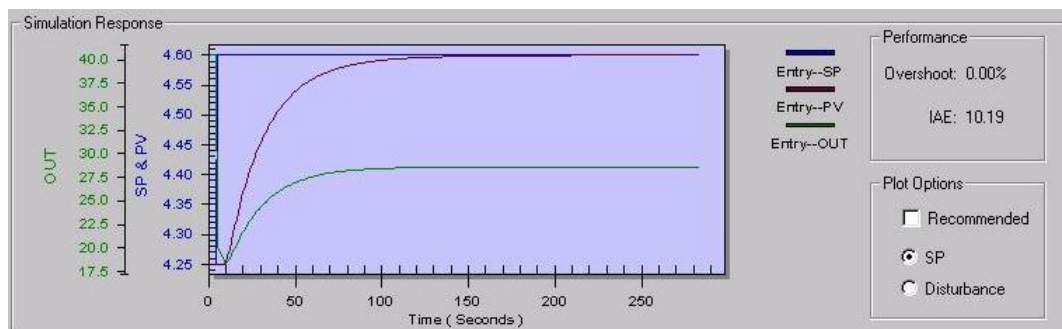


Figura 4.31 – Ajuste fino da sintonia *PI* no *Delta Tune*

4.4.2 Controle de consistência através do algoritmo Adaptativo

O controle adaptativo atua em função da diferença entre o ponto de operação (*SP*) e a (*PV*) que neste exemplo corresponde a consistência da massa de papel. Este controle será parametrizado para garantir que a menor diferença entre *SP* e *PV* possibilite que o controle tenha uma característica amortecida e a maior diferença uma característica rápida.

A Tabela 4.9 apresenta a sintonia para as duas regiões do controle adaptativo sendo o desempenho final a resultante das duas regiões visando o menor *overshoot* com o menor *IAE*.

Tabela 4.9 – Sintonia do Controle Adaptativo

Tipo de controlador	<i>overshoot</i>	<i>IAE</i>	K_p	T_i
Região 01	0,00	10,19	2,0	48,5
Região 02	8,19	7,11	4,5	38,5
Desempenho Final	0,00	7,11	2 à 4,5	38,5 à 48,5

4.4.3 Controle de consistência através da Lógica *Fuzzy*

Para iniciar o controle *fuzzy* nesta malha é necessário substituir o bloco principal da malha pelo bloco de lógica *fuzzy*. A configuração do bloco é a mesma realizada para o controle de vazão.

A Figura 4.32 apresenta a tela do *software* com o ajuste fino da malha.

Esta Figura apresenta o melhor desempenho para a malha que é permanecer sem sobresinal e com o menor valor possível para *IAE* que é igual a 26,12, tendo o valor do *error* em 8,75, o *delta error* em 0,2 e o valor de *output* em 0,9. Assim, verifica-se que estes parâmetros diminuí tanto o valor de pico quanto à área de atuação da variável fora do ponto de operação.

4.4.4 Comparação entre as técnicas *PI*, adaptativo e *fuzzy*

A seguir será apresentada a comparação entre a técnica de controle *PI*, *fuzzy* e adaptativo para o controle de consistência linear. O objetivo foi manter zero de *overshoot* e diminuir ao máximo a área

