MANUELA SOUZA LEITE

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE CONTROLADORES *FUZZY* E CONVENCIONAL APLICADOS EM UM BIOPROCESSO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

CAMPINAS / SP/ BRASIL
Setembro - 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L536e

Leite, Manuela Souza
Estudo comparativo do desempenho de controladores fuzzy e convencional aplicados em um bioprocesso / Manuela Souza Leite.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Lógica difusa. 2. Controladores PID. 3. Bromelina. 4. Automação. I. Silva, Flávio Vasconcelos da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Comparative study of the performance of fuzzy and conventional controllers applied in a bioprocess.
Palavras-chave em Inglês: Fuzzy controller, PID controller, Bromelain, Fieldbus.
Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática.
Titulação: Mestre em Engenharia Química
Banca examinadora: Luiz Carlos Bertevello, Maria Isabel Berto e Vivaldo Silveira Júnior.
Data da defesa: 06/09/2007
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Manuela Souza Leite e aprovada em 06/09/2007 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva - Orientador
(UNICAMP/DESQ/FEQ)

Prof. Dr. Luiz Carlos Bertevello
(FEI)

Profª. Drª. Maria Isabel Berto
(ITAL)

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior
(UNICAMP/DEA/FEA)

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, defendida por Manuela Souza Leite, em 06/09/2007.

_____

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

Dedico este trabalho ao Mestre dos Mestres: JESUS CRISTO, que incessáveis bênçãos derrama sobre mim e a quem eu devo todas as minhas vitórias;

Aos meus amados pais Manoel e Marivalda;

Aos meus abençoados irmãos Viviane e Vinícius;

Ao meu amor Paulo Jardel;

A toda a minha família, em especial minha adorada e doce avó Maria Carmelita.

“O encontro da preparação com a oportunidade gera o rebento que chamamos sorte.”

Anthony Robbins

AGRADECIMENTOS

Apesar de a elaboração de uma dissertação consistir de um trabalho individual, existem contribuições de formas distintas que não podem deixar de ser enfatizadas. Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

A Deus, meu Senhor, meu refúgio, fonte de minhas forças pra ir em busca de meus objetivos, fonte de minhas alegrias, razão de minhas vitórias. Obrigada meu Pai, por me sustentar em Suas mãos, por abrir 'janelas' em lugares em que só existiam 'portas fechadas', pela sabedoria e capacitação que me concede, por proporcionar a concretização de mais este sonho. Teu amor me ajudou a superar as diferenças e a enfrentar desafios. A Ti eu devo tudo que tenho e tudo o que sou!

Ao meu orientador Flávio Vasconcelos da Silva, por toda a atenção que a mim foi dispensada, por todo o apoio e pelo manancial de informações que contribuíram para a execução desta dissertação. Agradeço pelo seu incentivo, pelas oportunidades e pela confiança que me concedeu. Flávio, registro aqui minha admiração, meu respeito, meu carinho e meu 'muito obrigada'!

Aos meus queridos pais Manoel e Marivalda e aos meus maravilhosos irmãos Viviane e Vinícius, pelo grande amor e paz que me transmitem, me fazendo sentir alguém capaz de "desbravar" o mundo, alguém que possui uma capacidade muito além da qual eu realmente possuo, mas que por isso fazem com que eu acredite mais em mim mesma. Obrigada meus amores. Vocês são meu "porto-seguro", meu grande incentivo, meu referencial, minha vida. Vocês são as melhores coisas que eu tenho na vida. Presentes de Deus!

Ao meu grande amor e amigo Paulo Jardel, por seu companheirismo, amor e compreensão. Pelo apoio moral nos "momentos-chave" e por se mostrar tão presente em minha vida. Você é peça importante em minhas conquistas. Muito obrigada por tudo, amo você!

Aos meus familiares e amigos que ficaram no melhor lugar do Brasil: Aracaju, pela torcida e pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente. As maravilhosas lembranças que vocês me trazem me fizeram mais feliz nos dias em a solidão se fazia minha companheira. Obrigada pelo incentivo e pelo carinho de vocês. Vocês sempre vão estar em meu coração. Amo vocês demais!

Aos amigos e profissionais que encontrei no laboratório (LCAP) em que este trabalho foi desenvolvido e onde obtive diversos tipos de aprendizagem: Tatiana e Camila (adoro vocês meninas), Wagner, Thiago, Ivan, Ricardo, Bertevelo, Atahualpa, Lilian, Regina. Em especial agradeço: A Tatiana, pela parceria que demonstrou durante a realização deste trabalho, por todas as suas contribuições, por proporcionar a confirmação do quão valioso e proveito é o trabalho em equipe, pela amizade que construímos e que tão importante é para mim. Obrigada pelos momentos tão agradáveis, as conversas, as risadas, os desabafos e até as contrariedades e preocupações que compartilhamos juntas. Valeu mesmo Tati-pinguim!; Ao Wagner ("beicin") pela especialíssima ajuda na construção do painel de comando utilizado neste trabalho, por sua alegria, pelos conhecimentos que foram repartidos com tanta sabedoria e humildade, pelo excelente modelo de profissional e amigo; Ao Thiago ("Thi"), um ótimo colega de trabalho, pessoa a qual criei muita afeição, sempre disposto a ajudar e a receber sugestões, e que foi tão atencioso durante a montagem do sistema de precipitação da bromelina; A Camila (Cá) por todas as expressões de carinho e pela nossa amizade que se fortalece cada vez mais; Ao Bertevello, pelas questões levantadas ao longo destes meses, que me ajudaram a refletir mais profundamente sobre determinados aspectos; pelo estímulo e entusiasmo revelado por esta dissertação; pela amizade, carinho e atenção.

Ao prof. Elias Tambourgui pela total disponibilidade, cordialidade e atenção que demonstrou desde o início da realização deste trabalho. Muito obrigada mesmo! Ao prof. José Vicente, pelo apoio desde o primeiro momento que mostrei interesse em participar do programa de pós-graduação da FEQ/DESQ.

A Adna ("formiguinha") pelo carinho e grande atenção que me concedeu desde o início de minha estadia no "novo lar" em Campinas. Amiguinha, por você tenho um enorme carinho, muito obrigada.

Aos alunos do laboratório de biotecnologia (Juliana, José Curvelo e Giovana) pela atenção e pela disponibilidade dos materiais necessários à realização das análises da enzima bromelina.

Aos meus pastores Psc. Luís Antônio e Psc. Ricardo Reis, aos amigos que conquistei na Igreja do Evangelho Quadrangular Sergipe, lugar onde encontrei com meu Jesus e descobri o verdadeiro sentido de viver. Obrigada por todo o zelo, pelas orientações mesmo que a distância, e por orarem por mim para que mais esta etapa de minha vida fosse conquistada para honra e glória do nosso Deus.

A UNICAMP/ DESQ/ FEQ pelo acolhimento e pela oportunidade de desenvolver esta dissertação. A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado que tornou possível a realização deste trabalho nesta cidade.

Aos técnicos da FEQ Daniel, Edgar e Juliano por darem "aquela mãozinha" nos momentos em que foi de grande importância as suas ajudas.

Aos funcionários da CPG Márcia, Evandro, Gabriel pela atenção e educação com que sempre fui recebida para resolver as questões burocráticas relacionados ao mestrado.

A todos aqueles que torceram, e até mesmo aos que não torceram, para que este trabalho fosse finalizado, pois, cada vez mais, me senti incentivada a seguir em frente.

Manuela.

"A felicidade não está no fim da jornada, e sim em cada curva do caminho que percorremos para encontrá-la." (Desconhecido)

RESUMO

Devido à crescente importância econômica de biosistemas é imprescindível a introdução de estratégias de monitoração e controle de forma a garantir altos rendimentos, reprodutibilidade, confiabilidade e redução nos custos. A aplicação de controladores *fuzzy* nestes sistemas tem crescido consideravelmente devido a sua capacidade de adaptação às não-linearidades do processo, uma vez que os controladores convencionais possuem ação limitada. O alto valor agregado da bromelina e sua crescente demanda em aplicações farmacêuticas e industriais justificam a necessidade de utilização de controladores avançados que proporcionem condições operacionais adequadas para a recuperação e purificação desta enzima. O controle da temperatura no processo de precipitação de bromelina é fundamental para a redução da desnaturação da enzima e, conseqüentemente, melhora na qualidade final do produto obtido. Neste trabalho foi desenvolvida uma automação, baseada em instrumentos inteligentes *Fieldbus*, para monitoramento das variáveis de um sistema para extração de bromelina. Foi realizado um estudo comparativo do desempenho dos controladores convencional e avançado (controlador *fuzzy*), aplicados na manutenção da temperatura interna de um tanque de precipitação da bromelina. O 1° método de Ziegler-Nichols foi utilizado para a sintonia dos controladores convencionais. Os parâmetros para o controlador PID foram: K_c = 35 %/ºC, τ_i = 28 s e τ_d = 7 s; e para o controlador PI: K_c = 35 %/ºC e τ_d = 31 s. O software MATLAB foi utilizado para o desenvolvimento e sintonia do controlador *fuzzy*, baseada em mudança no conjunto universo, na base de regras e na disposição das funções de pertinência do controlador. Na análise comparativa entre os tipos de controladores utilizados no sistema foi observado um melhor desempenho do controlador *fuzzy*, apresentando: menor valor do critério do erro ITAE, menor tempo de subida e melhor desempenho da variável manipulada, uma recuperação da atividade proteolítica da enzima 80 % maior e uma redução de 58 % no consumo de energia elétrica, quando comparado com controladores convencionais.

Palavras chave: Controle *fuzzy*, Controle PID, Bromelina, *Fieldbus*.

ABSTRACT

The use of fuzzy controllers in bioprocesses has increased greatly in the last few years. In conventional controllers, assumptions and simplifications are often made to build a precise mathematical model that may be far from the real situation. In contrast, fuzzy controllers are an attractive technique for the control of plants that are ill-defined or non-linear systems. The high commercial value of the bromelain and its increasing demand in pharmaceutical and industrial applications justify the necessity of control to provide adequate operational conditions. Temperature control is crucial to avoid the irreversible protein denaturation and consequently to improve the precipitation yield. This work focus on the development of a comparative study between conventional and fuzzy controllers applied to a bromelain recover process from pineapple juice through the precipitation process with alcohol at a low temperature, using Fieldbus network architeture. The Ziegler Nichols method was used to tuning conventional controllers. The parameters K_c = 35 %/ºC, τ_i = 28 s e τ_d = 7 s was used to PID controller and K_c = 35 %/ºC e τ_d = 31 s was used to PI controller. To tuning the fuzzy controller was tested different universe of discourse, base of rules and support sets of membership functions. The experimental results show the effectiveness of fuzzy controller in comparison with the conventional controllers. The fuzzy-PI controller presented reduced error parameter (ITAE), saved electrical energy (58 % smaller) and better recovery of the enzymatic activity (80 %).

Keywords: Fuzzy controller, PID controller, Bromelain, Fieldbus.

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 4.1 - Equações obtidas a partir da calibração dos sensores de temperatura. 60

TABELA 4.2 - Planejamento 2^3 com ponto central. 64

TABELA 4.3 - Matriz para planejamento experimental. 65

TABELA 4.4 - Análise da variância (ANOVA) para o planejamento experimental. 66

TABELA 4.5 - Equações representativas considerando efeitos principais. 73

TABELA 4.6 - Determinação das condições iniciais a partir de planejamento experimental. 74

TABELA 4.7 - Parâmetros dos controladores convencionais. 76

TABELA 4.8 - Comparação de parâmetros de desempenho entre controladores PI. 80

TABELA 4.9 - Comparação de parâmetros de desempenho entre controladores PID. 83

TABELA 4.10 - Efeito da variação do volume no tanque de precipitação. 85

TABELA 4.11 - Matriz de base de regras para controlador *fuzzy*-PI utilizada na Sintonia 3. 91

TABELA 4.12 - Critério de erro ITAE para escolha entre controladores *fuzzy*-PI. 94

TABELA 4.13 - Resultados obtidos a partir da determinação das proteínas totais. 97

TABELA 4.14 - Resultados obtidos a partir da determinação da atividade enzimática. 98

TABELA B.1 - Versões utilizadas para os instrumentos *fieldbus*. 122

TABELA B.2 - Configuração dos blocos funcionais do DFI. 122

TABELA B.3 - Configuração dos blocos funcionais para o 1° transmissor de temperatura. 123

TABELA B.4 - Configuração dos blocos funcionais para o 2° transmissor de temperatura. 124

TABELA B.5 - Configuração dos blocos funcionais para o conversor corrente - *fieldbus*. 125

TABELA B.6 - Configuração dos blocos funcionais para o conversor *fieldbus* - corrente. 126

TABELA C.1 - Condições dos ensaios A, B e C do planejamento experimental. 129

TABELA E.1 - Matriz de base de regras para parâmetros do controlador *fuzzy*-P1. 134

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 -	Esquema para desenvolvimento da dissertação.	4
FIGURA 1.2 -	Esquema de organização da dissertação.	7
FIGURA 2.1 -	Funções de pertinência para a variável temperatura.	18
FIGURA 2.2 -	Estrutura de um sistema com controlador *fuzzy*.	20
FIGURA 3.1 -	Fluxograma do sistema de precipitação da bromelina.	34
FIGURA 3.2 -	Rede *fieldbus* para o sistema de precipitação da bromelina.	37
FIGURA 3.3 -	Resposta de um processo a uma perturbação do tipo degrau.	47
FIGURA 3.4 -	Estrutura do controlador *fuzzy*-PI.	50
FIGURA 3.5 -	Desenvolvimento de um controlador *fuzzy* no MATLAB 7.0.1.	51
FIGURA 3.6 -	Edição da base de regras do controlador *fuzzy*.	52
FIGURA 3.7 -	Simulação do comportamento do controlador *fuzzy*.	53
FIGURA 4.1 -	Ilustrações do sistema (a) de precipitação da bromelina e (b) do painel de comando do protótipo.	55
FIGURA 4.2 -	Telas de supervisão do sistema de precipitação de bromelina: (a) e (b) telas desenvolvidas através do INDUSOFT; (c) tela desenvolvida através do supervisório AIMAX.	57
FIGURA 4.3 -	Tela do *software* SYSCON para configuração dos instrumentos de campo *fieldbus*.	58
FIGURA 4.4 -	Estratégia de controle convencional para manutenção da temperatura de precipitação da bromelina.	59
FIGURA 4.5 -	Curva de calibração para o sensor TT 302.	60
FIGURA 4.6 -	Relação entre a vazão de propilenoglicol (L/h) e a rotação da	61

bomba (%). .....

FIGURA 4.7 - Comportamento da potência consumida pelo motor com relação à variação da vazão de propilenoglicol. 62

FIGURA 4.8 - Influência da temperatura na atividade enzimática da enzima bromelina. 63

FIGURA 4.9 - Correlação entre valores observados e valores preditos para tempo de resposta e variação de temperatura. 68

FIGURA 4.10 - Diagramas de Pareto para as variáveis (a) variação de temperatura (ΔT) e (b) tempo de resposta (TR). 69

FIGURA 4.11 - Superfícies de resposta para variação de temperatura (ΔT) em função de (a) Vazão de etanol (VE) *x* Rotação da bomba de propilenoglicol (VB) (b) Vazão de etanol (VE) *x* Temperatura de entrada de propilenoglicol na camisa do tanque (TE) (c) Rotação da bomba de propilenoglicol (VB) *x* Temperatura de entrada de propilenoglicol na camisa do tanque (TE). 70

FIGURA 4.12 - Superfícies de resposta para a variável tempo de resposta (TR) em função de (a) Vazão de etanol (VE) *x* Rotação da bomba de propilenoglicol (VB), (b) Vazão de etanol (VE) *x* Temperatura de entrada de propilenoglicol na camisa do tanque (TE) e (c) Rotação da bomba de propilenoglicol (VB) *x* Temperatura de entrada de propilenoglicol na camisa do tanque (TE). 72

FIGURA 4.13 - Curva de reação para determinação dos parâmetros dos controladores convencionais, a partir de 150 mL de caldo de abacaxi. 75

FIGURA 4.14 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PI, com parâmetros K_c = 10,4 %/°C e τ_i = 14,0 s. 78

FIGURA 4.15 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PI, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 23,0 s. 78

FIGURA 4.16 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PI, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 31,0 s. 79

FIGURA 4.17 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PID, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C, τ_i = 18,0 s e τ_d = 1,5 s. 81

FIGURA 4.18 - Comportamento da variável controlada ($\Delta T = PV - SP$) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PID, com parâmetros Kc = 35,0 %/°C, τ_i = 28,0 s e τ_d = 1,5 s. 82

FIGURA 4.19 - Comportamento da variável controlada ($\Delta T = PV - SP$) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PID, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 28,0 s e τ_d = 7,0 s. 82

FIGURA 4.20 - Comparação entre as curvas de reação obtidas a partir de perturbações positivas e negativas na variável manipulada, para verificação da linearidade do processo. 84

FIGURA 4.21 - Comportamento de K_c para diferentes volumes contidos no tanque de precipitação, sob perturbações positivas na variável manipulada. 86

FIGURA 4.22 - Comportamento de K_c para diferentes volumes contidos no tanque de precipitação, sob perturbações negativas na variável manipulada. 88

FIGURA 4.23 - Estruturas das funções de pertinência para as variáveis (a) ErroTT302 (b) DErroTT302 e (c) DSaidaFzz empregadas no desenvolvimento do controlador *fuzzy*-PI utilizando parâmetros da Sintonia 3. 90

FIGURA 4.24 - Comportamento da variável controlada ($\Delta T = PV - SP$) e variável manipulada MV, sob a ação de controlador *fuzzy*-PI utilizando parâmetros da Sintonia 1. 92

FIGURA 4.25 - Comportamento da variável controlada ($\Delta T = PV - SP$) e variável manipulada MV, sob a ação de controlador *fuzzy*-PI utilizando parâmetros da Sintonia 2. 93

FIGURA 4.26 - Comportamento da variável controlada ($\Delta T = PV - SP$) e variável manipulada MV, sob a ação de controlador *fuzzy*-PI utilizando parâmetros da Sintonia 3. 93

FIGURA 4.27 - Superfície de resposta do controlador *fuzzy*-PI com os parâmetros da Sintonia 3. 95

FIGURA 4.28 - Curva de calibração de Bradford para determinação de proteínas totais. 96

FIGURA 4.29 - Ensaio final do controlador PI: K_c = 35 %/°C e τ_i = 31 s. 100

FIGURA 4.30 - Ensaio final do controlador PID: K_c = 35 %/°C, τ_i = 28 s e τ_d = 7 s. 100

FIGURA 4.31 - Ensaio final do controlador *fuzzy*-PI. 101

FIGURA 4.32- Comparação entre valores de *overshoot* para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 102

FIGURA 4.33 - Comparação entre tempos de estabilização para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 102

FIGURA 4.34 - Comparação entre tempos de subida para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 103

FIGURA 4.35 - Comparação entre comportamentos da variável manipulada para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 103

FIGURA 4.36 - Comparação entre valores do parâmetro ITAE (integral do erro absoluto no tempo) para controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 105

FIGURA 4.37 - Comparação entre valores do consumo de energia elétrica para controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 105

FIGURA 4.38 - Comparação entre valores da atividade enzimática da bromelina recuperada para controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em malha aberta. 106

FIGURA A.1 - Visão geral do painel de comando. 121

FIGURA A.2 - Ligação utilizada para os conversores corrente-*fieldbus* IF302 (a) e *fieldbus*-corrente FI302 (b). 121

FIGURA C.1 - Curvas do planejamento experimental que auxiliaram na escolha das condições iniciais para uso de controladores do processo de precipitação. 128

FIGURA D.1 - Curva de calibração do sensor TT301. 130

FIGURA D.2 - Curva de calibração do sensor TT302. 130

FIGURA D.3 - Curva de calibração do sensor TT303. 131

FIGURA E.1 - Funções de pertinência *fuzzy* para variáveis de entrada (a) Erro TT302 e (b) DErroTT302 e variável de saída (c) DSaidaFzz utilizando parâmetros da Sintonia1. 132

FIGURA E.2 - Funções de pertinência *fuzzy* para variáveis de entrada (a) Erro TT302 e (b) DErroTT302 e variável de saída (c) DSaidaFzz utilizando parâmetros da Sintonia2. 133

FIGURA E.3 - Superfícies de resposta dos controladores *fuzzy*-PI utilizando (a) parâmetros da Sintonia 1 e (a) parâmetros da Sintonia 2. 133

.....

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 1

1.1 - MOTIVAÇÃO 2
1.2 - OBJETIVO 4
1.3 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO 4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 5

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

2.1 - INTRODUÇÃO 9
2.2 - ABACAXI 9
2.3 - ENZIMA BROMELINA 10
2.3.1 - Influência do Meio sobre a Atividade Enzimática 11
2.3.2 - Unidade Enzimática 11
2.4 - APLICAÇÕES DA BROMELINA 12
2.5 - SEPARAÇÃO DE PROTEÍNAS 13
2.5.1 - Precipitação por Etanol 14
2.6 - CONTROLE EM BIOPROCESSOS 15
2.7 - LÓGICA *FUZZY* 16
2.8 - CONTROLADORES *FUZZY* 19
2.8.1 - Base de Conhecimento 21
2.8.2 - Processo de Fuzzificação 21
2.8.3 - Processo de Defuzzificação 21
2.9 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE CONTROLADORES *FUZZY* 22

2.10 - APLICAÇÕES DIVERSAS 23
2.11 - CONTROLE DE PROCESSOS UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY* 25
2.12 - SISTEMA *FIELDBUS* 28
2.12.1 - Benefícios do Uso da Tecnologia Fieldbus 29
2.12.2 - Arquitetura Fieldbus 31

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS 33

3.1 - MONTAGEM DO PROTÓTIPO PARA PRECIPITAÇÃO DA BROMELINA .. 33
3.2 - MONTAGEM DO PAINEL DE COMANDO DO PROTÓTIPO 35
3.3 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO 36
3.4 - IMPLEMENTAÇÃO DA REDE FIELDBUS 36
3.5 - CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA 40
3.6 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE PROPILENOGLICOL 40
3.7 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA DE PROPILENOGLICOL 41
3.8 - CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE NÍVEL 41
3.9 - CARACTERIZAÇÃO DA BROMELINA 42
3.9.1 - Preparo das Amostras 42
3.9.2 - Determinação de Proteínas Totais 42
3.9.2.1 - Construção da curva-padrão 42
3.9.2.2 - Método para determinação de proteínas 43
3.9.3 - Determinação da Atividade Enzimática 43
3.9.3.1 - Efeito da temperatura 44
3.10 - DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO PROCESSO 44
3.11 - REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE PRECIPITAÇÃO 46
3.12 - ENSAIOS DE SINTONIA DO CONTROLADOR CONVENCIONAL 47
3.13 - VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PROCESSO 48
3.14 - DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY* 49
3.14.1 - Determinação das Funções de Pertinência 51
3.14.2 - Definição da Base de Regras 52
3.14.3 - Ensaios de Sintonia do Controlador 53

3.15 - COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO ENTRE CONTROLADORES CONVENCIONAL E AVANÇADO PARA O PROCESSO DE PRECIPITAÇÃO DA BROMELINA 54

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 55

4.1 - MONTAGEM DO PROTÓTIPO PARA PRECIPITAÇÃO DE BROMELINA .. 55
4.2 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO 56
4.3 - CONFIGURAÇÃO DA REDE FIELDBUS E DEFINIÇÃO DA MALHA DE CONTROLE 58
4.4 - CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA 59
4.5 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA DE PROPILENOGLICOL 61
4.6 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA DE PROPILENOGLICOL 61
4.7 - DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO PROCESSO 63
4.7.1 - Análise da Variância 63
4.7.2 - Planejamento Fatorial 64
4.7.3 - Análise da Variância 65
4.7.4 - Análise de Significância Estatística 68
4.8 - ENSAIOS DE SINTONIA DO CONTROLADOR CONVENCIONAL 74
4.9 - SINTONIA FINA DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES CONVENCIONAIS PI E PID 76
4.9.1 - Sintonia Fina do Controlador PI 77
4.9.2 - Sintonia Fina do Controlador PID 80
4.10 - VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PROCESSO 83
4.10.1 - Efeito da Variação do Volume na Linearidade do Processo. 84
4.11 - DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR *FUZZY* 89
4.11.1 - Determinação dos Parâmetros do Controlador Fuzzy-PI 89
4.11.2 - Sintonia do Controlador Fuzzy-PI 92
4.12 - CARACTERIZAÇÃO DA BROMELINA PARA OS DIFERENTES TIPOS DE CONTROLADORES 96
4.12.1 - Determinação de Proteínas Totais 96
4.12.2 - Determinação da Atividade Enzimática. 97

4.13 - COMPARAÇÃO FINAL DO DESEMPENHO ENTRE CONTROLADORES CONVENCIONAL E AVANÇADO PARA O PROCESSO DE PRECIPITAÇÃO DA BROMELINA 99

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES 109

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 111

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 11323

APÊNDICE A 121

APÊNDICE B 1282

APÊNDICE C 13028

APÊNDICE D 1320

APÊNDICE E 13532

APÊNDICE F..... 13535

ANEXO A 13939

ANEXO B 1411

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A finalidade de um sistema de controle de processos é permitir uma operação estável dentro de valores pré-estabelecidos para as condições e variáveis do processo. Esta finalidade é alcançada com o emprego de sistema de sensores que medem o valor atual e comparam com um valor desejado. A partir da diferença entre ambos, inicia-se uma ação visando reduzir a zero o desvio ocorrido de forma contínua e automatizada.

Um bom controle é avaliado pela sua capacidade de proporcionar um mínimo desvio da variável de processo como resultado de uma perturbação, retornando-a à condição de funcionamento prefixada em um mínimo intervalo de tempo.

O desenvolvimento de técnicas de Inteligência Artificial (IA) nos últimos anos ocupa cada vez mais posição de destaque em pesquisas na área de controle de processos industriais e, aos poucos, começam a ser implantadas em plantas industriais com enorme sucesso, como é o caso do controle *fuzzy*.

Observa-se que a teoria de controle clássico apresenta limitações de desempenho quando o processo apresenta alta complexidade, onde não-linearidades e o comportamento transiente estão presentes. No entanto, o controle *fuzzy* pode ser aplicado a sistemas lineares e não-lineares. É de fácil implementação e baixo custo, além de apresentar características de robustez.

Os controladores *fuzzy* tornaram-se populares em anos recentes porque não requerem necessariamente um modelo teórico da planta que deve ser controlada. Conseqüentemente, a fim desenvolver um controlador *fuzzy*, é necessário quantificar a experiência apresentada pelo especialista do processo.

A descrição de processos biológicos e de alimentos através de modelos matemáticos convencionais para processos de otimização e controle é freqüentemente difícil, devido à natureza complexa dos processos, informações insuficientes, inadequadas e não precisas. As simplificações e hipóteses feitas nos modelos convencionais podem implicar em resultados não reais ou mesmo imprecisos.

O interesse em novos processos biotecnológicos vem crescendo substancialmente. A diversificação do uso da bromelina (enzima proteolítica) e o aumento de sua importância econômica estimularam o interesse no desenvolvimento de muitos trabalhos científicos visando, principalmente, o desenvolvimento das técnicas de caracterização, separação e purificação da enzima, uma vez que esta é uma etapa limitante na produção de bioprodutos.

Apesar de se saber que a automação e o controle de processos podem influenciar significativamente no rendimento e na qualidade final dos bioprodutos em geral, poucos têm sido os trabalhos experimentais desenvolvidos na aplicação de controladores em bioprocessos. Este fato deve-se a grande variação da resposta destes processos, tornando-se difícil de encontrar parâmetros de controle adequados. Em vista disto, torna-se conveniente o uso de controladores *fuzzy* que podem trabalhar com sistemas que apresentam não-linearidades e variações paramétricas.

1.1 - MOTIVAÇÃO

A importância econômica da obtenção de altos rendimentos justifica a introdução de estratégias de monitoramento e controle de forma a garantir certa reprodutibilidade do processo.

Devido a dificuldades encontradas na automação de processos, o controle *fuzzy* torna-se conveniente, uma vez que possui as facilidades quanto à adequação de estratégia de controle humano, ao protocolo de controle, à simplicidade das leis de controle e à flexibilidade das variáveis lingüísticas.

Nos últimos anos, é crescente o estudo sobre bromelina, devido à ampla utilização da mesma em setores como o alimentício (amaciamento de carne, clarificação da cerveja) e

principalmente o setor farmacêutico (interferência no crescimento de células malignas, inibição de coágulos, atividade fibrinolítica e ação antiinflamatória). Embora tenha crescido o número de trabalhos científicos referentes à bromelina, praticamente não existe o desenvolvimento de trabalhos e estudos experimentais envolvendo a automação e controle em processo de obtenção da bromelina.

O abacaxi fruto é a parte comercializável da planta, porém, esta porção representa 63% do total da planta, enquanto que o restante, formado por caule, folha, casca, coroa e talos, é considerado resíduo agrícola e não tem sido devidamente aproveitado, resultando em perdas econômicas. Trabalhos já realizados demonstram que estes resíduos apresentam teores representativos de carboidratos, proteínas e enzimas proteolíticas, que possibilitam a sua utilização industrial como matéria-prima para a obtenção de bromelina, amido, fibras, álcool etílico e rações animais (BALDINI, et al. 1993; CESAR et al., 1999).

O alto valor agregado da bromelina e a sua crescente demanda em aplicações farmacêuticas e industriais justificam a necessidade de automação para uma melhor monitoramento das condições de separação e purificação desta enzima. Além disso, por se tratar de um bioprocesso em batelada, as não linearidades e o aspecto essencialmente transiente da operação evidenciam a prioridade na aplicação de automação e o estudo da adequação dos controladores capazes de proporcionar a manutenção adequada da qualidade final da bromelina obtida.

No caso específico do processo de recuperação da bromelina presente no abacaxi, por técnica de precipitação com etanol, o controle da temperatura durante todo o processo é um fator de extrema importância, pois a temperatura interfere diretamente na atividade final da enzima precipitada. Usando uma temperatura adequada, haverá a inibição da desconformação irreversível da proteína causada pelas interações do solvente com as suas zonas hidrofóbicas internas. Dessa forma, evita-se a desnaturação, e conseqüentemente aumenta-se a qualidade do produto obtido.

1.2 - OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e implementação de controlador *fuzzy* ao processo de precipitação de bromelina para controle de temperatura interna do tanque de precipitação, que permitirá uma comparação do desempenho entre controladores avançado e convencional.

1.3 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho é detalhado na Figura 1.1, onde a representação do fluxograma tem como objetivo a fácil compreensão da sua evolução.

FIGURA 1.1 - Esquema para desenvolvimento da dissertação.

Na Figura 1.1 é apresentada a abordagem adotada para a realização deste trabalho. Inicialmente foram estabelecidos os objetivos do trabalho e, posteriormente, foi realizado um levantamento de trabalhos envolvendo lógica *fuzzy* aplicada ao controle de processos, bem como trabalhos relacionados à bromelina.

Um planejamento experimental foi desenvolvido para se determinar as condições iniciais do processo, e em seguida realizou-se a sintonia dos controladores convencionais e do controlador avançado. Após a sintonia, foram realizados os ensaios de precipitação, e posteriormente análises das amostras para avaliar a qualidade do produto obtido. Por fim, foi realizada uma análise comparativa do desempenho dos diferentes tipos de controladores utilizados este trabalho.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho organizado em 5 capítulos, os quais tem o intuito de apresentar o conteúdo deste trabalho de forma clara e coerente.

No Capítulo 1 é apresentada uma contextualização sobre os temas relacionados a este trabalho. Apresenta a motivação para realização deste projeto, ressaltando a necessidade do emprego de controladores, com enfoque no uso de controle avançado *fuzzy*, para melhorar a eficácia do processo de precipitação.

No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos teóricos fundamentais ao entendimento do trabalho desenvolvido, da tecnologia de comunicação empregada para o controle do processo, além do desenvolvimento de uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de controle avançado.

O Capítulo 3 trata de uma descrição experimental realizada para utilização do sistema de precipitação da bromelina que possibilitasse realizar os diferentes tipos de controladores para possibilitar uma comparação entre os mesmos. Explana procedimentos imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho, tais como: montagem do protótipo para bioprocesso em batelada; implementação da rede *fieldbus* e estratégia do controle

convencional; configuração dos blocos funcionais do software de configuração SYSCON; desenvolvimento de sistemas supervisórios; desenvolvimento e implementação do controlador *fuzzy*; sintonia dos controladores convencional e avançado para o ajuste de seus parâmetros de forma a propiciar melhor desempenho dos controladores; caracterização da bromelina; análise do desempenho apresentado entre os controladores convencional e avançado.

No capítulo 4 é apresentada uma discussão dos resultados obtidos após a realização de todos os ensaios, incluindo a justificativa para a escolha das condições iniciais do processo e uma análise comparativa do desempenho dos diferentes tipos de controladores utilizados. No Capítulo 5 são apresentas as conclusões fundamentais sobre o trabalho realizado e, em seguida, são apontadas algumas perspectivas de trabalhos futuros.

Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas citadas ao longo do texto, e os apêndices e anexos que possuem arquivos que fizeram parte deste trabalho.

Na Figura 1.2 é apresentado um esquema da organização da tese em que se mostra a interação entre os diferentes capítulos.

FIGURA 1.2 - Esquema de organização da dissertação.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais ao entendimento da dissertação, além de uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos que compõe este trabalho.

2.2 - ABACAXI

O abacaxi é uma fruta muito apreciada em todos os países tropicais. Sua polpa sucosa, saborosa e ligeiramente ácida é muito refrescante. Esta fruta destaca-se pelo valor energético, devido à sua alta composição de açúcares, e valor nutritivo pela presença de sais minerais (cálcio, fósforo, magnésio, potássio, sódio, cobre e iodo) e de vitaminas (C, A, B1, B2) (FREIMAN; SABAA-SRUR, 1999).

O abacaxi é uma das principais frutas brasileiras e está presente praticamente todo o ano no mercado. Apresenta uma variação muito grande na sua composição química, de acordo com a época em que é produzido. No verão as frutas apresentam maior teor de açúcares e menor acidez. As frutas produzidas fora de época, ou seja, as frutas temporãs apresentam alta acidez e baixo teor de açúcares, visto a produção ocorrer nos meses que a temperatura ambiente é baixa (GRANADA et al., 2004).

O teor de açúcares varia em geral em torno de 12 a 15%, dos quais aproximadamente 66% são de sacarose e 34% de açúcares redutores. As cinzas, que apresentam 0,4-0,6% do peso total, são ricas em bases, principalmente em potássio, ao qual

seguem o magnésio e cálcio, geralmente em partes iguais, e essas características permanecem em sua maioria nos resíduos triturados do abacaxi para o processamento da bromelina, sendo então este resíduo de grande interesse por suas características de alta riqueza nutricional (CAMPESE, 2004). Além disso, dos resíduos do abacaxi pode-se extrair a bromelina, uma enzima nobre que possui atividade enzimática contribuindo para várias aplicações. Desta extração resulta-se um bagaço consistente que pode ser utilizado como ração animal (FREIMAN; SABAA-SRUR, 1999).

A elevada influência de fatores como cultivar, grau de maturação, condições climáticas e porção da fruta pode explicar a discrepância encontrada por diferentes pesquisadores para determinados componentes do fruto (CAMPOS, 1993).

2.3 - ENZIMA BROMELINA

Bromelina é o nome genérico dado ao conjunto de enzimas proteolíticas encontradas nos vegetais da família *Bromeliaceae*, da qual o abacaxi é o mais conhecido.

O Brasil, segundo dados da Organização de Alimentação e Agricultura das Nações Unidas (FAO), em 2001, foi o terceiro maior produtor de abacaxi do mundo (atrás da Tailândia e Filipinas) contribuindo com mais de 13% da produção mundial.

A bromelina do talo é uma enzima sulfídrica, e este grupamento é essencial para a sua atividade proteolítica A enzima não está presente nos primeiros estágios de desenvolvimento do fruto, porém, sua concentração aumenta rapidamente, mantendo-se elevado até o amadurecimento, onde ocorre um pequeno decréscimo em torno de 10%. Essa é uma das vantagens da utilização das proteases do abacaxi em comparação com outras proteases vegetais. Apesar da diminuição da atividade proteolítica durante a maturação, o abacaxi é o único fruto que possui concentrações relativamente altas de proteases no estado maduro. Diferentes partes da planta podem ser usadas como matéria-prima para a obtenção da bromelina: folhas, talos, polpa da fruta, cascas e resíduos industriais do processamento do fruto (MURACHI, 1976; BALDINI, 1993; RABELO et al., 2004; CESAR, 2005; HALE et al., 2005).

2.3.1 - Influência do Meio sobre a Atividade Enzimática

A estrutura tridimensional da enzima pode ser afetada por agentes capazes de provocar mudanças conformacionais na estrutura protéica, isso torna a atividade enzimática dependente do meio. Sendo assim além da atividade ser determinada pela concentração da enzima, sofre notável influência do pH e da temperatura (LUCARINI et al., 2005).

O efeito do pH sobre a enzima deve-se às variações no estado de ionização dos componentes do sistema a medida que o pH varia. Existe uma concentração hidrogeniônica que propicia um determinado arranjo de grupos protonados e desprotonados, que leva a molécula de enzima à conformação ideal para exercer seu papel catalítico (FURIGO JUNIOR, 2001).

A atividade catalítica da enzima é também altamente dependente da temperatura e à medida que a temperatura se eleva estabilidade da proteína decresce. As enzimas são moléculas protéicas complexas, sua atividade catalítica provém de uma estrutura terciária precisa que é mantida principalmente por um grande número de ligações não covalentes fracas. Um aumento de temperatura imprime maior energia cinética às moléculas e se a molécula absorve energia demais, a estrutura terciária pode se romper e desnaturar a enzima. No processo de desnaturação térmica ocorre a perda da atividade biológica da enzima.

2.3.2 - Unidade Enzimática

Na maior parte das preparações a concentração real da enzima é desconhecida, consequentemente, a quantidade de enzima presente só pode ser expressa em termos de sua atividade. A determinação da atividade de uma enzima envolve a medida da velocidade de reação, e portanto, a Comissão de Enzima da União Interncional de Bioquímica, recomenda a seguinte definição:

"Uma unidade (U) de atividade é a quantidade de enzima que catalisa a transformação de 1 micromol de substrato, ou a formação de 1 micromol de produto por minuto" nas condições do ensaio (temperatura, pH, concentração do substrato e etc.).

U= micromoles de produto/minuto

A concentração da enzima de uma preparação impura é expressa em termos de unidades/mL. A atividade específica (AE) é expressa em termos de atividade por miligrama de proteína (U/mg).

AE = unidades/mL **/** mg de proteína/mL

AE = Unidade**/** mg de proteína

Cesar et al. (1999) realizaram análises atividade enzimática de amostras preparadas da casca e do talo do abacaxi, a uma temperatura de 5 °C, e encontraram um teor de enzima em torno de 1,0 U/g , valor considerável para recuperação ainda mais tratando-se de resíduos de indústrias de conserva.

2.4 - APLICAÇÕES DA BROMELINA

A bromelina tem diversos usos, todos baseados em sua atividade proteolítica, como nas indústrias alimentícias e farmacêuticas. Pode-se mencionar sua utilização no amaciamento de carnes; na cervejaria para hidrolisar certos complexos proteína-taninos, formados durante a fermentação, que se presentes na cerveja, tornam-se insolúveis e formam turvações quando gelada (clarificação de cervejas); na fabricação de queijos; no preparo de alimentos infantis e dietéticos; na produção de pães e biscoitos a partir de farinhas de trigo de alto teor protéico; na produção de ovos desidratados; na preparação de leite de soja e isolados protéicos no pré-tratamento de soja; no tratamento do couro; na indústria têxtil, no tratamento da lã e da seda, preparo de colágeno hidrolisado, entre outras aplicações (FREIMAN; SABAA-SRUR, 1999; CESAR, 2005).

No entanto, a concentração principal da utilização da bromelina está na indústria farmacêutica, uma das indústrias que mais investe em tecnologias e novos produtos nos últimos tempos:

Em 1957, a bromelina foi introduzida pela primeira vez como um composto terapêutico quando Heinicke e Gortner encontraram alta concentração desta enzima no talo do abacaxi. De maneira resumida, a ação da bromelina inclui: inibição da agregação plaquetária; atividade fibrinolítica; aumento da absorção de outras drogas; facilitador da digestão; melhora da circulação e sistema cardiovascular; ação antiinflamatória; solubiliza mucos e melhora a eficiência de raio X no útero; aumenta o potencial de antibióticos, devido a sua grande absorção no organismo e acesso à infecção;minimiza as dores menstruais; possui propriedade cicatrizante de pele, por isso é usada na suturação de feridas e nas queimaduras, principalmente as de 3º grau; e, principalmente, tem sido comprovada sua eficiência na inibição do desenvolvimento de células cancerígenas (TAUSSIG et al., 1985; KELLY, 1996; MATOS, 2005; CESAR, 2005).

Kelly (1996) reporta em seu trabalho de revisão os primeiros estudos da utilização de bromelina em tratamento de câncer, feitos por Gerard (1972) e Nieper (1974), onde foi comprovada a diminuição de tumores em ovários e seios, e de casos de metástase. Tais estudos foram de importantíssima contribuição no ramo da medicina, e a partir daí, vários estudos foram realizados para comprovar a eficácia da enzima bromelina no tratamento de tumores e em várias outras aplicações medicinais.

A utilização de compostos de origem vegetal, como as enzimas, é uma tendência do mundo moderno e com isso a extração e purificação destes é um dos focos do desenvolvimento da biotecnologia.