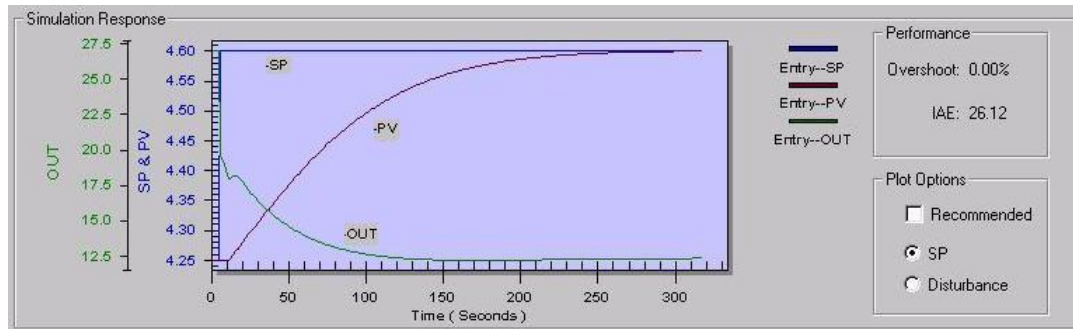


Figura 4.32 – Ajuste fino da sintonia *fuzzy* no *Delta Tune*

de atuação da variável fora do ponto de operação *IAE*, observa-se a seguir a comparação na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Comparação entre *PI*, adaptativo e *fuzzy* para controle de consistência

Tipo de controlador	<i>IAE</i>
<i>PI</i>	10,19
Adaptativo	7,11
<i>Fuzzy</i>	26,12

Comparando o desempenho quanto ao *IAE* apresentado na Tabela 4.10 conclui-se que para esta aplicação linear a simulação da técnica de controle adaptativo teve a melhor performance e a sintonia *PI* foi superior a sintonia *fuzzy*.

A Tabela 4.11 apresenta novas comparações no processo *on-line* entre as técnicas de controle.

Tabela 4.11 – Comparação entre *PI*, adaptativo e *fuzzy* para controle de consistência *on-line*.

Tipo de controlador	tempo de acomodação
<i>PI</i>	2,0 min
Adaptativo	1,7 min
<i>Fuzzy</i>	2,0 min

Através da Tabela 4.11 conclui-se que a técnica de controle adaptativo é superior às técnicas de controle *fuzzy* e *PI*, pois ela atua na malha com diversas características, ou seja, o controle Adaptativo faz com que a malha tenha respostas rápidas garantindo também ao processo a mesma estabilidade do controle convencional *PI* e da lógica *fuzzy*.

Devido à igualdade de estabilização apresentada na Tabela 4.11 entre os controles *fuzzy* e adaptativo, é necessário analisar outras vantagens agregadas a cada técnica para definir a melhor técnica de controle.

Uma vantagem de se trabalhar com o bloco de Lógica *fuzzy* é que este bloco ocupa menor memória

do controlador do que o bloco PI , mas uma das vantagens do bloco PI é a facilidade e familiaridade quanto a sintonia por parte dos operadores.

CONCLUSÕES

5.1 Análise de resultados

Sendo o objetivo do trabalho a comparação de técnicas de controle *fuzzy* e Adaptativo com o controle convencional *PI*, avalia-se, após análise dos resultados, que tal objetivo foi atingido com sucesso.

Analisando as aplicações não-lineares conclui-se que as técnicas de controle *fuzzy* e Adaptativo são superiores à técnica de controle *PI*, pois elas atuam mantendo no sistema a característica projetada.

Para as aplicações lineares conclui-se que a técnica de controle Adaptativo é superior às técnicas de controle *fuzzy* e *PI*, pois ela atua na malha com diversas características, ou seja, o controle Adaptativo faz com que a malha tenha respostas rápidas garantindo também ao processo a mesma estabilidade do controle convencional *PI* e da lógica *fuzzy*. Já ao comparar o controle *fuzzy* com o *PI* em aplicações lineares outros fatores definem o desempenho do processo:

O bloco de Lógica *fuzzy* utiliza menor memória do controlador do que o bloco *PI*;

O bloco *PI* por ser convencional apresenta vantagens operacionais.

Com a otimização do processo foi comprovado uma redução de 10% no tempo de inicialização do processo de fabricação de papel e tempo de retorno à produção em função de problemas no processo. Reduziu também o número de paradas em função de variações no processo. Esta melhoria gerou um aumento de produção de 7 toneladas de papel e uma economia de aproximadamente R\$ 5.000,00 por mês. A Tabela 5.1 apresenta a produção e a economia que será gerada em 5 anos.