2.5 - SEPARAÇÃO DE PROTEÍNAS

Uma boa fonte da matéria prima a ser utilizada no processo de recuperação e purificação de enzimas do abacaxi são as cascas (resíduos industriais do processamento do

fruto), visto que, uma das maiores dificuldades da indústria de processamento do fruto é a venda do suco da casca, devido ao seu alto custo ocasionado pelo tratamento.

Muitas técnicas têm sido utilizadas para a recuperação e purificação de proteínas e enzimas. A precipitação em meios aquosos é um dos métodos mais tradicionais de concentração e purificação. Porém, vale ressaltar que não proporciona capacidade de purificação quando a operação é conduzida em apenas uma etapa. Dessa forma, a precipitação é comumente empregada nas etapas iniciais do processo de purificação. Além disso, a solubilização de proteínas pode ser dimensionada de modo a reduzir o volume inicial e, portanto, levar ao aumento da concentração. Portanto a precipitação pode proceder a processos de purificação de alta resolução, como a cromatografia (LUCARINI et al., 2005).

2.5.1 - Precipitação por Etanol

A precipitação e conseqüente recuperação de proteínas solúveis, mediante a adição de reagentes ou de soluções, constitui técnica simples, rápida e de baixo custo para a concentração de proteínas (VIEIRA, 1999; ZELLNER et al., 2005).

A adição de solvente orgânico miscível a um meio aquoso contendo proteínas causa uma variedade de efeitos, os quais, combinados provocam a precipitação da proteína. A aplicação clássica de precipitação com solvente tem sido o fracionamento de proteínas por etanol. A vantagem da utilização do etanol como agente de precipitação encontra-se na abundância e baixo custo deste solvente, tornando a recuperação da enzima economicamente interessante. O etanol pode ser reciclado ao processo por uma operação de destilação, reduzindo impactos ambientais pela liberação de efluentes, como ocorre na precipitação com sulfato de amônio (BEAN et al., 2006).

A desvantagem do uso de solvente para a precipitação é a tendência de causar mudanças conformacionais nas biomoléculas. A redução de temperatura minimiza esse efeito, pois a flexibilidade da molécula é menor, o que reduz a capacidade de penetração do solvente. Entretanto, sob temperaturas altas, sobretudo em temperaturas acima de 10°C, a

molécula protéica possui flexibilidade natural e permite maior contato do solvente com as zonas hidrófobas da proteína, aumentando o risco de desnaturação (SCOPES, 1994; ZELLNER et al., 2005; LUCARINNI et al., 2005; BEAN et al., 2006).

Sendo assim, no caso específico do processo de recuperação da bromelina presente no caldo do abacaxi, por técnica de precipitação com etanol, o controle da temperatura do processo é um importante fator na atividade final da enzima precipitada, pois com um controle adequado da temperatura evita-se a desnaturação, conseqüentemente aumentando a qualidade do produto final obtido.

2.6 - CONTROLE EM BIOPROCESSOS

Para aumentar a competitividade dos processos biotecnológicos, torna-se necessário a aplicação de metodologias operacionais capazes de assegurar de modo estável e reprodutível uma produtividade máxima com um mínimo de custos.

A importância econômica de obtenção de altos rendimentos justifica a introdução de estratégias de monitoração e controle de forma a garantir a reprodutibilidade do processo, visto que o controle de biosistemas confere confiabilidade ao processo, redução nos custos energéticos, aperfeiçoamento da supervisão e melhora da qualidade dos produtos finais.

Do ponto de vista de produção em larga escala, a otimização e automação em controle de bioprocessos têm sido muito almejadas. Recentemente, tem-se notado um grande incremento na utilização de controladores adaptativos, na aplicação de algoritmos baseados em conhecimento, na utilização da lógica *fuzzy* e na utilização de redes neurais. No entanto, a aplicação de controladores avançados em processos biotecnológicos ainda é insignificante.

2.7 - LÓGICA *FUZZY*

O controle *fuzzy* baseado na teoria do conjunto *fuzzy* é uma ferramenta matemática para tratar da informação qualitativa e das expressões lingüísticas. O controle *fuzzy* pode facilmente incorporar o conhecimento empírico obtido dos operadores empregando funções de pertinência (*membership*) e regras SE-ENTÃO, e têm demonstrado ser de muita eficácia no campo da bioengenharia, e também dentro de outros campos (HORIUCHI; KISHIMOTO, 2002).

De forma mais objetiva e preliminar, pode-se definir lógica *fuzzy* como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores. Desta perspectiva a lógica *fuzzy* pode ser definida como uma intenção de construir um modelo de raciocínio humano, refletindo o seu caráter aproximado, qualitativo (FERREIRA; PARANHOS, 2004).

A lógica *fuzzy* retrata a expansão da noção clássica de conjuntos (tradicionais), onde, para um determinado elemento, havia somente duas possibilidades: pertencer ou não pertencer a um conjunto. No entanto, existem casos em que o elemento se encontra em uma situação intermediária. Com base nisso, Zadeh desenvolveu em 1965 a teoria dos conjuntos *fuzzy*.

De acordo com esta teoria um conjunto não apresenta limites bem definidos, podendo um elemento pertencer parcialmente a ele, ou pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo. Assim, surge a flexibilidade da teoria dos conjuntos *fuzzy*, onde um elemento do universo do discurso X pertence a um conjunto A, de acordo com o grau de pertinência que indica quanto este elemento pertence a um determinado conjunto.

Nos conjuntos tradicionais a pertinência é do tipo binária representada pelos graus 1 ou 0. Isto pode ser expresso pela função característica f_A.

$$f_A(x) = 1 \text{ se e somente se } x \in A.$$

$$f_A(x) = 0 \text{ se e somente se } x \notin A.$$

Entretanto, no conjunto *fuzzy* a pertinência é gradual, variando de 0 a 1. Neste caso, não é necessário incluir ou excluir integralmente o elemento, basta que ele tenha alguma semelhança com a idéia representada pelo conjunto para ser aceito com algum grau.

Formalmente, um conjunto *fuzzy* A do universo de discurso Ω é definido por uma função de pertinência $\mu A: \Omega \rightarrow (0,1)$. Essa função associa a cada elemento x de Ω o grau $\mu A(x)$. A função de pertinência $\mu A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A:

1. $\mu A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A;
2. $\mu A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A;
3. $0<\mu A(x)<1$ indica que x é parcialmente compatível com A, com grau $\mu A(x)$.

Observa-se que em um conjunto *fuzzy* a transição entre um membro e um não membro está numa faixa gradual sendo associado um grau entre 0 (totalmente não membro) e 1 (totalmente membro).

Proposições *fuzzy* podem ser combinadas por meio de diferentes operadores, como por exemplo, os conectivos lógicos *e* e *ou,* e o operador de implicação 'se ...então' (TANSCHEIT, 2003).

A estrutura básica de uma regra *fuzzy* é a seguinte:

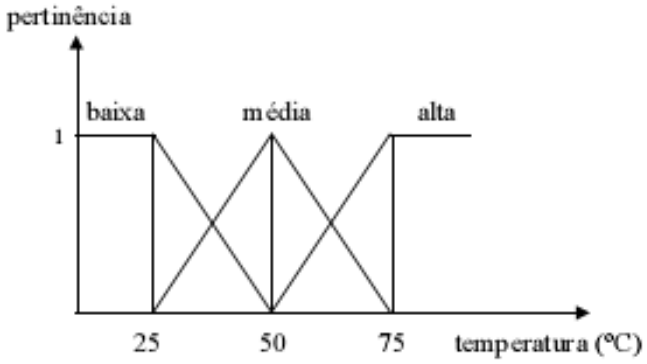
$$Se\ (u_1 \text{ é } A_1)\ E\ (u_2 \text{ é } A_2)\ E \ldots E\ (u_n \text{ é } A_n)\ Então\ (y \text{ é } C)_n.$$

Como exemplo, pode-se ter num processo de resfriamento de um reator, sendo x uma variável de temperatura do fluido do reator e y a vazão do fluido refrigerante.

Se (x é alta) *Então* (y é alta), ou seja, se a temperatura do fluido no reator for alta, deve-se ter uma alta vazão do fluido refrigerante para que haja remoção do calor. A definição do que é alto ou baixo é dada pelas funções de pertinência de cada conjunto.

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. Para exemplificar o quanto

o contexto é relevante na definição de funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo (conjunto suporte), considere a variável lingüística a temperatura de um processo especificada a partir dos termos: T (temperatura) = {baixa, média, alta}. A estes se faz corresponder os conjuntos *fuzzy* A (25-50), B (25-75) e C (50-75), respectivamente. Estes *valores* são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por função de pertinência, conforme mostrado na Figura 2.1, a seguir.



(*Fonte: TRANSCHEIT, 2003)*

FIGURA 2.1 - Funções de pertinência para a variável temperatura.

A principal função da variável lingüística é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos e mal-definidos. De acordo com a definição da Figura 2.1, temperaturas de até 25°C apresentam grau de pertinência igual a 1 no conjunto A; o grau de pertinência neste conjunto decresce à medida que a temperatura aumenta. Considera-se que uma temperatura igual a 50°C é "totalmente compatível" com o conjunto B, ao passo que temperaturas acima de 50°C apresentam grau de pertinência diferente de zero em C. Percebe-se, neste caso, que as funções de pertinência de A e C se interceptam em 50°C (TANSCHEIT, 2003).

2.8 - CONTROLADORES *FUZZY*

As técnicas de controle *fuzzy* originaram-se com as pesquisas e projetos de E. H. Mamdani e ganharam espaço como área de estudo em diversas instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento do mundo, sendo até hoje uma importante aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy*.

Ao contrário dos controladores convencionais em que o algoritmo de controle é descrito analiticamente por equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemático, o controle *fuzzy* utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo.

Os modelos matemáticos utilizados por técnicas convencionais de controle (clássico e moderno) geralmente falham quando sistemas mais complicados são considerados. A característica principal do uso do controle não-convencional em estruturas inteligentes, como o caso do controlador *fuzzy*, está ligada à capacidade destas estratégias de controle apresentar uma grande robustez e grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar. Também são versáteis, principalmente quando o modelo físico é complexo e de difícil representação matemática, encontrando maior utilidade em sistemas não-lineares (FERREIRA; PARANHOS, 2004).

A estrutura de controle *fuzzy* é classificada de acordo com a sua aplicação. Um controle com estrutura *fuzzy*-PI é um controle prático que possui a capacidade de remover o *off-set* da resposta em processos. Este tipo de controlador gera uma saída de controle incremental a partir do erro e da totalização do erro no tempo, sendo considerado um controle de velocidade. O controle *fuzzy*-PD gera saídas de controle a partir das entradas do erro e da variação do erro, sendo considerado controle de posição. O controlador *fuzzy*-PID produz uma saída incremental a partir do erro, variação do erro e aceleração do erro (LI; GATLAND, 1996).

Devido à natureza heurística, os controladores *fuzzy* possuem desempenho superior aos controladores convencionais, fornecendo tratamento de não-linearidades, quando sintonizados de forma adequada.

A estrutura de universo de discurso, variáveis lingüísticas, *fuzzificação*, base de regras, máquina de inferência e sistema de *defuzzificação* propostos por Mandani quando bem assimilada, é uma arma poderosa de simplificação e possibilita decisões rápidas e coerentes num ambiente de incertezas.

Um idéia do fluxo de informações de como opera um controlador de lógica *fuzzy*, é apresentada na Figura 2.2.

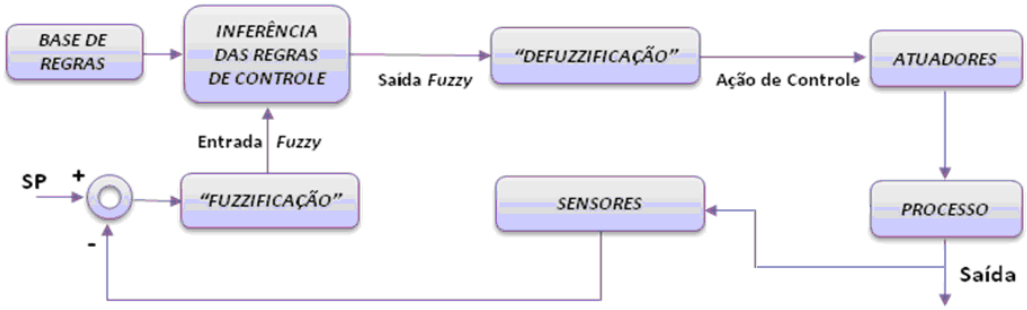


FIGURA 2.2 - Estrutura de um sistema com controlador *fuzzy*.

Percebe-se que o mecanismo principal deste modelo consiste em *fuzzificar*, ou seja, transformar em conjuntos *fuzzy* as medidas obtidas dos sensores, representadas por escalas numéricas, processá-las com base em regras estabelecidas com o auxílio de informações de especialistas e, em seguida, *defuzzificar*, o que significa transformar os conjuntos *fuzzy* obtidos na saída do controlador em valores de controle para o processo (ZADEH et al., 1997).

Um aspecto importante no desenvolvimento de controladores *fuzzy* é a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada e às variáveis de saída, pois o desempenho do sistema de inferência dependerá do numero de conjuntos e de sua forma.

2.8.1 - Base de Conhecimento

Consiste numa base de dados (funções de pertinência lingüística) e uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece as definições numéricas necessárias às funções de pertinência usadas no conjunto de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza os objetivos e a estratégia de controle utilizados por especialistas na área sendo assim, nesta etapa os especialistas devem ser consultados para informar como o controlador *fuzzy* deve operar, para que as regras sejam definidas (SHAW; SIMÕES, 1999).

Um recurso visual interessante sob o ponto de vista didático é a demonstração de variáveis e dos termos lingüísticos através de uma matriz, ressaltando que tal recurso é válido apenas quando a regra de controle tem somente duas entradas e uma saída para ser inferida.

2.8.2 - Processo de *Fuzzificação*

A *fuzzificação* é o mapeamento do domínio de entradas precisas (valores numéricos reais, como valores obtidos de um sensor) para valores de entradas *fuzzy* (*fuzzy input*), definidos pelas funções de pertinência (SHAW; SIMÕES, 1999).

Vale ressaltar, que segundo Shaw e Simões (1999), quanto maior a quantidade de variáveis lingüísticas, mais suave será o *output* do sistema, ou seja, a transição de um estado para outro será menos abrupta. Todavia, essa maior quantidade aumentará a possibilidade de o modelo, em operação, tornar-se instável.

2.8.3 - Processo de *Defuzzificação*

Consiste na conversão do variável *fuzzy* produzida pela máquina de inferência a uma variável numérica que atuará no processo de forma a regulá-lo. Para produzir um valor

numérico para aplicação ao processo, as variáveis lingüísticas produzidas pela máquina de inferência devem ser *defuzzificadas*.

O método de defuzzificação mais utilizado é o método do centro de gravidade, também denominado centróide, pois ele calcula o centro da área composta que representa o termo de saída *fuzzy* (μOUT). Esse termo de saída *fuzzy* é composto pela união de todas as contribuições de regras. Os graus de pertinência são utilizados como pesos para o cálculo de uma média ponderada (por esta razão este método também é conhecido como Método da Média Ponderada).

Cox (1995) justifica a preferência dos usuários por este método, principalmente em decorrência da sua propriedade de fornecer respostas (saídas *fuzzy*) que provocam ações suaves de mudanças para os próximos passos dos sistemas de controle.

2.9 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE CONTROLADORES *FUZZY*

Controladores *fuzzy* baseados em regras têm um grande número de vantagens, podendo-se destacar, segundo Shaw e Simões (1999):

- O uso de variáveis lingüísticas que é similar ao pensamento humano e facilita a discussão de idéias entre pessoas;
- As regras de controle *fuzzy* são de fácil compreensão e o efeito ou resultado de cada regra pode ser facilmente interpretado;
- Todas as funções e controle associadas com uma regra podem ser testadas individualmente e a simplicidade das regras permite o uso de pessoal menos treinado;
- Controladores *fuzzy* são confiáveis e bastante robustos, permitindo acrescentar, a qualquer momento, regras ao sistema.

Em sistemas convencionais equações complexas são processadas em seqüência, e se houver um erro sequer em uma delas, o resultado final é totalmente questionável. Já num controlador *fuzzy* cada regra é processada independentemente, e com isso seu efeito no

resultado final é mínimo. Isso significa que uma falha parcial do sistema pode não deteriorar significativamente o desempenho do controlador (SHAW; SIMÕES,1999).

Considerando um processo não linear, os conjuntos *fuzzy* são mais adequados na descrição de uma função de controle apropriada do que as equações de controle PI e PID. A maior desvantagem no controle *fuzzy* é a falta de métodos consagrados de projeto e o ajuste de um controlador de caráter geral.

2.10 - APLICAÇÕES DIVERSAS

Diversas áreas estão sendo beneficiadas pela tecnologia decorrente da lógica *fuzzy*. Dentre essas áreas podem ser citadas algumas que tiveram relevância no avanço tecnológico e que merecem destaque.

O Controle de processos industriais foi a área pioneira, sendo as primeiras experiências datadas de 1975 quando foi demonstrado no Queen College, em Londres, que um controlador *fuzzy* muito simples conseguiu controlar eficientemente uma máquina a vapor. Na mesma época, a primeira aplicação industrial significativa foi desenvolvida pela indústria de cimento F.L.Smidth Corp. da Dinamarca (GSI, 2004).

Hoje em dia, uma grande variedade de aplicações comerciais e industriais estão disponíveis, destacando-se neste cenário o Japão e mais recentemente, os EUA e a Alemanha. Os exemplos típicos incluem produtos de consumo tais como:

- Ar condicionado (Mitsubishi), que possuem sensor infravermelho que reconhece a quantidade de pessoas variando a potencia do aparelho, e permitindo economia de energia elétrica;

- Forno de microondas (Mitsubishi), que possui sensores apropriados (infravermelho, umidade, pressão atmosférica) e o controlador *fuzzy* ajusta a intensidade e duração do cozimento para cada tipo de comida.

- Câmeras de vídeo (Cânon, Panasonic), onde o controle de foco e abertura do diafragma de câmeras pode ser obtido através da lógica *fuzzy*, garantindo assim uma melhor qualidade das imagens obtidas e permitindo equipamentos mais simples e baratos;

- Televisores (SONY), onde é feita a correção automática de brilho, nitidez, cor e contraste;

- Máquinas de lavar roupa (Sanyo), onde o controle dos ciclos da máquina é obtido através do sensoreamento de diversas características para a lavagem, como a temperatura da água, peso das roupas e grau de sujeira. Aplicando-se o conhecimento empírico humano a um controlador *fuzzy* é possível obter a lavagem das roupas garantindo-se melhor utilização do equipamento e economia de energia.

Na indústria automotiva, destacam-se transmissões automáticas (Nasçam, Laxos), injeção eletrônica, suspensão ativa, freios antibloqueantes. Sistemas industriais incluem controle de grupo de elevadores (Hitachi, Toshiba), veículos auto-guiados e robôs móveis (Nasa, IBM), controle de motores (Hitachi), ventilação de túneis urbanos (Toshiba), controle de tráfego urbano, controle de parada e partida de trens de metrô (Sendai, Tokio).

Estas citações são ilustrativas, pois correntemente mais de 1.000 patentes envolvendo lógica *fuzzy* já foram anunciadas. Apesar do uso e da aplicação no Brasil ser incipiente, várias indústrias e empresas vêm desenvolvendo produtos e serviços (Villares, IBM, Klockner & Moeller, Robertshaw, Yokogawa, HI Tecnologia) (GSI, 2004).

O entusiasmo dos japoneses por lógica fuzzy é refletido na ampla faixa de outras aplicações que eles têm investigado ou implementado: reconhecimento de caracteres, sistemas *fuzz*y óticos, robôs, helicópteros comandados por voz através de um robô, sistemas de elevadores, entre outras. Estima-se que mais de 30% dos artigos até hoje publicados são de origem japonesa, denotando a atenção que os nipônicos dispensaram a essa forma de processamento (CUNHA, 2006; FERREIRA; PARANHOS, 2004).

Verifica-se então que nos últimos anos a lógica *fuzzy* tem encontrado numerosas aplicações. Todas elas correspondem a problemas muitos complexos ou mal conhecidos, que por isto não admitem tratamento por métodos baseados na lógica clássica. De fato a introdução da lógica *fuzzy* têm permitido modelar e resolver situações tradicionalmente

consideradas como intratáveis, e neste sentido constitui uma revolução em muitos campos, sendo que a mais conhecida e notável aplicação é o controle de processos.

2.11 - CONTROLE DE PROCESSOS UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY*

O desenvolvimento da lógica *fuzzy*, aliada à inteligência artificial, apresenta aplicações práticas em diversos sistemas de controle:

Vieira (1999) propôs a modelagem de um sistema de controle por lógica *fuzzy*, empregado no processo de secagem por atomização de produtos cerâmicos, através de um software HP VEE, com a finalidade de contribuir na melhora da qualidade nas industrias de pavimentos e revestimento cerâmico, e segundo o autor, é esperado que ocorram: ganhos energéticos significativos, otimização do controle de temperatura, menores tempos de armazenagem para homogeneização do produto, garantia de uniformidade do produto atomizado, redução substancial dos tempos de produção, menores tempos de estocagem.

Sellitto (2002) apresentou em seu trabalho a aplicação de lógica *fuzzy* no desenvolvimento e implantação do controle de um processo do tipo contínuo, relevante na indústria de cimento: a clinquerização. Com o uso do sistema especialista, o autor aponta ganhos em produtividade (t/h) e energético (kcal/t) de 3% a 10%.

Silva (2003) comparou o desempenho de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido controlado a diferentes modos de controle e a estratégia de controle *fuzzy* apresentou bom desempenho e uma demanda de energia elétrica 14,0% menor que os controladores convencionais, o que credenciou o controle avançado como melhor alternativa para o controle da temperatura de saída do fluido refrigerante.

Silva et al.(2003) desenvolveram uma simulação de um controlador *fuzzy* no processo de fabricação de garrafas PET, e mostrou que as tarefas de ajuste de parâmetros do processo, antes realizadas por um operador, foram efetuadas com maior rapidez e corrigindo as possíveis falhas pontuais de aquecimento geradas durante o processo de

fabricação de garrafas PET, sendo antes necessária a variação de temperatura de todo o sistema.

Fileti et al. (2005) implementaram algoritmos de controle *fuzzy* do tipo PID para controle on-line da composição do produto de topo de uma coluna de destilação em batelada, para mistura binária composta por n-hexano e n-heptano. O controlador *fuzzy* apresentou claramente desempenho superior ao controlador convencional, necessitando de razão de refluxo ≈ 80 % menor para manter a composição de topo em torno do *set-point* e, propiciou um menor tempo de processo e menor consumo de energia quando comparado com controlador PID convencional.

Fernandes Junior et al. (2005) implementaram algoritmos de controle *fuzzy* do tipo PID para controlar o nível de um sistema de tanques acoplados à bomba d'água. A utilização de controlador visava manter o nível do tanque 2 durante 200 s com mínimo *overshoot* e menor tempo de estabilização. A resposta da planta à mudanças de referência, utilizando controlador convencional PID, demonstrou valor de *overshoot* de 5 cm e tempo de estabilização de 120 s, enquanto que o controlador avançado *fuzzy* mostrou melhores resultados de *overshoot* e tempo de estabilização, 3 cm e 90 s, respectivamente.

O controle *fuzzy* tem demonstrado grande eficiência principalmente no campo da biotecnologia:

Steyer et al. (1997) implementaram o controlador *fuzzy* em um processo de digestão anaeróbia para tratamento de efluente industrial. O biogás gerado pela fermentação foi reaproveitado e o objetivo do controle *fuzzy* era manter a vazão do gás em torno do valor de *set-point* (40 L/h), utilizando como variável manipulada a vazão de entrada do influente. O pH e a temperatura também foram controlados durante o processo, com valores de *set-point* de 7 e 35 °C, respectivamente, favorecendo as condições ideais para a atuação das bactérias. O controlador *fuzzy* apresentou excelente desempenho quando distúrbios foram aplicados no processo (controle servo). E diante dos resultados obtidos, os autores ressaltaram a eficiência do controle avançado em bioprocesso.

Martínez et al. (1999) apresentaram uma estratégia de controle *fuzzy* para o processo de fermentação de vinho baseado no controle da taxa de fermentação. O objetivo do controle foi manter a taxa de fermentação em um determinado nível, e manter a

temperatura dentro de uma faixa pré-estabelecida entre 16 e 22 °C, por refrigeração, para manter ao máximo o processo de fermentação naquela taxa adequada até que a mesma começasse a diminuir. Com a ação do controlador avançado a taxa de fermentação indicada foi mantida por 50 % do tempo do processo (70 h), evitou-se um aumento muito elevado da temperatura e da taxa de reação, preservando a qualidade organoléptica do vinho. O tempo de fermentação com o *fuzzy* é reduzido de 170 h (controle convencional) para 140 h. Para o processo de fermentação, através do uso de controladores convencionais, onde o processo é realizado isotermicamente (18 °C), foi necessária a atuação da variável manipulada (refrigeração) durante todo o processo, enquanto que com o controle *fuzzy* a refrigeração foi usada somente após 15 h e em seguida foi diminuída a necessidade de sua utilização, diminuindo também o consumo de energia durante o processo.

Souza Jr. e Almeida (2001) utilizaram de lógica *fuzzy* para controle de um reator bioquímico em batelada alimentada, num processo de produção de *Cephalosporin* C (antibiótico produzido industrialmente através de bioprocesso). Os autores tinham por objetivo implementar um sistema *fuzzy* que automaticamente selecionasse o momento em que a alimentação da cultura (sacarose) deveria ser iniciada, a partir da detecção do nível de CO_2 produzido. O sistema utilizando lógica *fuzzy*, não somente detectou o momento adequado para adição da sacarose, como também, distinguiu diferentes fases que ocorreram durante o processo de fermentação. O algoritmo mostrou-se robusto nas condições testadas, apresentando um tempo médio de alimentação da cultura de 42 h, permitindo operação automática segura.

Segundo Horiuchi e Kishimoto (2002) grandes empresas, tais como Ajinomoto, Sankyo, Gekkeikann Sake e Nippon Roche, obtiveram grandes resultados com a aplicação de controle *fuzzy* em seus bioprocessos. As empresas citadas relataram que não houve dificuldade em aplicar o desenvolvimento de sistema de controle *fuzzy* da escala piloto para escala comercial sem maiores modificações nas regras de controle e funções de pertinência. Todas estas empresas apresentaram maior estabilidade do processo, maior produtividade e melhor qualidade de seus produtos.

Mariyama (2004) realizou um trabalho de simulação dinâmica e controle de um pasteurizador a placas de três seções, regeneração, aquecimento e resfriamento, para suco

de laranja natural, utilizando estratégia de controle *fuzzy/ feedback/* SISO. A autora aplicou perturbações no *set-point* e os controladores *fuzzy*-PI e *fuzzy*-PID foram avaliados sob o aspecto de condições de estabilização do processo, apresentando desempenhos satisfatórios.

Berto (2004) comparou experimentalmente o desempenho de controladores PID e *fuzzy* no processo de pasteurização do suco de laranja e os dois tipos de controladores se mostraram eficientes para manutenção das temperaturas de pasteurização e resfriamento, mantendo-se dentro da faixa de referência adotada de ± 0,5 °C, com valores semelhantes para os índices de desempenho empregados. Menores índices de erros foram encontrados pelo controlador avançado para o controle da temperatura de resfriamento e pelo controlador convencional no caso do controle da temperatura de pasteurização do suco.

Adújar e Bravo (2005) desenvolveram um sistema de controle neuro-*fuzzy* com estratégia MIMO, aplicado no tratamento físico-químico de efluentes industriais proveniente de uma fábrica de celulose. Como o tratamento deste efluente é muito demorado, constituindo o principal problema para este processo, o objetivo do uso de controlador avançado foi de aumentar a produtividade do tratamento de águas residuárias e diminuir o tempo de processo necessário para produzir um afluente em condições de ser lançado ao rio. O controle avançado proporcionou resultados satisfatórios, apresentando diminuição da demanda bioquímica de oxigênio de 1100 ppm (controle convencional) para 900 ppm; e ainda mantiveram o teor de sólidos solúveis e alcalinidade do meio (pH) em torno do *set-point*: 220 ppm e 7,5, respectivamente.

Existem muitos trabalhos de especialistas tornando possível a implementação da inferência *fuzzy* à aplicação em bioprocessos. Os sistemas novos que usam a inferência *fuzzy* serão estabelecidos e a aplicação do controle *fuzzy* virá ser usada extensamente neste campo (HIROYUKI; KOBAYAZHI, 2000).

2.12 - SISTEMA *FIELDBUS*

A utilização crescente de estruturas baseadas em redes industriais constitui na atual tendência na área de automação industrial, pois esta abordagem promove maior

concentração de dados e uma redução de cabos, proporcionando uma facilidade em detecção de falhas da rede, além de menores custos.

Dentre as tecnologias de redes industriais a *Fieldbus Foundation* (FF), desde 1996, se apresenta como uma das mais promissoras devido ao seu processo de padronização e especificação de blocos funcionais serem bastante abrangentes.

De uma forma geral, o *fieldbus* pode ser definido como um sistema de comunicação digital, serial e bidirecional que permite a interligação em rede de múltiplos instrumentos diretamente do campo realizando funções de controle e monitoração de processo e estações de operação através de softwares supervisórios (SMAR, 1998).

As redes digitais *fieldbus* usam sua própria estrutura para transitar sinais digitais em sinais analógicos de 4-20 mA através da modulação destes sinais. A tecnologia *Fieldbus Fundation* possui um protocolo confiável para comunicação e instrumentação em controle de processos, interligando equipamentos como: sensores, atuadores e controladores, com a habilidade de operar dispositivos múltiplos, independentemente do fabricante, no mesmo sistema sem a mínima perda de funcionalidade e interoperabilidade.

2.12.1 - Benefícios do Uso da Tecnologia *Fieldbus*

Segundo a Smar (2007), podem ser citadas como vantagens oferecidas pela tecnologia *fieldbus*, as seguintes características:

- **Interoperabilidade**

Com a interoperabilidade, um dispositivo *fieldbus* pode ser substituído por um dispositivo similar de outro fornecedor com maior funcionalidade na mesma rede do *Fieldbus*, mantendo as características originais. Isto permite aos usuários mesclar dispositivos de campo e sistemas de vários fornecedores. Dispositivos individuais *fieldbus* podem também transmitir e receber a informação de multivariáveis, comunicando-se

diretamente um com o outro sobre o barramento *Fieldbus,* permitindo que novos dispositivos sejam adicionados ao barramento sem interromper o controle.

- **Versatilidade**

A versatilidade do *fieldbus* permite, em caso de pane em alguns dos blocos de funcionais, a reconfiguração automática on-line, especificando em qual bloco funcional e em que dispositivo será feita a execução. Se não houvesse a padronização internacional, a reconfiguração de tais blocos só poderia ser implementada em dispositivos iguais e de mesmos fabricantes.

- **Vista expandida do processo**

Dispositivos modernos *fieldbus*, com comunicação poderosa microprocessada permitem que os erros de processo possam ser reconhecidos mais rapidamente e com uma maior certeza. Como conseqüência, os operadores de planta são notificados de condições anormais ou da necessidade de manutenção preventiva, e podem tomar melhores decisões sobre a produção. Os problemas que diminuem a eficiência operacional são corrigidos mais rapidamente.

- **Redução de custos de fiação e de manutenção**

A tecnologia *fieldbus* é usada na indústria para substituir o sinal analógico de 4- 20 mA (miliampére). Com a esta tecnologia há uma economia significativa na fiação empregada, dado que usando o sinal analógico de 4-20 mA é necessária que cada dispositivo tenha seu próprio conjunto de fios e seu próprio ponto de conexão. *Fieldbus* elimina tal necessidade empregando um esquema que necessita somente de um par trançado, proporcionando como um dos benefícios a redução de custos de fiação.

Redução de custo adicional pode ser conseguida com a redução do tempo necessário para a construção e partida, bem como com a simplificação da programação das funções do controle e da lógica, usando os blocos de função embutidos nos dispositivos.

2.12.2 - Arquitetura *Fieldbus*

A tecnologia *fieldbus* não pertence a nenhuma empresa ou é regulada por um único organismo. É controlada pela *Fieldbus Foundation* uma organização não lucrativa que consiste em mais de 100 dos principais fornecedores e usuários de controle e instrumentação do mundo (SMAR, 2007).

A arquitetura *fieldbus* inclui duas funções principais: interconexão e aplicação. Interconexão diz respeito à passagem de dados entre dispositivos. A parte do padrão que endereça essa funcionalidade é o protocolo de comunicações. Aplicação diz respeito ao desenvolvimento de sistemas de controle e automação.

Os equipamentos de campo que permitem tecnologia *fieldbus* possuem blocos de função pré-configurados que podem ser acessados por todos os sistemas de controle com alguma integração com *foundation fieldbus*. Alternativamente, usando este sistema é possível não somente usar os blocos pré-configurados, mas também definir quantos e quais tipos de bloco é desejável no equipamento de campo. Os equipamentos de campo são capazes de executar até 20 blocos de função (SMAR, 2007).

O programa utilizado para permitir a configuração dos instrumentos que possuem tecnologia *fieldbus* é o SYSCON. O SYSCON (*System Configurator Tool*) é um software usado para configurar, operar e dar manutenção aos equipamentos de campo com maior segurança e disponibilidade da planta. Este software oferece interação eficiente usando Windows NT, Windows 2000 e Windows XP.

É permitida a diversificação de recursos entre os fabricantes, uma vez que a implementação dos algoritmos nos blocos é livre. Deste modo, implementações de estratégias de controle mais avançadas do que as clássicas, baseadas em PID, invariavelmente se dão via utilização de blocos funcionais não padronizados (LIMA, 2004).

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MONTAGEM DO PROTÓTIPO PARA PRECIPITAÇÃO DA BROMELINA

Nesta etapa foi realizada a montagem do sistema que possibilitou a realização dos experimentos utilizando o processo de precipitação da bromelina de forma eficiente. Para a montagem, várias tarefas foram efetuadas, entre elas:

- O planejamento para construção do suporte, utilizando material Metalon, para a instalação do sistema de precipitação e confecção do tanque de precipitação, utilizando material aço-inox;

- A construção das tubulações do sistema, para possibilitar a circulação do fluido refrigerante em torno da camisa do tanque de precipitação, e em seguida, foi realizada uma verificação da existência de possíveis vazamentos. Foram utilizadas tubulações de cobre soldável com ½ in de diâmetro;

- A utilização de material elastomérico isolante com espessura de 19 mm da linha AF/ ARMAFLEX, para garantir o isolamento do tanque de aço-inox e das tubulações do sistema para aumentar a eficiência da troca térmica durante o processo de precipitação. Optou-se pelo uso deste isolante em virtude de sua baixa taxa de transferência de calor e facilidade de manuseio;

- A construção de um painel de comando para facilitar as interligações dos equipamentos e sensores de campo com sistema *fieldbus* de forma mais versátil;

- A instalação e configuração dos parâmetros do inversor de freqüência (elemento final de controle utilizado neste trabalho) para possibilitar sua eficiência de atuação.

O planejamento e a montagem do protótipo proporcionaram maior conhecimento das tecnologias envolvidas e dos instrumentos utilizados, permitindo uma maior independência quanto a manutenções preventivas e corretivas.

O sistema desenvolvido para operação em batelada alimentada, utilizado para a realização dos ensaios de precipitação da bromelina, pode ser representado pelo fluxograma contido na Figura 3.1.

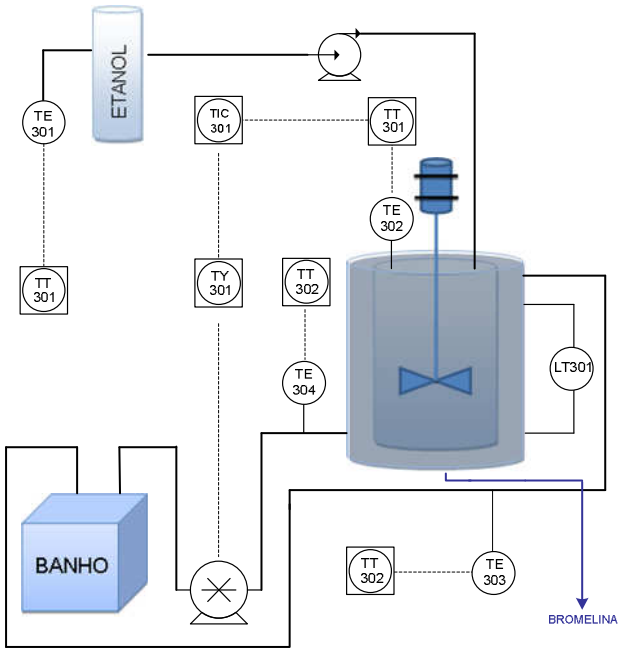


FIGURA 3.1 - Fluxograma do sistema de precipitação da bromelina.

O sistema para operação em batelada alimentada é constituído basicamente pelos seguintes elementos:

- Um tanque principal de aço inox com capacidade de aproximadamente 1000 mL onde ocorre a precipitação da enzima;
- Um tanque de armazenamento do reagente de precipitação álcool etílico, 99,5%;

- Uma bomba de deslocamento positivo do fabricante RZR modelo 500, 1 HP 220V com vazão máxima de aproximadamente 1000 L/h, a fim de possibilitar a circulação do fluido refrigerante (propilenoglicol) pelo sistema de precipitação, sendo que este apresenta alta viscosidade às baixas temperaturas;

- Uma bomba peristáltica da marca *Masterflex Pump Controller* da Cole Parmer Instrument Co., para alimentação do álcool etílico no tanque de precipitação;

- Quatro termoresistências do tipo Pt 100: TE301, TE302, TE303 e TE304, que possibilitam o monitoramento das temperaturas de entrada do álcool, do tanque de precipitação, da saída e da entrada da camisa de refrigeração, respectivamente;

- Dois transmissores de temperatura *fieldbus* do tipo TT302 da Smar com sinal de saída digital, ligados diretamente às termoresistências Pt100 para monitoramento e controle das condições operacionais do sistema;

- Um transmissor de nível (LT 301), que consiste num transmissor de pressão diferencial (LD 302) da Smar, e possibilitou o monitoramento do nível do tanque de precipitação da bromelina;

- Inversor de freqüência VLT 2800 (elemento final de controle), que age como um atuador, alternando a velocidade de funcionamento da bomba de propilenoglicol (variável manipulada).

3.2 - MONTAGEM DO PAINEL DE COMANDO DO PROTÓTIPO

Neste trabalho, foi necessária a montagem de um painel de comando que possibilitasse efetuar as ligações elétricas de uma forma mais didática, e que facilitasse as futuras manutenções corretivas.

Os objetos foram dispostos visando maior praticidade das ligações entre os instrumentos, e para a montagem do painel foram necessários bornes, cabos e terminais tubulares, disjuntor e fusíveis, fonte (HI Tecnologia), inversor de freqüência modelo VLT

2800, fabricante *Danfoss*, para permitir a variação da rotação da variável manipulada, entre outros.

O esquema da montagem do painel de comando encontra-se no Apêndice A.

3.3 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para o gerenciamento do sistema foram utilizados os *software* supervisório AIMAX 4.2, *TA Engineering Co. Inc*, e o INDUSOFT *Web Studio* 6.1, que se comunicam com uma rede inteligente de equipamentos e sensores *fieldbus* através de uma placa DFI 52.

Estes softwares de supervisão se comunicam com equipamentos digitais fornecendo informações, em tempo real, na forma numérica ou por gráficos temporais deixando mais acessível a interface homem-máquina. Suas características permitem a monitoração e controle de processos, facilitando as operações e aumentando a produtividade da planta industrial e a qualidade de seus produtos.

O sistema de aquisição dos dados obtidos durante os experimentos constituiu no armazenamento dos valores de interesse em histórico para posteriormente serem efetuados gráficos em que possa ser visualizado o comportamento das variáveis.

3.4 - IMPLEMENTAÇÃO DA REDE FIELDBUS

A tecnologia de transmissão em rede, onde ocorre a interligação dos vários equipamentos, permite a obtenção da monitoração das condições de processo de maneira simples, rápida e eficiente. A supervisão e o controle do processo foram possíveis através da utilização de dispositivos e controladores que integram o sistema *fieldbu*s, apresentados na Figura 3.2.

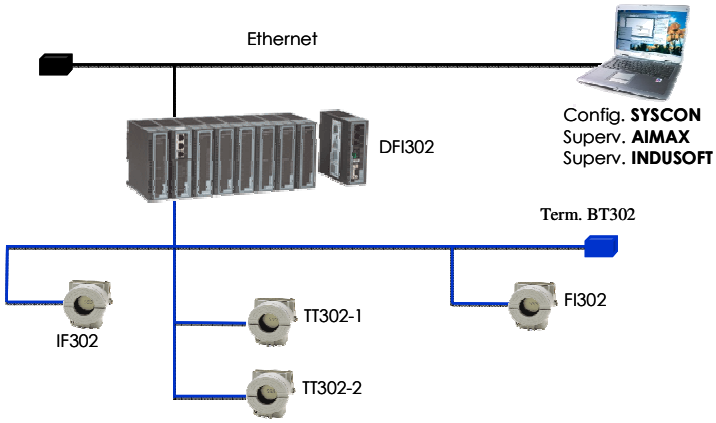


FIGURA 3.2 - Rede *Fieldbus* para o sistema de precipitação da bromelina.

Os sensores e equipamentos instalados na rede *fieldbus* (fabricante SMAR) são inteligentes, pois estes possuem funções especiais de controle que podem ser programadas e interligadas remotamente via o software de programação SYSCON.