O desenvolvimento de controladores *PI* comerciais com a opção de sintonia automática, através da lógica *fuzzy* ou controle adaptativo é uma sugestão para trabalhos futuros, já que comprovadamente obtêm-se melhores resultados para sistemas com não-linearidades quando comparados ao sistema *PI* convencional.

Tabela 5.1 – Produtividade

Produtividade	<i>mensal</i>	<i>anual</i>	<i>5anos</i>
Economia	R\$ 5.000,00	R\$ 60.000,00	R\$ 300.000,00
Produção	7 ton	84 ton	420 ton

5.2 Conclusões gerais

Visando a melhoria contínua para atingir competitividade no mercado é necessário utilizar para controle de processo a melhor técnica de controle. Entre os objetivos deste trabalho está a definição da melhor técnica para cada subprocesso estudado. Com este resultado pode-se avaliar que foram obtidos:

- Minimização das perturbações que agem sobre o processo e seu efeito sobre a variável controlada;
- Redução da variabilidade, manutenção da variável estável, seja vazão, nível ou consistência;
- Melhor qualidade no processo através da escolha do controle adequado: obteve-se a diminuição dos pontos críticos do processo.

CAPÍTULO 6

PUBLICAÇÕES REALIZADAS

C. Ferreira, S. G. S. Cervantes and E. F. F. Ramirez, “Estudo Comparativo entre as Técnicas de Controle *PI* e *fuzzy* aplicado ao processo de fabricação de Papel”, Induscon - VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008 - ID 41066

Bibliografia

ABDALLAH, Y. M. *Sintonia de controladores PID via procedimento adaptativo para controle de altitude de veículos lançadores*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, fevereiro 2005.

AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

ASTRON, K. J.; WITTENMARK, B. *Adaptive Control Systems*. [S.l.]: Addison-Wesley Series in Electrical Engineering: Control Engineering, 1995.

AZEVEDO, F.; BRASIL, L.; OLIVEIRA, R. *Redes Neurais com aplicações em Controle e em sistemas Especialistas*. Florianópolis: Visual Books, 2000.

BERTO, M.; Sá, F.; JR, V. S. Avaliação de controle PID adaptativos para um sistema de aquecimento resistivo de água. *Ciênc. Tecnol. Aliment*, v. 24(3), p. 478–485, 2004.

FENG, G.; LU, G.; SUN, D.; ZHOU, S. A model reference adaptive control algorithm for fuzzy dynamic systems. In: . [S.l.]: 4th Congress on Intelligent Control and Automation, 2002. p. 3242–3246.

FERNANDES, F. G.; LOPES, J. S. B.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M. U.; OLIVEIRA, L. A. H. G. Implementação de controladores PID utilizando lógica fuzzy e instrumentação industrial. In: . São Luis: VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2005.

FIGUEIREDO, L.; JOTA, F. Implementação de técnicas de controle adaptativo ao resfriamento de tiras a quente. in *Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática*, p. 1–6, 2004.

KALMAN, R. *Design of a self optimizing control system*. [S.l.]: Transaction of the ASME, 1958.

KNIGHT, C. *Manual Installing Your Delta V Automation System*. 7. ed. [S.l.], Feb 2004.

MONTENEGRO, P.; RIUL, J.; OLIVEIRA, B. de; SILVA, S. da. Controladores adaptativos de temperatura em um túnel psicrométrico. *Controle e Automação*, v. 17(3), p. 257–264, 2006.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, Pearson, 1998.

SIGHIERI, L.; NISHINARI, A. *Controle automático de processos industriais instrumentação*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

SILVA, G.; DATTA, A.; BHATTACHARYYA, S. New results on the synthesis of PID controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 47(2), p. 241–252, 2002.