Neste trabalho, a rede *fieldbus* foi composta pelos seguintes dispositivos do fabricante SMAR:

- Uma interface de campo distribuída (DFI 302):

O DFI - *fieldbus universal bridge* – é o gerenciador de comunicação, ou seja, o componente que controla as ações relacionadas ao sistema *fieldbus*. Não é propriamente um equipamento, mas um componente de *hardware* integrado ao sistema que é capaz de gerenciar, monitorar, controlar, manter e operar a planta. É um elemento fundamental na arquitetura *fieldbus*, executando a maioria das funções exigidas pelo sistema de controle. O DFI conecta todo o sistema a uma rede E*thernet* utilizando para isso um *switch*. Possui endereço fixo de IP, o qual pode ser acessado pelo sistema supervisório através da tecnologia OPC.

Este equipamento foi completamente configurado através dos Blocos Funcionais disponíveis no padrão *Fieldbus Foundation*. Toda a configuração e manutenção do sistema foram possíveis de ser realizadas, com alta eficiência e interoperabilidade.

- Um conversor corrente - *fieldbus* (IF 302):

O IF302 permitiu a interligação de instrumentos com saída 4 a 20 mA à rede *Foundation Fieldbus*. Este dispositivo possui três canais de entrada independentes, e possui a função de promover a interligação das informações de campo com a rede (supervisório), devido a sua capacidade de converter sinais analógicos de 4 – 20 mA em protocolo *Fieldbus* (digitais). Neste instrumento foi conectado o LT301, dispositivo utilizado para medição do nível do tanque de precipitação, e ainda foi conectada a saída do inversor de freqüência, onde através da conversão do sinal de corrente para *fieldbus,* permitiu o acompanhamento da potência consumida pela bomba de propilenoglicol de acordo com a vazão da mesma.

- Um conversor *fieldbus* - corrente (FI 302):

Este dispositivo possui três canais de saída independentes, e possui a função de converter sinais digitais *fieldbus* para analógicos 4-20 mA, permitindo que estes sinais sejam enviados ao atuador para fins de controle. Neste instrumento foi conectado o inversor de freqüência INV. FREQ. I (elemento final de controle), onde o mesmo recebia as informações provenientes do controlador o qual estava configurado através do bloco funcional 'PID Control' do software SYSCON.

- Dois transmissores inteligentes de temperatura (TT302):

Estes dispositivos possuem dois canais que transformam sinais analógicos em padrão de protocolo *fieldbus*. No primeiro transmissor de temperatura estão ocupando os dois canais, os sensores de temperatura do tipo PT100: TT301 (temperatura do álcool) e TT302 (temperatura do tanque de precipitação). No segundo transmissor de temperatura ocupam os respectivos canais os sensores de temperatura: TT303 (temperatura de saída da camisa do tanque de precipitação) e TT304 (temperatura de entrada na camisa do tanque de precipitação).

A configuração dos dispositivos da rede e a implementação das malhas de controle convencionais foram realizadas através do SYSCON, sendo possível realizar alterações, manutenções e operações *on-line*.

Os principais blocos funcionais padrões (*Resource,* T*ransducer, Display, Analog Input*, *Analog Output*, *Signal Characterizer*, PID) no SYSCON foram devidamente configurados de maneira a se conseguir a funcionalidade desejada do dispositivo, bem como definidos características e comportamentos que trabalhassem de maneira padrão para que os dispositivos pudessem interoperar.

Dentro do bloco funcional *Transducer Block,* foram configuradas características tais como, tipo de sensor a ser utilizado na planta, canal de comunicação utilizado no transmissor, modo de atuação e descrição do *tag* do instrumento. No *Display Block* foram configurados, o modo de atuação do bloco e os *tags* dos instrumentos que apareceriam na tela de exibição do próprio instrumento.

O transdutor de display (*Transducer block*) é responsável por mostrar na tela do instrumento o valor da variável escolhida quando está no modo monitoramento. A configuração via SYSCON, permitiu selecionar o modo de operação de bloco, as saídas monitoradas e visualização das variáveis.

Nos blocos AI (*analog input*) e AO (*analog output*) foram determinadas as escalas de entrada e saída, para os sensores de temperatura (-20 a 50°C), sensor de nível (0 a 100%) e inversor de freqüência (0 a 60 Hz), bem como o tipo de atuação (se direta ou indireta).

Foram configurados no bloco funcional PID, a variável controlada e a variável manipulada. A função principal deste bloco funcional foi a implementação dos parâmetros do controlador PID, sendo eles: K_c, τ_i, τ_d, e o tipo de ação deste controlador, que neste caso, foi a ação direta, pois com o aumento no valor da variável controlada, seria necessário um aumento no valor da variável manipulada.

É relevante também citar a configuração do bloco CHAR (*Signal Characterizer)*, que é o bloco onde se implementou os dados da calibração dos sensores utilizados na planta. Este bloco gera uma função de ajuste da curva de calibração, permitindo que a leitura da temperatura que chega ao SYSCON represente o valor de temperatura corrigido. A função de ajuste foi determinada por uma tabela com coordenadas X e Y, onde foram informados valores de temperatura corrigida e temperatura lida obtidos durante a calibração.

Toda a configuração que foi realizada nos blocos funcionais está representada no Apêndice B.

3.5 - CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

Para garantir a alta qualidade e fidelidade das variáveis monitoradas foi de fundamental importância a calibração dos sensores utilizados.

As termoresistências foram colocadas dentro do banho de refrigeração próximas a um termômetro padrão utilizado como referência para a calibração. A temperatura de *set-point* do banho de refrigeração foi alterada em intervalos de temperatura de 5 °C, numa faixa de -20 °C a 40 °C. Para cada intervalo de temperatura, foram lidas e registradas as temperaturas do termômetro padrão e de cada uma das termoresistências, permitindo a construção das curvas de calibração e equações de ajuste.

3.6 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE PROPILENOGLICOL

Devido à freqüência de rotação da bomba de propilenoglicol ter sido definida como variável manipulada do sistema de controle proposto tornou-se imprescindível a verificação do comportamento da vazão do propilenoglicol (L/h) com relação à variação da freqüência da bomba.

A freqüência de rotação da bomba foi normalizada em 0 a 100% que corresponde a faixa de aplicação de 0 a 60 Hz. A vazão foi determinada pela freqüência (Hz) fornecida ao inversor de freqüência, de acordo com o valor de rotação (%) fornecido ao sistema. Estes valores foram registrados e a curva de relação entre estas variáveis foi construída.

3.7 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA DE PROPILENOGLICOL

Foi também de interesse deste trabalho fazer uma observação do consumo de energia deste sistema para ambos os usos dos controladores convencionais e *fuzzy*. A energia consumida por um motor está relacionada com a sua potência (W) e a velocidade, dada pela freqüência (Hz), com que o mesmo trabalha, a qual está relacionada com a sua vazão. Sendo assim, foi necessário fazer o levantamento da curva que relaciona a potência consumida pelo motor (W) e a vazão de propilenoglicol (L/h) estabelecida pela variável manipulada durante os ensaios.

Foram utilizados valores de rotação (%), no supervisório, correspondentes aos valores de freqüência (Hz) definidos numa faixa de 5 a 60 Hz, em intervalos de 5 Hz. Para cada valor de freqüência registrava-se o valor correspondente de potência (W) consumida. Devido à freqüência possuir uma relação direta com a vazão, foi possível assim a construção de uma curva que relacionasse a Potência consumida (W) e a vazão de propilenoglicol aplicada (L/h).

3.8 - CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE NÍVEL

O sistema possui um transmissor de pressão diferencial utilizado para monitoramento do nível do líquido presente no tanque durante os ensaios. A indicação do nível permitiu determinar o momento final dos ensaios, quando o mesmo indicava um volume de 750 mL, proporcional a relação de 1: 4 (caldo álcool).

O instrumento foi calibrado de forma bastante simples, limitando-se apenas, a alterar o *Zero* e o *Span* de acordo com a faixa de trabalho de 0 a 100%. Para ajustar o Zero foi aplicada uma pressão correspondente ao valor inferior do nível, a qual correspondia ao tanque de precipitação vazio, onde através de uma chave magnética ajustava-se o valor indicado para 0%, o que correspondia a 4 mA. Em seguida, para calibrar o S*pan*, procedeu-se de forma semelhante: foi aplicada uma pressão correspondente ao limite superior, a qual

correspondia a adição de 750 mL de caldo de abacaxi no tanque. Após a estabilização do valor, o valor indicado no transmissor foi ajustado para 100 %, que correspondia a um sinal de 20 mA.

3.9 - CARACTERIZAÇÃO DA BROMELINA

3.9.1 - Preparo das Amostras

Neste trabalho foram utilizados como resíduos do abacaxi, somente casca e talo, visto que foi comprovado por Cesar et al. (1999), que o talo e a casca possuem, em torno de 40% da capacidade proteolítica do fruto, o que é interessante para a recuperação da enzima. Coroa e folhas não apresentam capacidade proteolítica considerável e com isso não foram consideradas para estudo.

As amostras de caldo de abacaxi (*bromeliaceae*), variedade pérola, foram preparadas utilizando as cascas e os talos do fruto, devidamente triturados com água destilada na proporção de 1:1. Em seguida, foi feita uma filtração para a retirada das fibras obtendo-se um caldo que foi em seguida armazenado em congelador a aproximadamente -18 °C. As amostras, armazenadas em pequenos lotes, foram descongeladas à medida que os ensaios de precipitação eram realizados.

3.9.2 - Determinação de Proteínas Totais

3.9.2.1 - Construção da curva-padrão

Para a determinação da concentração de proteínas presentes na amostra foi necessária a determinação de proteínas totais, sendo imprescindível a construção de uma curva-padrão dada pela relação entre a absorbância medida experimentalmente e a

concentração da enzima. Foi utilizada como solução-matriz uma solução de BSA (Soro de Albumina Bovino) em diferentes concentrações, abrangendo a faixa de resultados obtidos nas amostras. As concentrações foram de 0,00; 0,10; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00 mg/mL de BSA e as determinações foram feitas em triplicatas. O procedimento detalhado para a construção da curva padrão encontra-se no Anexo A.

3.9.2.2 - Método para determinação de proteínas

Muitos métodos espectrofotométricos, ao longo dos anos, têm sido propostos para determinação de proteínas totais, mas não existe uma metodologia considerada de uso universal para todos os meios. Um dos métodos bastante utilizado é o método de Bradford, o qual foi utilizado neste trabalho.

O método de Bradford é uma técnica para a determinação de proteínas totais que utiliza o corante de "Coomassie brilliant blue" BG-250, conhecido como reagente de Bradford. Este método é baseado na interação entre o corante BG-250 e macromoléculas de proteínas. No pH de reação, a interação entre a proteína de alto peso molecular e o corante BG-250 provoca o deslocamento do equilíbrio do corante para a forma aniônica, que absorve fortemente em 595 nm (ZAIA et al., 1998).

Este método é rápido e sensível e a reprodutibilidade dos seus resultados depende do grau de pureza do corante BG-250. A metodologia utilizada para determinação de proteínas totais está descrita no Anexo A, segundo Bradford (1976).

3.9.3 - Determinação da Atividade Enzimática

A atividade proteolítica da bromelina foi estimada de acordo com o método de biureto, que é um método rápido e que utiliza reagentes de baixo custo. Este método baseia-se na reação do reativo do biureto que é constituído de uma mistura de cobre e

hidróxido de sódio com um complexante (tartarato de sódio) que estabiliza o cobre em solução.

O cobre em meio alcalino, reage com proteínas formando um complexo quadrado planar com a ligação peptídica. O produto de reação apresenta duas bandas de absorção, uma em 270 e 540 nm. Apesar da banda de 270 nm ser mais sensível ao método de biureto, a banda na região de 540 nm é a mais utilizada para fins analíticos, porque diversas substâncias, normalmente presentes na maioria dos meios analisados, absorvem na região de 270 nm causando muita interferência no método (ZAIA et al., 1998).

A descrição os procedimentos necessários para utilização deste método encontra-se no Anexo B.

3.9.3.1 - Efeito da temperatura

Para observar o efeito da interferência da temperatura na determinação da atividade enzimática, a atividade da bromelina foi medida em diferentes valores de temperatura, usando o método de biureto. O efeito da temperatura foi determinado variando a temperatura de incubação de 5 a 30 ºC sob as mesmas condições dos ensaios de precipitação.

3.10 - DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO PROCESSO

Antes de se realizar ensaios precipitação foi imprescindível a determinação das condições iniciais dos ensaios, servindo de referência para as perturbações no sistema.

Diante de uma série de combinações de condições que poderiam ser usadas para iniciar os ensaios, optou-se em realizar um planejamento experimental para análise da influência das principais variáveis do sistema e determinação de seus valores iniciais.

O método de planejamento experimental utilizado neste trabalho foi o planejamento fatorial. A idéia básica deste método é executar um conjunto de experimentos de modo a considerar todas as possíveis variações dos fatores em estudo, utilizando um número mínimo de experimentos.

Este método experimental permite a obtenção de correlações multivariáveis e é classificado como um método do tipo simultâneo, onde as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo a partir dos ensaios com valores adequadamente estabelecidos (níveis), possibilitando uma análise estatística dos resultados obtidos (resposta).

O objetivo de se realizar um planejamento experimental neste trabalho foi o de verificar qual a melhor combinação de variáveis do sistema que indicasse as condições iniciais adequadas, a fim de proporcionar uma posterior estratégia de controle.

Para o planejamento fatorial deste trabalho foram selecionados três fatores, ou seja, três principais variáveis do sistema em estudo, em três níveis de variação. Foram escolhidos como fatores: Vazão de etanol (mL/s), sendo representada por VE; vazão de propilenoglicol (L/h) fornecida pela bomba de deslocamento positivo, sendo representada por (VB); Temperatura de propilenoglicol na entrada do tanque de precipitação de bromelina (°C), sendo representada por (TE).

Foram selecionadas como variáveis resposta a máxima variação da temperatura interna do tanque de precipitação (°C), representada por ΔT, e o tempo requerido para a resposta alcançar pela primeira vez o valor do *set-point* (tempo de resposta), representado por TR. Foram escolhidas as condições que propiciassem maiores valores para a variável ΔT de forma a proporcionar um maior desafio ao controlador, e que propiciasse menores valores de TR, para proporcionar uma atuação mais rápida do controlador, fazendo com que a variável controlada se mantivesse em torno do valor de referência. Encontram-se, no Apêndice C, algumas curvas obtidas em ensaios do planejamento experimental realizado.

Foi adotada a metodologia do planejamento fatorial composto central segundo Barros Neto (2003). A realização dos ensaios constituiu na adição de 150 mL do caldo de abacaxi no tanque de precipitação, através do qual circulava o fluido refrigerante propilenoglicol a uma vazão e temperatura de acordo com uma faixa de valores

selecionados (níveis). Quando a temperatura do tanque chegava a 5 °C iniciava-se a adição de etanol com diferentes vazões indicadas pelos níveis adotados. O ensaio era finalizado quando era mínima a variação da temperatura internado tanque de precipitação.

O método experimental permitiu a obtenção do conhecimento do comportamento das variáveis e o modelo pôde ser usado para construção de gráficos de superfícies de resposta que de certa forma auxiliaram na construção da base de conhecimento para o controlador *fuzzy*.

3.11 - REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE PRECIPITAÇÃO

Durante o ensaio, a amostra de caldo de abacaxi (casca e talo) foi colocada em um tanque com camisa de refrigeração de capacidade 1000 mL, sendo este alimentado com solvente etanol 99,5 % a temperatura de aproximadamente 23 °C e a uma vazão de 0,6 mL/s, segundo condições iniciais estabelecidas pelo planejamento experimental.

Os ensaios de precipitação foram realizados em bateladas com sistema de agitação e resfriamento. Para o resfriamento do sistema de precipitação foi utilizado o fluido refrigerante propilenoglicol a uma temperatura inicial de entrada na camisa do tanque de 0 °C, com vazão inicial de 375 L/h (40%).

Cesar et al (1999), demonstraram que em uma reação de precipitação de bromelina em 1 estágio com 80 % v/v de etanol a 5 °C é possível recuperar grande parte da enzima originalmente presente. Sendo assim, a reação de precipitação foi efetuada até que existisse uma proporção de 1:4 (caldo/álcool) no tanque, sendo esta a proporção mais adequada para promover melhor eficiência na precipitação da bromelina. A reação de precipitação foi mantida a 5 °C através dos controladores propostos neste trabalho e o tempo de contato entre o etanol e as proteínas presentes na amostra foi de 17 minutos.

3.12 - ENSAIOS DE SINTONIA DO CONTROLADOR CONVENCIONAL

Nesta etapa foram ajustados os valores dos parâmetros do controlador: Kc (ganho), τ_i (tempo integral), τ_d (tempo derivativo). Ao processo de ajuste das características do controlador ou sistema para atingir a resposta desejada dá-se o nome de sintonia.

Foi utilizado neste trabalho o método de sintonia proposto por Ziegler e Nichols, que é um método clássico, simples, e aplicável na indústria. Este método baseia-se na realização de um único experimento, com sistema em malha aberta, cujo objetivo é o de obter experimentalmente a resposta do processo a uma perturbação do tipo degrau, de intensidade A, para ajuste e analogia ao modelo de primeira ordem com tempo morto, conforme esquema da Figura 3.3.

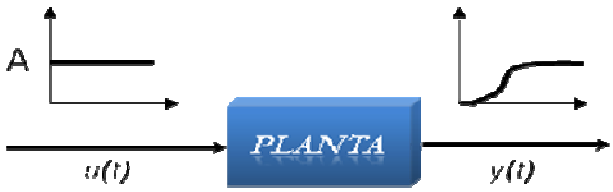


FIGURA 3.3 - Resposta de um processo a uma perturbação do tipo degrau.

A metodologia adotada para a implementação do 1° método de Ziegler e Nichols para a sintonia foi a seguinte:

Ao tanque de precipitação, sob agitação constante, foi adicionado um volume inicial de 150 mL de caldo de abacaxi. O fluido refrigerante propilenoglicol que passava pela camisa do tanque encontrava-se a uma temperatura constante de aproximadamente 0 °C e com vazão equivalente a 40 % da capacidade da bomba. Para alcançar um regime permanente, havia uma retirada e alimentação constante do líquido presente no tanque de precipitação. Para a alimentação do tanque com caldo de abacaxi, foi utilizada uma bomba peristáltica, e foram mantidas iguais as vazões de entrada e saída deste líquido, sendo que a

temperatura de entrada era mantida à mesma temperatura do caldo inicial (5 °C), para que esta adição não contribuísse em mais uma fonte de perturbação para o meio.

Quando o sistema encontrava-se a uma temperatura de aproximadamente 5 °C, sendo esta a temperatura definida para o *set-point* do sistema, iniciava-se a adição do agente precipitante etanol a uma vazão constante de 0,6 mL/s. Neste instante foi efetuada uma perturbação degrau positiva no sistema de intensidade A = 30, ou seja, a vazão de propilenoglicol passou de 40 % para 70 %. Após a perturbação, procedeu-se com o ensaio até que o mesmo alcançasse regime permanente.

Após realização do ensaio, foi obtida uma curva em S, onde ao traçar uma reta tangente ao ponto de inflexão, obteve-se o tempo morto e a constante de tempo, que através das equações propostas por Ziegler e Nichols, foi possível encontrar os valores de K_c , τ_i , τ_d, para controlador PI e PID.

Vale ressaltar que os valores obtidos dos parâmetros do controlador foram tidos como primeira estimativa, sendo imprescindível ajustar estes parâmetros para se obter melhor resposta do processo.

3.13 - VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PROCESSO

Uma das fontes de não linearidade presentes no processo de precipitação da bromelina, processo em batelada alimentada, está relacionada com a variação de volume no tanque de precipitação durante o processo, e conseqüentemente as alterações das condições de troca térmica.

Com o objetivo de se determinar os efeitos provocados pelas variações de volume no decorrer do processo, o sistema de precipitação da bromelina foi submetido a perturbações positivas e negativas, a partir das condições iniciais estabelecidas, a fim de se obter um conhecimento do comportamento dinâmico do processo.

Quando foi realizada uma perturbação positiva aumentou-se a velocidade de rotação da bomba de propilenoglicol para 70 %, e quando a perturbação foi negativa, diminui-se a rotação da bomba de propilenoglicol para 10 %.

A realização dos ensaios para este procedimento consistiu na utilização de diferentes volumes iniciais (300, 450, 600, 750 mL) colocados no tanque de precipitação. Para o volume de 300 mL foi utilizada uma proporção de 1:1 (caldo de abacaxi/etanol), para 450 mL proporção de 1:2, para 600 mL proporção de 1:3, para 750 mL diluição de 1:4. Dessa forma, foi possível avaliar a influência da variação do volume no processo de precipitação.

Os ensaios foram realizados em regime permanente e iniciam-se quando a temperatura do tanque encontrava-se a 5 °C, onde paralelamente começava-se a adição de álcool ao processo e era efetuado o distúrbio na variável manipulada.

3.14 - DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY*

O desenvolvimento do controlar *fuzzy* envolveu basicamente três etapas: caracterização do intervalo de valores (conjunto-suporte) que as variáveis de entrada e saída iriam assumir; definição de um conjunto de regras para estabelecer uma relação entre valores da entrada e da saída, construída pela observação geral e conhecimento do sistema; determinação das funções de pertinência.