SILVA, G. da. *Análise do Comportamento de Modelos Dinâmicos com Ruído Caótico, Utilizando Controle Baseado em Lógica Nebulosa*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, fevereiro 2002.

APÊNDICE A

ALGORITMO PI

```
%Função de transferência do controle de Vazão:  
  
d=50; %valor do degrau ou SP final;  
  
num=[0.7]; %numerador do sistema;  
  
den=[1 1.3441 0.7]; %denominador do sistema;  
  
t=[0:0.05:10]; %periodo;  
  
[y1,x,t]=step(num,den,t); %degrau unitário;  
  
y=y1*d  
  
plot(t,y);grid; %irá plotar este gráfico com grid  
  
title('FT do Sistema Vazao Massa de Papel') %título  
  
xlabel('t segundos') %eixo x  
  
ylabel('Q l/min') %eixo y
```

APÊNDICE B

ALGORITMO FUZZY

```
%Função de transferência do controle de Vazão:
d=50; %valor do degrau ou SP final
Csic=5 %valor da consistencia
ti=(47.5-(2.5*Csic)); %equação ti
kp=(0.09+(0.05*Csic)); %equação kp
a=ti*kp;
num=[21/ti]; %numerador do sistema;
den=[12/a 16.1292/a 21/ti]; %denominador do sistema;
t=[0:0.05:20]; %periodo;
[y1,x,t]=step(num,den,t); %degrau unitário;
y=y1*d
plot(t,y);grid; %irá plotar este gráfico com grid
title ('FT do Sistema Vazao Massa de Papel') %título
xlabel('t segundos') %eixo x
ylabel('Q l/min') %eixo y
```

APÊNDICE C

ALGORITMO ADAPTATIVO

```
%Função de transferência do controle Nivel
t=[0:0.5:1000]; %periodo;
len = length(t);
U=40*ones(len,1); %valor do degrau ou SP final
y = zeros(len,1); % Vetor de saída
Er = U - y; % Vetor de erro
% Condições iniciais
y(1) = 0;
Er(1) = U(1);
ti(1)=300-1.6666*(abs(Er(1))); %equação ti
kp(1)=4+0.2333*(abs(Er(1))); %equação kp
a=ti(1)*kp(1);
num=[0.0257/ti(1)]; %numerador do sistema;
den=[1247.52/a 17.502/a 0.0257/ti(1)]; %denominador do sistema;
[y,x,t]=step(num,den,t); %degrau unitário;
y1(1)=y(1)*U(1)';
Er(2) = U(2) - y1(1);
ti(2)=300-1.6666*(abs(Er(2)));
```

```

kp(2)=4+0.2333*(abs(Er(2)));
a=ti(2)*kp(2);
num=[0.0257/ti(2)];
den=[1247.52/a 17.502/a 0.0257/ti(2)];
[y,x,t]=step(num,den,t);
y1(2)=y(2)*U(2)';
Er(3) = U(3) - y1(2);
ti(3)=300-1.6666*(abs(Er(3)));
kp(3)=4+0.2333*(abs(Er(3)));
a=ti(3)*kp(3);
num=[0.0257/ti(3)];
den=[1247.52/a 17.502/a 0.0257/ti(3)];
[y,x,t]=step(num,den,t);
y1(3)=y(3)*U(3)';
for n=4:len,
Er(n) = U(n) - y1(n-1);
ti(n) = 300-1.6666*(abs(Er(n)));
kp(n) = 4+0.2333*(abs(Er(n)));
a = ti(n)*kp(n);
num=[0.0257/ti(n)];
den=[1247.52/a 17.502/a 0.0257/ti(n)];
[y,x,t]=step(num,den,t);
y1(n)=y(n)*U(n)';
end
figure(2); plot(t,y1,'r',t,U,'b-');
title ('FT do Sistema de Nivel Massa de Papel') %título
xlabel('t segundos') %eixo x
ylabel('L m3') %eixo y
hold on;

```