O projeto do controlador implementado neste trabalho consistiu da ação de um controlador *Fuzzy*-PI incremental. Foram utilizados como variáveis de entrada o erro e a variação do erro da temperatura do tanque de precipitação da bromelina, definidas como ErroTT302 e DErroTT302. A variação da rotação da bomba de propilenoglicol foi utilizada como variável de saída, definida como DSaidaFzz.

Na Figura 3.4, pode ser observada a estrutura para o controlador *Fuzzy*-PI utilizado neste trabalho.

FIGURA 3.4 - Estrutura do controlador *Fuzzy*-PI.

Sendo as variáveis definidas como:

ε = erro;

Δε = variação do erro;

Δ S_{PI} = valor incremental da saída do controlador *fuzzy*;

PV = valor da variável de saída do processo;

SP = valor de *set-point*.

Uma vez determinadas as entradas do controlador *fuzzy*, esses valores foram *fuzzificados*, ou seja, foi mensurado o grau de pertinência de cada valor de entrada para cada função de pertinência (*membership*). Estabelecida uma lei de controle essas entradas foram processadas fornecendo um valor de ação de controle (variação da velocidade de rotação da bomba do fluido refrigerante).

Como o SYSCON não possui blocos para implementação de uma lógica de controle avançada, a implementação do controlador *fuzzy* foi realizada através do programa MATLAB 7.0.1 e do programa TABLE-CURVE 3D, segundo metodologia desenvolvida por Berto (2004).

A Figura 3.5 ilustra o início do desenvolvimento de um controlador *fuzzy* (PI) utilizado neste trabalho, onde foi determinado o tipo de controlador (*MISO*), a inferência *fuzzy (Mandani)*, o tipo de operador de agregação (*min*) e o critério de *defuzzificação* (centro-de-gravidade).

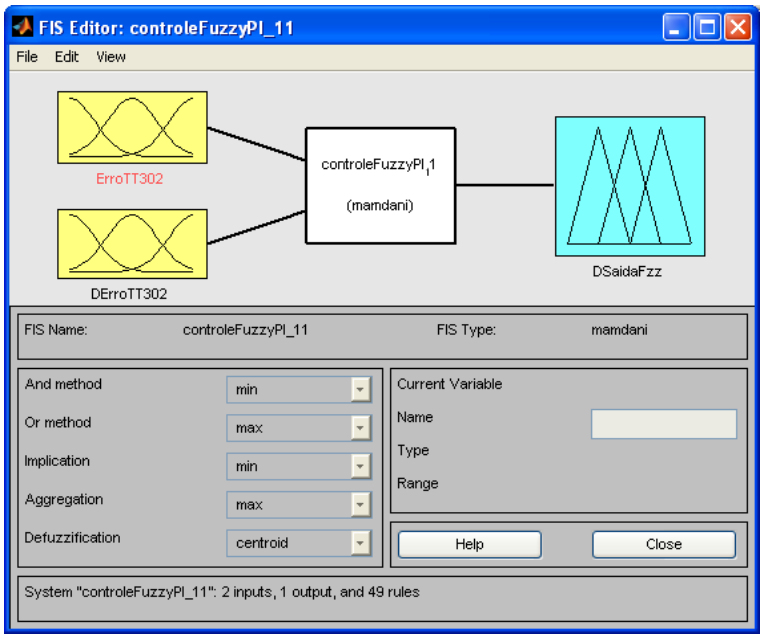


FIGURA 3.5 - Desenvolvimento de um controlador *fuzzy* no MATLAB 7.0.1.

3.14.1 Determinação das Funções de Pertinência

Além do conhecimento do processo, é muito significativa a determinação do efeito das funções de pertinência no desempenho do controlador. Entretanto, segundo a literatura, não existe um procedimento de otimização geral para a determinação das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* que sejam apropriadas para cada processo específico.

Foram utilizadas funções de pertinência de forma triangular e trapezoidal por serem amplamente utilizadas na literatura e pela simplicidade de implementação.

A determinação dos universos de discurso de cada função de pertinência do controlador *fuzzy* foi obtida pela observação do comportamento dinâmico da variável controlada (temperatura do tanque de precipitação) frente a perturbações na variável manipulada (vazão do fluido refrigerante). Para a construção das funções de pertinência, foi utilizado o *Membership Function Editor do Toolbox Fuzzy do M*ATLAB 7.0.1.

3.14.2 Definição da Base de Regras

A construção da base de regras foi obtida a partir de informações do sistema. Matrizes bidimensionais foram criadas para expressar a base de regras utilizada para os controladores desenvolvidos, as quais podem ser visualizadas no Apêndice E. Foram utilizadas 7 (sete) funções de pertinência, as quais representam as ações do controlador *fuzzy*, constituindo um total de 49 regras. Os termos lingüísticos utilizados das funções de pertinência, das variáveis de entrada e saída, foram: GP (grande positivo), MP (médio positivo), PP (pequeno positivo), ZR (zero), GN (grande negativo), MN (médio negativo), PN (pequeno negativo).

A inferência *fuzzy* utilizada no desenvolvimento dos controladores foi a de *Mandani,* onde o operador *min* de agregação foi utilizado para a combinação dos números *fuzzy* de entrada, correspondendo ao conectivo booleano E.

As regras foram editadas com o auxílio do *Rule Editor do Toolbox Fuzzy* do programa MATLAB 7.0.1. A Figura 3.6 ilustra a edição das regras utilizadas para o controlador *fuzzy*.

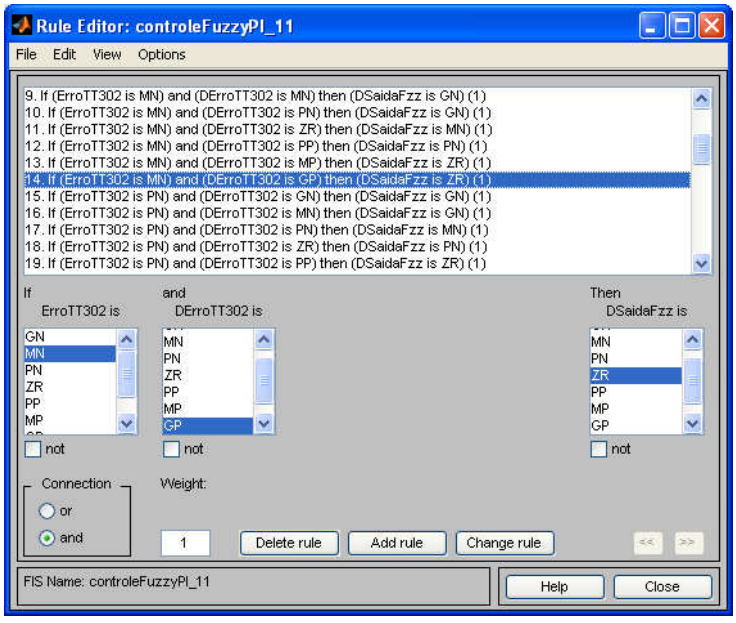


FIGURA 3.6 - Edição da base de regras do controlador *fuzzy*.

3.14.3 - Ensaios de Sintonia do Controlador

A sintonia é uma tarefa complexa devido a múltiplos ajustes simultâneos, exigindo esforço do projetista na obtenção do melhor desempenho do controlador, sendo esta uma etapa difícil e trabalhosa (LI; GATLAND, 1996; SANDRI; CORRÊA, 1999).

Com a tarefa de encontrar um conjunto de comandos convenientes que levassem o sistema a alcançar o estado desejado com o menor desvio possível, a sintonia do controlador *fuzzy* consistiu na mudança nas disposições das funções de pertinência para entradas e saídas dos controladores, modificação na base de regras e ainda no universo de discurso. Cada modificação na configuração do controlador era seguida de ensaio experimental para observar o seu respectivo comportamento. Posteriormente, a resposta obtida era analisada e novas estratégias na configuração eram implementadas. Antes de cada implementação era feita uma simulação do comportamento do controlador, através da ferramenta *Rule Viewer do Toolbox Fuzzy* do programa MATLAB 7.0.1., conforme ilustra a Figura 3.7.

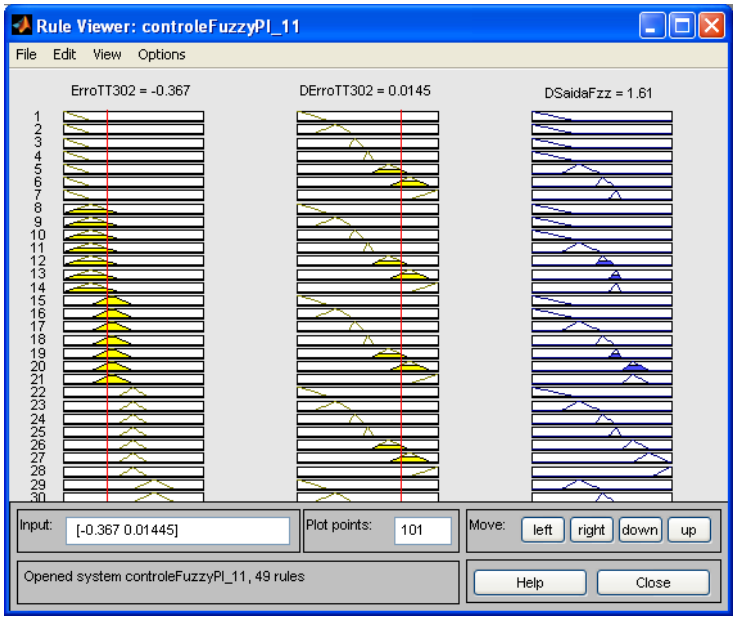


FIGURA 3.7 - Simulação do comportamento do controlador *fuzzy*.

Após realizadas as configurações do controladores *fuzzy* através do FIS *Editor Toolbox Fuzzy*, foram gerados arquivos no MATLAB que possibilitaram a construção de uma curva de superfície que delineia o comportamento das variáveis de entrada e saída do controlador. Para determinar a equação que descreve a ação de saída do controlador desenvolvido, foi utilizado o método não-linear do programa *Table-Curve* 3D, versão 2.0. O valor da equação de ajuste correspondia aos valores obtidos durante a simulação das regras impostas ao controlador *fuzzy*.

A equação obtida foi inserida, em forma de *script,* no sistema supervisório da INDUSOFT Web Studio 6.1.2 e determinava a atuação do controlador *fuzzy* durante a realização dos ensaios de precipitação.

Toda a configuração necessária para permitir a devida comunicação entre os supervisórios e a rede *filedbus*, através do SYSCON, incluindo os *scripts* utilizados para os controladores, encontra-se no Apêndice F.

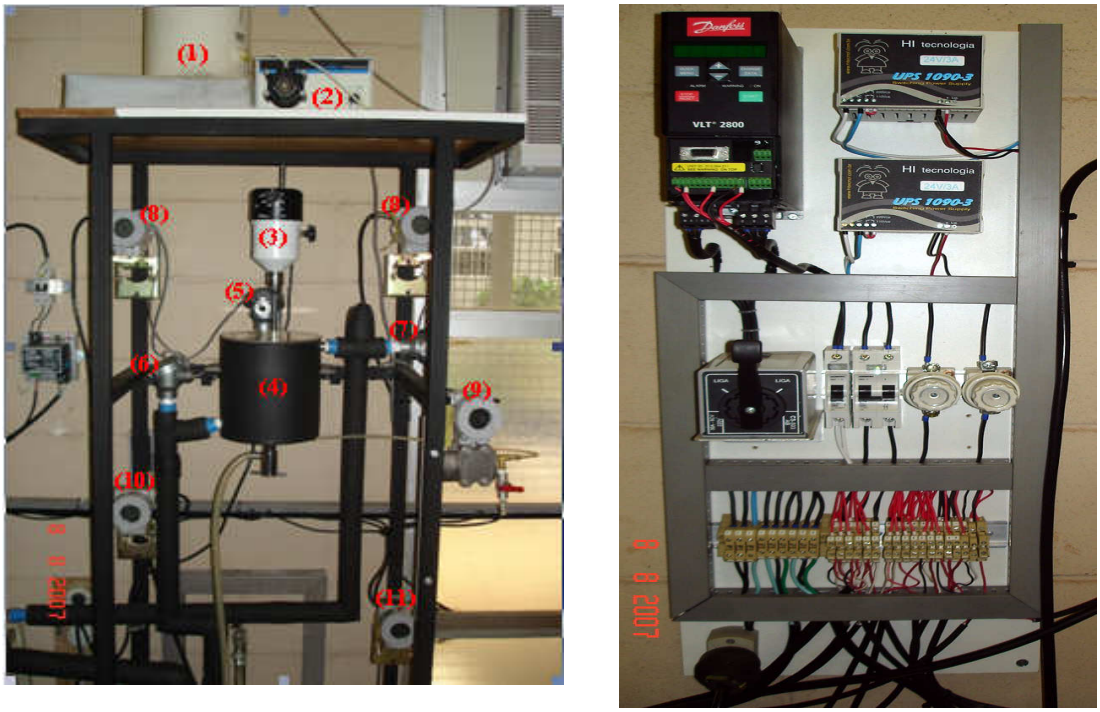
3.15 - COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO ENTRE CONTROLADORES CONVENCIONAL E AVANÇADO PARA O PROCESSO DE PRECIPITAÇÃO DA BROMELINA

Foram realizados ensaios de precipitação de precipitação da bromelina utilizando controlador PI, PID e f*uzzy,* e em seguida foi realizada uma análise comparativa do desempenho do processo, a partir dos critérios de desempenho *overshoot*, tempo de subida, tempo de estabilização, comportamento da variável manipulada, critério do erro ITAE, atividade enzimática alcançada e demanda de energia elétrica por ensaio. A partir da observação destes parâmetros foi possível realizar uma comparação do desempenho apresentado entre os diferentes tipos de controladores utilizados.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - MONTAGEM DO PROTÓTIPO PARA PRECIPITAÇÃO DE BROMELINA

O sistema montado neste trabalho possuiu a finalidade principal de possibilitar a realização dos ensaios de precipitação da bromelina de maneira versátil. Na Figura 4.1 (a) pode ser observado o protótipo montado no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) na FEQ/UNICAMP.



(a) **(b)**

FIGURA 4.1 - Ilustrações do (a) sistema de precipitação da bromelina e (b) do painel de comando do protótipo.

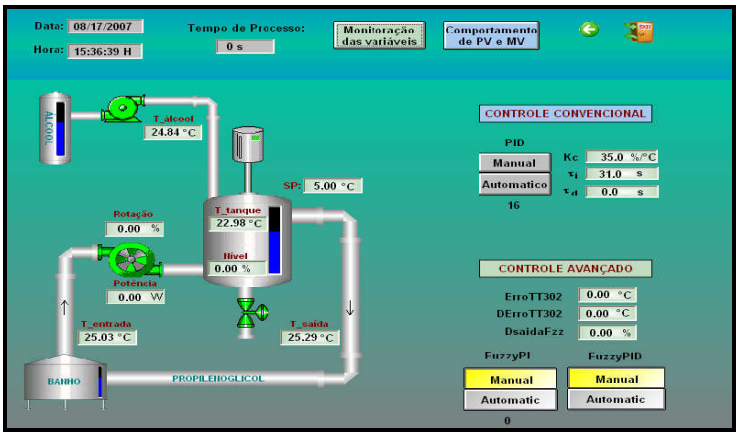
Na Figura 4.1 b é apresentado o quadro de comando montado com a finalidade de facilitar as interligações dos equipamentos e sensores de campo com os instrumentos *fieldbus*. Nesta figura, evidencia-se a presença do inversor de freqüência, utilizado como elemento final de controle para variação da freqüência de rotação da bomba do fluido refrigerante (variável manipulada).

4.2 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

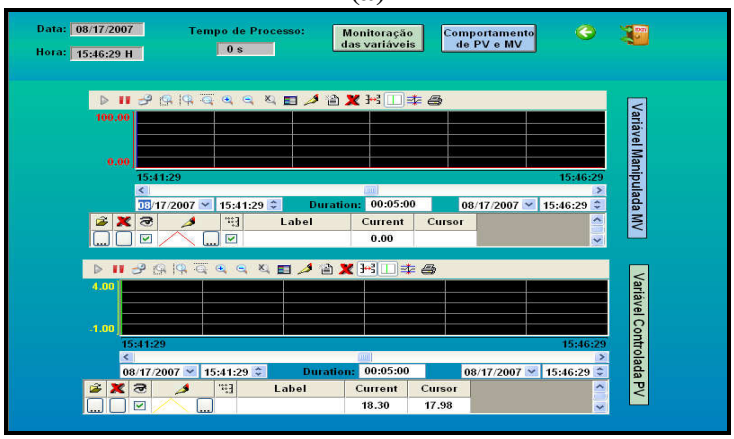
Os *softwares* AIMAX versão 4.2. e INDUSOFT *Web Studio* versão 6.1. foram utilizados para o desenvolvimento das telas de supervisão para a monitoração e controle das variáveis importantes do processo de precipitação de bromelina. As telas podem ser visualizadas nas Figuras 4.2 a, b e c.

Durante a realização dos ensaios de precipitação utilizando controlador avançado foi necessária a atualização do sistema operacional, do computador que estava sendo utilizado neste trabalho, de Windows NT para Windows XP. Tendo em vista que o AIMAX funciona apenas em Windows NT é justificada assim a necessidade de utilização do supervisório INDUSOFT, o qual foi utilizado como "controlador" quando aplicado controle *fuzzy* no processo.

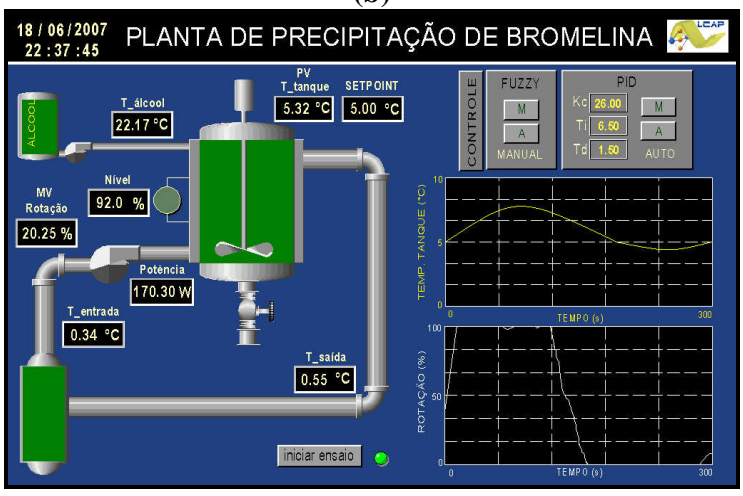
Durante o desenvolvimento das telas do supervisório foram priorizados o conceito de funcionalidade na operação manual e a facilidade de visualização das variáveis do processo. Desta forma, uma atenção especial foi dada para a representação sinótica do processo real e para a construção de gráficos de tendências *on-line*.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.2 (a), (b) e(c). Telas de supervisão do sistema de precipitação de bromelina: (a) e (b) telas desenvolvidas através do INDUSOFT; (c) tela desenvolvida através do supervisório AIMAX.

4.3 - CONFIGURAÇÃO DA REDE FIELDBUS E DEFINIÇÃO DA MALHA DE CONTROLE

Para a configuração da rede *fieldbus* foi utilizado o *software* SYSCON.

Inicialmente, os instrumentos de campo montados conforme a topologia de barramento e foram configurados através da atribuição de blocos funcionais (Figura 4.3).

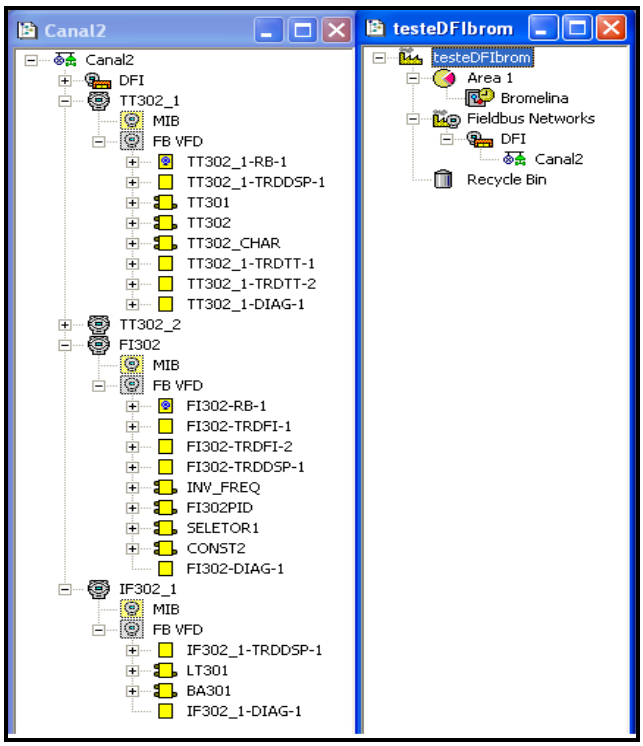


FIGURA 4.3 - Tela do *software* SYSCON para configuração dos instrumentos de campo *fieldbus*.

Na área lógica do software SYSCON foi desenvolvida a estratégia de controle utilizada no trabalho, conforme apresentada na Figura 4.4.

O fluxo de informações da estratégia de controle convencional adotada (PI e PID) é descrito a seguir:

- O valor da temperatura interna do tanque de precipitação TT302 (variável controlada) é enviado ao bloco funcional de entrada analógica (AI).

- O sinal *fieldbus* de temperatura é corrigido em um bloco funcional *Characterizer* onde foram inseridos os valores de calibração do sensor de temperatura.

- O valor da temperatura corrigida é enviado ao bloco funcional de controle PID (FI302 PID) onde é calculada a ação de controle.

- A ação de controle é enviada ao bloco funcional de saída analógica (AO) onde a ação é convertida do sinal *fieldbus* para um sinal analógico que é enviado ao elemento final de controle (inversor de freqüência).

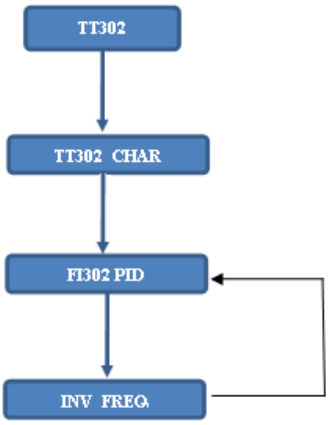


FIGURA 4.4 - Estratégia de controle convencional para manutenção da temperatura de precipitação da bromelina.

4.4 - CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

As equações obtidas após a calibração dos sensores de temperatura são apresentadas na Tabela 4.1.

Tais equações são obtidas, no bloco CHAR (SYSCON), através da inserção, por vetores, dos valores lidos pelo sensor e dos observado pelo termômetro de referência durante a calibração.

TABELA 4.1 - Equações obtidas a partir da calibração dos sensores de temperatura.

Sensores	Equação de Ajuste	(r^2)
TT301	T real = 0,9994*TT301 - 0,6634	0,99999
TT302	T real = 1,0015*TT302 - 1,0836	0,99999
TT303	T real = 1,0014*TT303 - 0,5531	0,99997
TT304	T real = 0,9995*TT304 - 0,5575	0,99992

Pode ser observado que os ajustes da calibração dos sensores de temperatura apresentaram altos valores de coeficiente de determinação refletindo um excelente ajuste dos dados experimentais ao modelo linear proposto.

Na Figura 4.5 é apresentada a curva de calibração da temperatura obtida através do sensor TT302 utilizado para medição da temperatura do tanque de precipitação. As demais curvas de calibração estão disponibilizadas no Apêndice D.

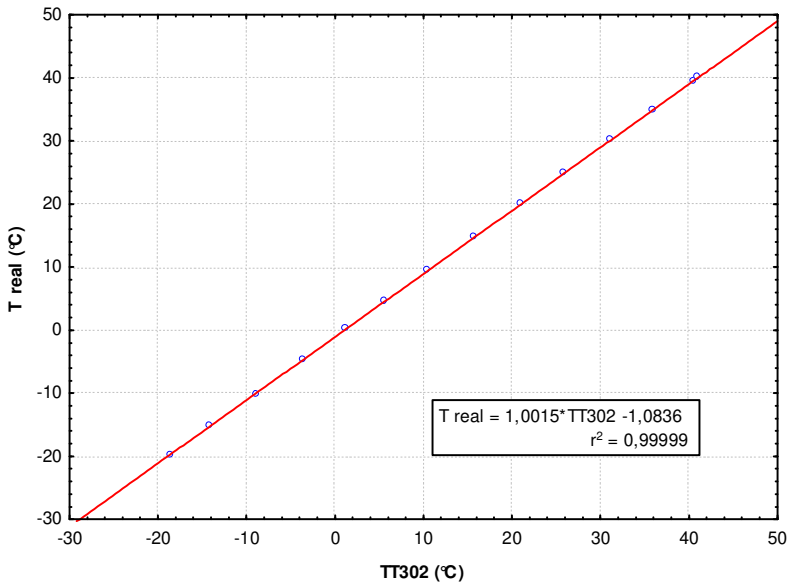


FIGURA 4.5 - Curva de calibração para o sensor TT 302.

4.5 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA DE PROPILENOGLICOL

Na Figura 4.6 pode ser observado o comportamento linear vazão do propilenoglicol com relação à variação da rotação da bomba. Esse comportamento é altamente desejado para fins de controle, pois não impõe não-linearidades ao sistema.

A vazão máxima de propilenoglicol determinada foi de 935 L/h.

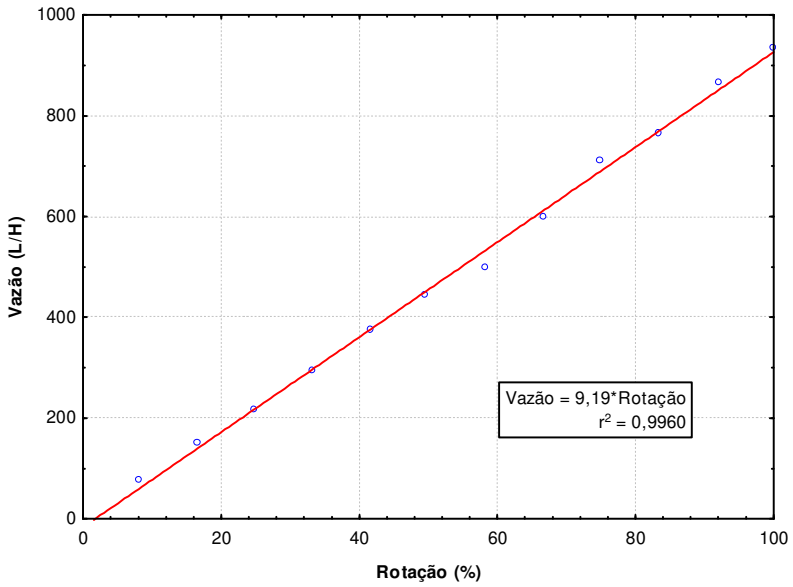


FIGURA 4.6 - Relação entre a vazão de propilenoglicol (L/h) e a rotação da bomba (%).

4.6 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELA BOMBA DE PROPILENOGLICOL

Um importante parâmetro de comparação entre sistemas de controle é o consumo de energia durante a operação. É desejável que um sistema de controle mantenha as condições pré-estabelecidas com o menor consumo de energia possível. Portanto, foi necessária a determinação da potencia consumida pelo motor da bomba de propilenoglicol.

Quanto maior a freqüência de rotação da bomba, maior vazão apresentada e, conseqüentemente, maior a potência consumida.

A relação entre a potência consumida pelo motor e a vazão do fluido refrigerante pode ser observada na Figura 4.7. Observa-se uma desejável relação linear entre essas variáveis.

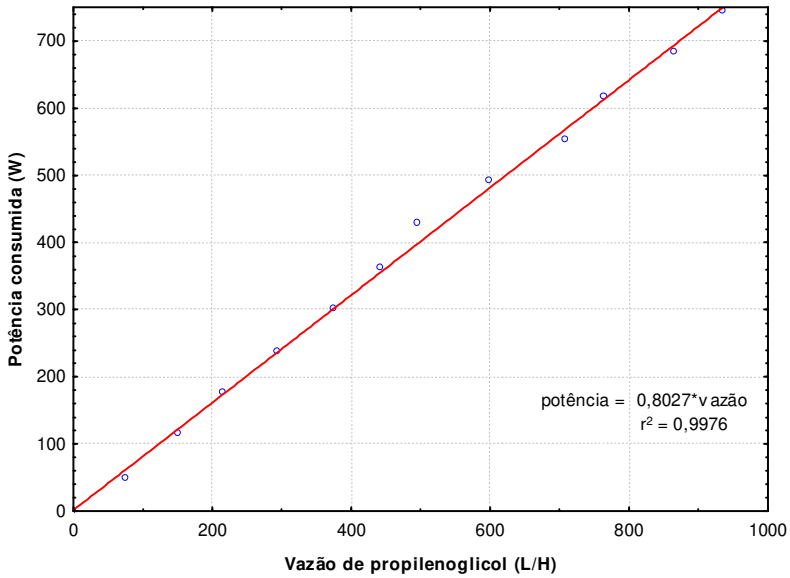


FIGURA 4.7 - Comportamento da potência consumida pelo motor com relação à variação da vazão de propilenoglicol.

O comportamento linear apresentado na Figura 4.7 é extremamente desejável, pois com a necessidade de redução da vazão de propilenoglicol no sistema ocorre uma redução da potência consumida. Em sistemas tradicionais, com o uso de válvulas de controle, a redução da vazão não implica na redução da potência consumida, pois, não há alteração das condições de operação do motor da bomba. Essa é uma grande vantagem de se utilizar neste trabalho o inversor de freqüência como elemento final de controle.

4.7 - DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO PROCESSO

4.7.1 - Determinação da temperatura de precipitação

Após a determinação da influência da temperatura na atividade enzimática da enzima bromelina, a qual está relacionada com a qualidade do produto final, obteve-se um comportamento representado pela Figura 4.8, a seguir.

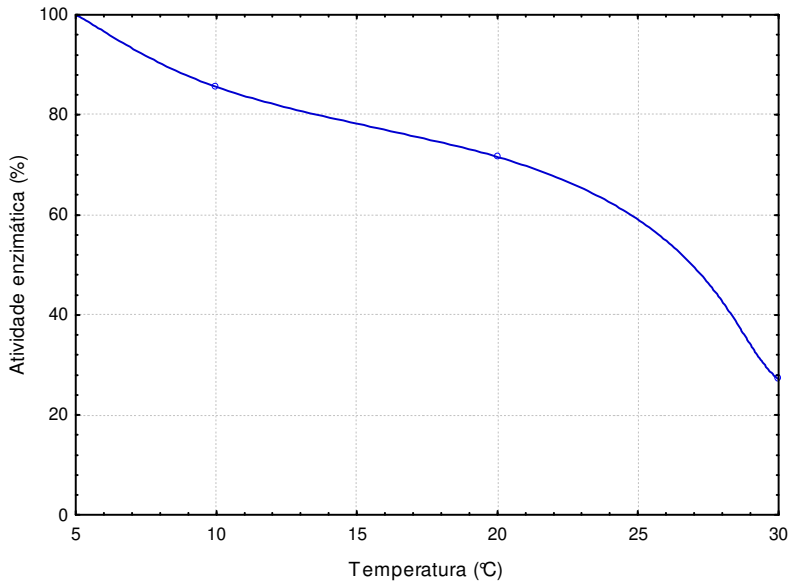


FIGURA 4.8 - Influência da temperatura na atividade enzimática da enzima bromelina.

Observa-se que com o aumento da temperatura ocorre uma queda na atividade enzimática da bromelina, justificando a realização do processo de precipitação da enzima a baixas temperaturas. Diante disso, foi selecionada uma temperatura de referência (*set-point*) de 5°C, a qual também foi utilizada por Cesar et al.(1999), neste mesmo processo, com obtenção de bons resultados.

4.7.2 - Planejamento Experimental

A determinação das condições iniciais dos ensaios de precipitação foram obtidas através do desenvolvimento de um planejamento fatorial composto central 2^3 (3 fatores e 2 níveis). Na Tabela 4.2 são apresentadas as variáveis do planejamento fatorial, suas codificações e os níveis utilizados. Na Tabela 4.3 é apresentada a matriz de planejamento e as respostas observadas experimentalmente em cada combinação de níveis.

Foram realizados 11 ensaios, sendo três deles repetições no ponto central, estas repetições são necessárias para a determinação do erro experimental do planejamento. Todos os ensaios foram realizados em malha aberta de forma randômica.

TABELA 4.2 - Planejamento 2^3 com ponto central.

	Fatores Experimentais	**Sigla**	**Nível mínimo (-)**	**Nível central (0)**	**Nível máximo (+)**
Fator 1	Vazão etanol (mL/s)	VE	0,34	0,54	0,60
Fator 2	Rotação da bomba de propilenoglicol (%)	VB	35	40	45
Fator 3	Temperatura de entrada (°C)	TE	-2	0	2

TABELA 4.3 - Matriz para planejamento experimental.

ENSAIO	VE	VB	TE	ΔT (°C)	TR (s)
1	-	-	-	1,1	158
2	-	-	+	3,8	213
3	-	+	-	0,7	137
4	-	+	+	2,8	383
5	+	-	-	3,8	169
6	+	-	+	3,0	373
7	+	+	-	5,8	428
8	+	+	+	5,0	354
9	0	0	0	3,6	271
10	0	0	0	3,3	246
11	0	0	0	2,9	235

Onde: ΔT é a variação de temperatura interna do tanque e TR é o tempo de resposta.

4.7.3 - Análise da Variância

O método mais usado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo é a Análise de Variância. Os resultados obtidos neste trabalho estão reunidos na Tabela 4.4, que é a chamada Tabela de variância ou simplesmente ANOVA (*Analysis of Variance*).

TABELA 4.4 - Análise da variância (ANOVA) para o planejamento experimental.

Resposta	**ΔT**		**TR**	
Modelos	**LINEAR**	**LINEAR***	**LINEAR**	**LINEAR***
R^2	0,9786	0,9689	0,9763	0,9208
Teste F calc.	30,50	124,46	27,45	104,66
Teste F tab.	6,16	4,46	6,16	5,12
MQ_R/MQ_r	**4,95**	**27,91**	**4,46**	**20,44**
MQ_{faj}/MQ_{ep}	**0,06**	**0,04**	**0,13**	**0,16**
Intervalo de Confiança	95%	95%	95%	95%

* Somente efeitos principais

Sendo: MQ_R - média quadrática da regressão; MQ_r - média quadrática dos resíduos; MQ_{faj} - média quadrática da falta de ajuste; MQ_{ep} - média quadrática do erro puro.

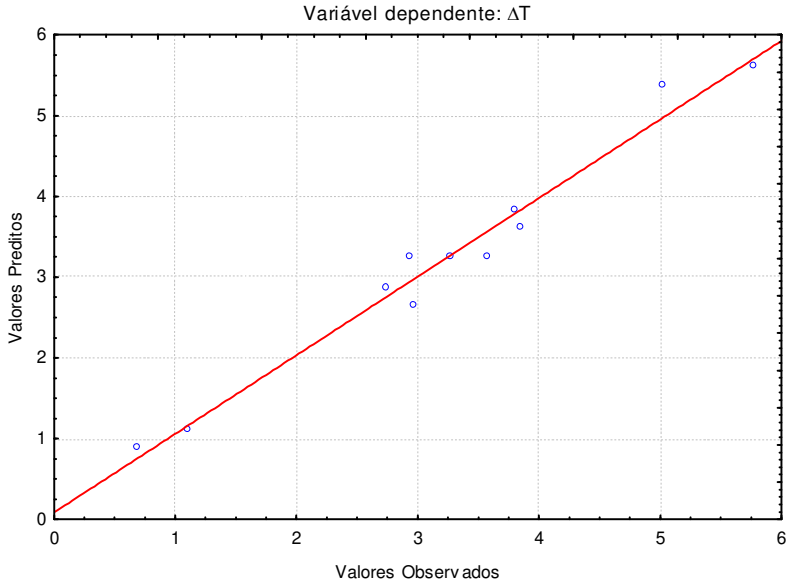
A significância estatística do modelo obtido é avaliada através do cálculo do teste "F" e sua comparação como valor tabelado no intervalo de confiança adotado. O valor do teste "F" calculado no modelo proposto deve ser maior que o valor do teste "F" tabelado. Segundo Neto et al. (2003), uma regressão pode ser considerada útil para fins de previsão e estatisticamente significativa quando a relação MQ_R/MQr >10,13, no nível de confiança de 95%, ou seja, o teste F calculado deve ser 10 vezes maior que o teste "F" tabelado. É também imprescindível usar o teste F da razão MQ_{faj}/MQ_{ep} para avaliar se o modelo escolhido está bem ajustado às observações. Assim, valores muito baixos de MQ_{faj}/MQ_{ep} significarão pouca (ou nenhuma) falta de ajuste, sendo o modelo escolhido considerado satisfatório.

De acordo com a Tabela 4.4, pode-se observar que para o modelo linear, considerando apenas os efeitos significativos, foram obtidas relações de MQ_R/MQ_r

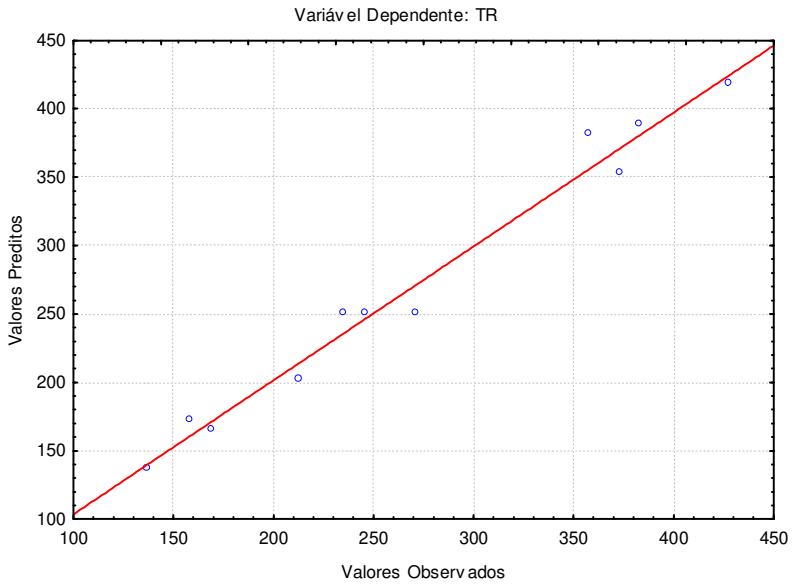
bastante elevadas para ΔT e TR, o que mostra que as equações representativas para estas respostas são úteis para fins preditivos.

Percebe-se também que a razão de MQ_{faj}/MQ_{ep}, apresenta valores não significativos revelando a escolha adequada do modelo utilizado, visto que o mesmo não apresentou sinais de falta de ajuste.

A correlação entre os valores previstos no modelo para a determinação das condições iniciais e os dados experimentais é apresentada na Figura 4.9 (a e b).



(a)



(b)

FIGURA 4.9 - Correlação entre valores observados e valores preditos para (a) variação de temperatura e (b) tempo de resposta.

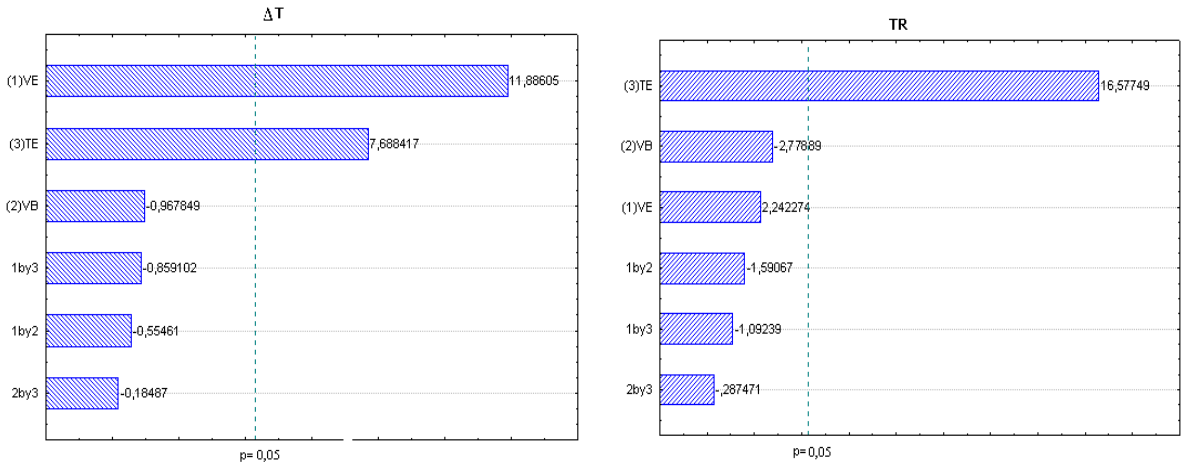
Uma análise qualitativa da Figura 4.9 caracteriza um bom ajuste, comprovando que o modelo linear descreve bem os dados experimentais, tornando-o um modelo satisfatório.

4.7.4 - Análise de Significância Estatística

Uma análise da significância dos efeitos das variáveis VB, VE e TE e das interações entre elas foi realizada através da interpretação da tabela da análise de variância (ANOVA). Os digramas de Pareto apresentados nas Figuras 4.10 a e b, foram utilizados para a identificação da influência de variáveis significativas.

O diagrama de Pareto apresenta de forma clara e rápida os efeitos que são estatisticamente importantes, ou seja, quais as variáveis que realmente possuem uma influência significativa na variável resposta.

As variáveis que possuem valores maiores que o valor *p*, apresentam efeito principal do fator ou da interação significativo.



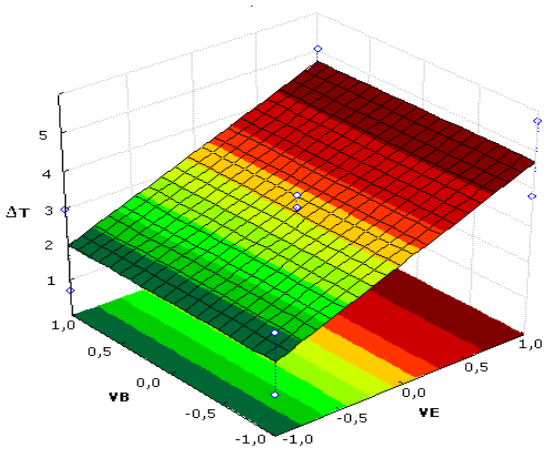
(a) (b)

FIGURA 4.10 - Diagramas de Pareto para as variáveis (a) variação de temperatura (ΔT) e (b) tempo de resposta (TR).

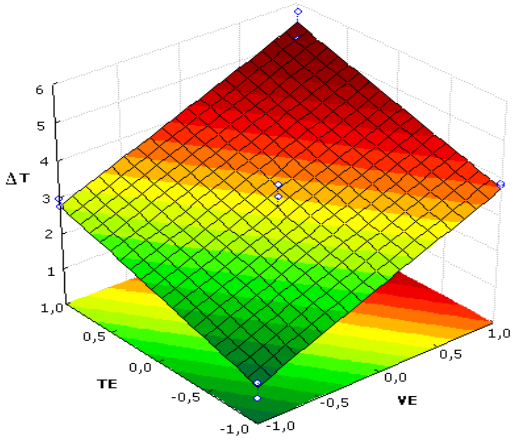
Na Figura 4.10 (a) observa-se que a rotação da bomba de propilenoglicol (VB), bem como as interações de segunda ordem entre TE & VB, TE & VE e VB & VE não foram estatisticamente significativas ao processo para a variação de temperatura ΔT, quando comparada à influência da temperatura de entrada do fluido refrigerante na camisa do tanque (TE) e a vazão de etanol (VE), sendo estas variáveis inerentes ao processo. Este fato pode ser atribuído às limitações do sistema, como por exemplo, o dimensionamento do tanque de precipitação utilizado, o qual influencia na eficiência da troca térmica do sistema.

Para o tempo de resposta TR, observa-se na Figura 4.10 (b), que o efeito das variáveis VB, VE e as interações de segunda ordem entre as variáveis selecionadas, não se mostram significativas quando comparadas à grande influência de TE, para a determinação do tempo de resposta TR.

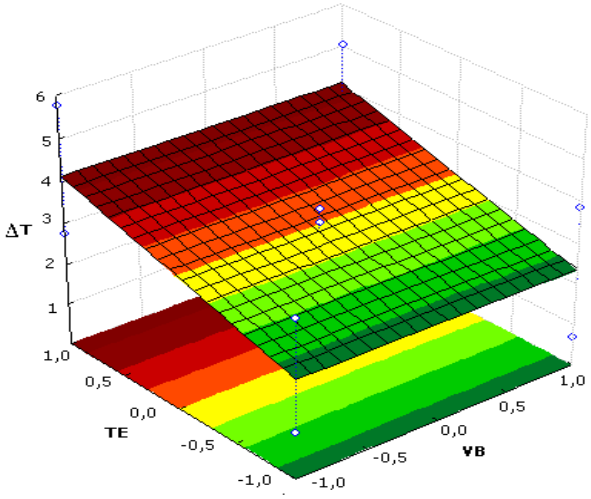
Estas observações são comprovadas analisando-se as superfícies de resposta (Figuras 4.11 e 4.12) obtidas para as variáveis de resposta (ΔT e TR), analisadas em função da influência das variáveis VE, VB e TE.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.11 - Superfícies de resposta para variação de temperatura em função de (a) Vazão de etanol (VE) *x* Rotação da bomba de propilenoglicol (VB) (b) Vazão de etanol (VE) *x* Temperatura de entrada do propilenoglicol na camisa de refrigeração do tanque de precipitação (TE) (c) Rotação da bomba de propilenoglicol (VB) *x* Temperatura de entrada do propilenoglicol na camisa de refrigeração do tanque de precipitação (TE).

A variação de temperatura no tanque de precipitação (ΔT) é maior quanto maior for a vazão de etanol que está sendo adicionada ao tanque contendo caldo de abacaxi (VE) (Figura 4.11 a), pois quanto maior esta vazão, maior será a quantidade de calor gerada pela dissolução liberada pelo álcool no inicio da precipitação.

Na Figura 4.11 b, pode-se observar que a variação de temperatura é influenciada simultaneamente pela vazão de etanol (VE) e pela temperatura de entrada de propilenoglicol na camisa do tanque (TE). Quanto menor TE, maior a eficiência da troca de calor na camisa do tanque de precipitação, proporcionando menor ΔT.

A Figura 4.11 c, permite a observação da variação de ΔT com relação a variação de TE e VB. A variação de temperatura de resposta (ΔT) varia de acordo com a temperatura de entrada do fluido refrigerante (TE), conforme descrito no parágrafo anterior. Observa-se que a vazão de propilenoglicol (VB), praticamente não influencia na variável de resposta ΔT, com relação a TE. Isso ocorre porque a eficiência da refrigeração do tanque praticamente não depende da vazão do fluido refrigerante, mas depende principalmente da temperatura do fluido refrigerante.

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 4.10 b), observa-se que a variável TE possui influência significativa sobre a variável tempo de resposta TR. Este comportamento também pode ser observado através das superfícies de resposta representada pela Figura 4.12 b e c.

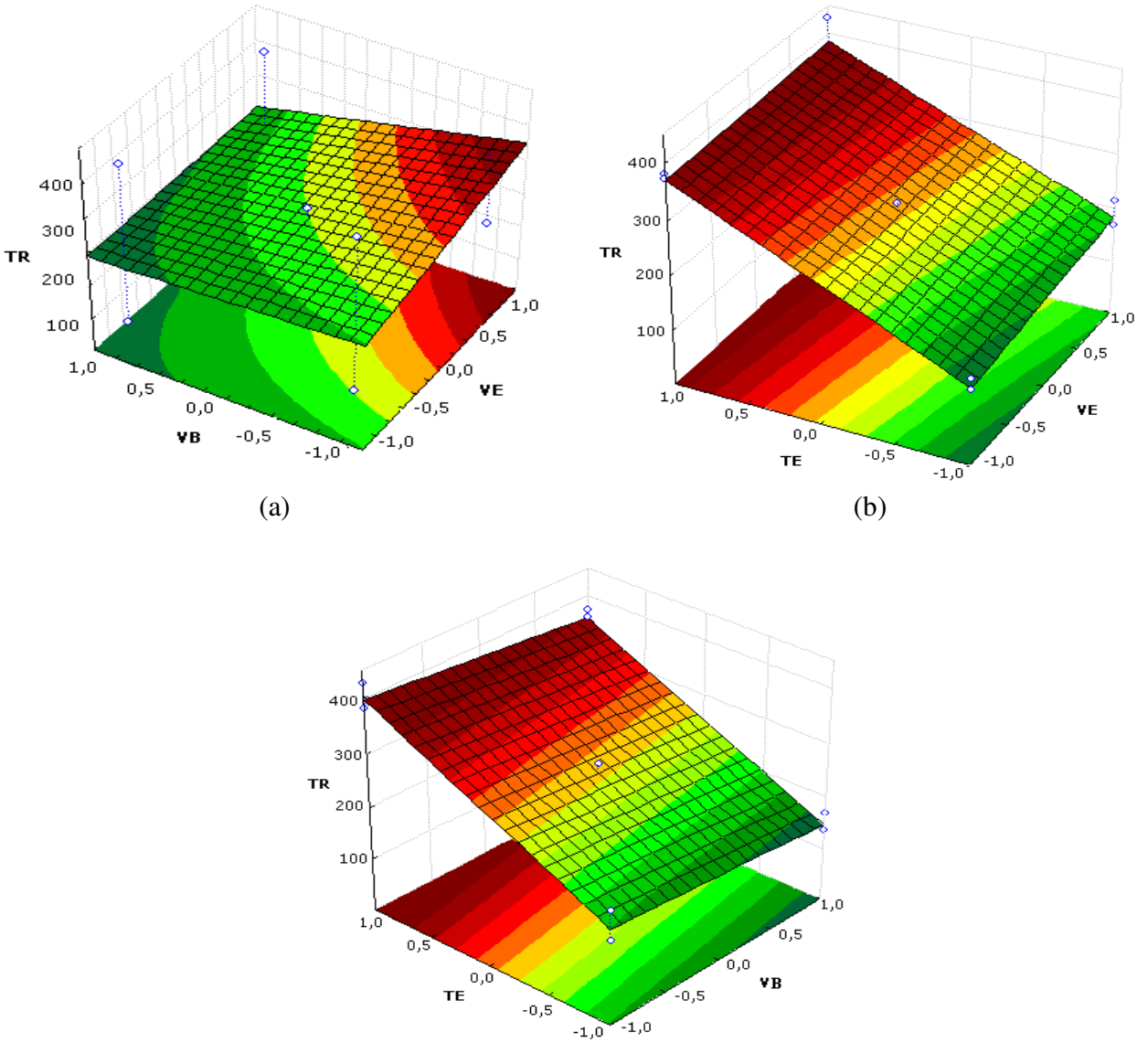


FIGURA 4.12 - Superfícies de resposta para a variável tempo de resposta (TR) em função de (a) Vazão de etanol (VE) *x* Rotação da bomba de propilenoglicol (VB), (b) Vazão de etanol (VE) *x* Temperatura de entrada do propilenoglicol na camisa de refrigeração do tanque de precipitação (TE) e (c) Rotação da bomba de propilenoglicol (VB) *x* Temperatura de entrada do propilenoglicol na camisa de refrigeração do tanque de precipitação (TE).

A partir da observação da Figura 4.12 (a, b, c) pode-se concluir que menores vazões de etanol (VE), menores temperaturas de entrada de propilenoglicol na camisa do tanque (TE) e maiores vazões de propilenoglicol (VB), contribuem para obtenção de um menor tempo de resposta (TR) do processo.

A análise da influência das variáveis do sistema possibilitou encontrar os valores operacionais satisfatórios às variáveis de resposta, com uma variação de temperatura controlável e pequeno tempo de resposta.

As variáveis que possuem efeitos estatisticamente significativos foram selecionadas para compor as equações que representam a correlação das variáveis resposta e os fatores estudados, conforme podem ser observadas na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - Equações representativas considerando efeitos principais.

	Equações Representativas
ΔT	3,25 + 1,37 ΔVE + 0,88 ΔTE
TR	270,09 + 108,12 ΔTE

Através dos cálculos estatísticos efetuados pôde-se afirmar que os modelos lineares apresentados acima são estatisticamente significativos e podem ser utilizados para fins preditivos, pois apresentaram excelente correlação, pequena falta de ajuste e um valor de teste F satisfatório para este fim. Após testes experimentais pôde-se constatar que as equações representativas apresentam 97 % de predição.

Utilizando-se as equações representativas do sistema e com uma análise gráfica das superfícies obtidas, foram encontradas as condições operacionais iniciais que permitiram o desenvolvimento de um controle do processo mais adequado. Foram definidas as seguintes condições iniciais (Tabela 4.6).

TABELA 4.6 - Determinação das condições iniciais a partir de planejamento experimental.

Variáveis do sistema	**Condições iniciais**
Temperatura de entrada de propilenoglicol (TE)	0 °C
Vazão de etanol (VE)	0,6 mL/s
Vazão de propilenoglicol (VB)	374 L/h

A vazão de propilenoglicol de 374 L/h corresponde a rotação da bomba deste fluido de 40 %. As condições iniciais obtidas experimentalmente foram utilizadas como ponto de partida em todos os ensaios subseqüentes.

4.8 - ENSAIOS DE SINTONIA DO CONTROLADOR CONVENCIONAL

Para a determinação dos parâmetros dos controladores convencionais (PI e PID) foi utilizado o primeiro método de sintonia de Ziegler-Nichols (Curva de Reação). Este método fornece uma primeira estimativa dos valores dos parâmetros do controlador. É importante ressaltar que não existem na literatura procedimentos definidos para a sintonia de controladores aplicados em sistemas em batelada alimentada.

Após realizar o ensaio em malha aberta, aplicando-se uma perturbação degrau de 30 % de amplitude na vazão de propilenoglicol, foi obtida uma curva de reação onde os dados experimentais foram ajustados a uma curva tipo S onde foi possível caracterizar as constantes, tempo morto τd, constante de tempo τ e ganho do processo K, conforme Figura 4.13.

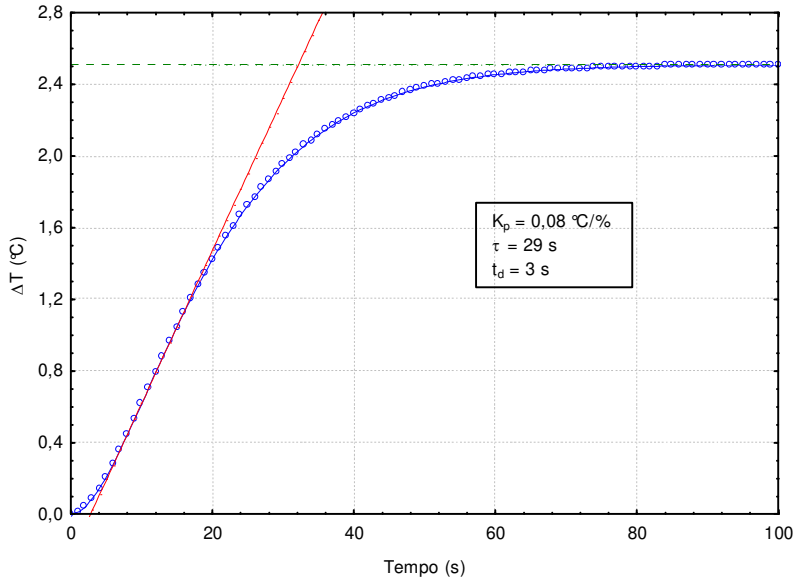


FIGURA 4.13 - Curva de reação para determinação dos parâmetros dos controladores convencionais, a partir de 150 mL de caldo de abacaxi.

De acordo com a Figura 4.13, pode-se perceber que apesar de a perturbação na vazão do propilenoglicol ser positiva, a variação de temperatura no tanque de precipitação não ficou negativa ($\Delta T > 0$), pois no início do processo a troca térmica do sistema é deficiente.

Para os ajustes dos dados experimentais, apresentados na Figura 4.13, foi utilizado o modelo não linear do software STATISTICA 6.0. De acordo com a metodologia de sintonia, os dados experimentais são ajustados a um modelo de primeira ordem com tempo morto (Equação 4.1), segundo Stephanopoulos, 1984.

$$G(s) = \frac{Ak_p}{\tau s + 1} e^{-t_d s} \quad \text{EQUAÇÃO 4.1}$$

Onde:

G(s) = função de transferência de primeira ordem com tempo morto;

A = amplitude da perturbação;

k_p = ganho do processo (°C/%);

τ = constante de tempo do processo (s);

e = erro da variável controlada (PV-SP) (°C);

τ_d = tempo morto (s).

A partir da curva de reação representada pela Figura 4.13, foram obtidos valores dos parâmetros dos controladores convencionais PI e PID conforme a Tabela 4.7.

TABELA 4.7 - Parâmetros dos controladores convencionais.

Parâmetros obtidos a partir do 1° método Ziegler-Nichols		
t_d = 3 s	τ = 29 s	K_p = 0,08 °C/%
Tipo de controlador	**PI**	**PID**
K_c	104 %/°C	139 %/°C
τ_i	10 s	6 s
τ_d	0 s	1,5 s

Onde: K_c - ganho proporcional do controlador; τ_i - constante de tempo integral; τ_d - constante de tempo derivativa.

4.9 - SINTONIA FINA DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES CONVENCIONAIS PI E PID

Uma análise dos resultados calculados para os parâmetros dos controladores convencionais foi realizada, constatando-se valores altos para os ganhos dos controladores (K_c), indicando uma alta sensibilidade dos controladores à presença de erro na temperatura interna do tanque. Valores muito altos de ganho do controlador podem levar o sistema à indesejável instabilidade.

Desta forma, houve a necessidade de se realizar uma sintonia fina nos parâmetros do controlador, com o objetivo de se alcançar um desempenho do controlador mais adequado.

O procedimento de sintonia fina foi iniciado com a redução gradual dos valores de K_c para os dois controladores. Para cada valor de K_c foi realizado um ensaio em malha fechada, mantendo-se constantes os valores de τ_i e τ_d constantes.

Após o valor de K_c definido repetiu-se o mesmo procedimento para os parâmetros τ_i, e τ_d. A escolha dos parâmetros foi definida através da análise do comportamento transiente do sistema (*overshoot*, tempo de subida e tempo de saturação da variável manipulada) e o erro apresentado (ITAE).

4.9.1 - Sintonia Fina do Controlador PI

Diferentes combinações dos parâmetros K_c e τ_i para o controlador PI foram testadas experimentalmente. Para ilustrar a metodologia aplicada na sintonia foram selecionadas três combinações de parâmetros utilizadas na escolha da combinação mais adequada.

Nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 podem ser visualizados os comportamentos da temperatura no tanque de precipitação da bromelina (PV) sob a atuação da variável manipulada (MV) dada pela rotação da bomba de propilenoglicol, com o decorrer do tempo. A variável de processo é representada em variável-desvio.

Observa-se na Figura 4.14 a presença de um *overshoot* de aproximadamente 4,0 °C, considerado alto. Para a redução deste *overshoot* propôs-se um aumento do ganho do controlador e um aumento do valor do tempo integral que proporcionaria uma redução no tempo de subida e no tempo de estabilização

Após a realização de alguns ensaios, obtiveram-se bons resultados para os parâmetros do controlador PI, conforme mostrado nas Figuras 4.15 e 4.16.

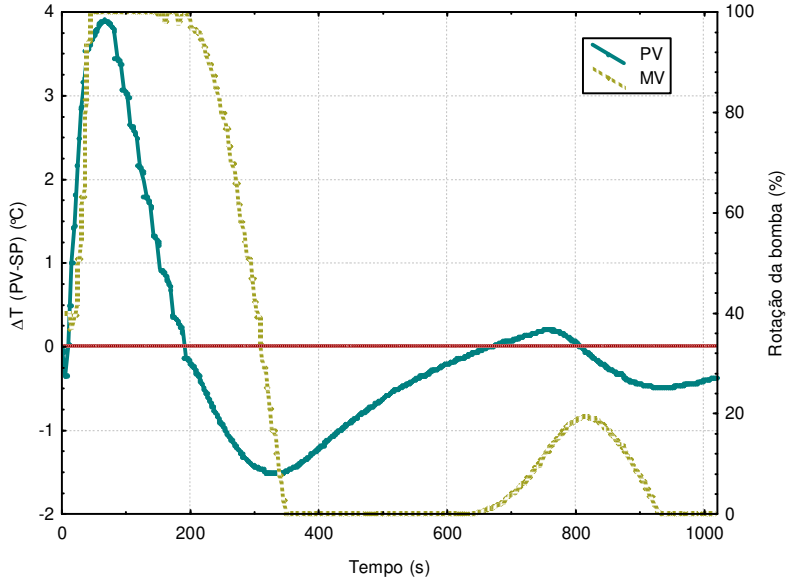


FIGURA 4.14 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PI, com parâmetros K_c = 10,4 %/°C e τ_i = 14,0 s.

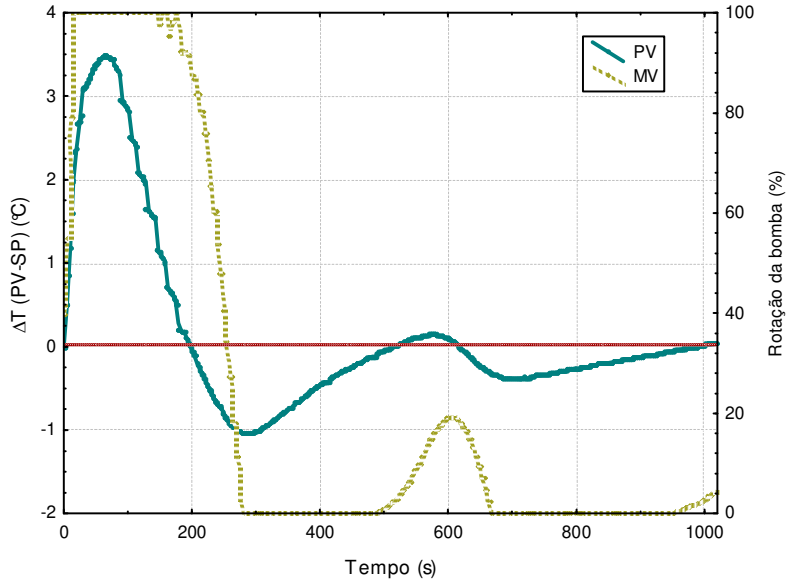


FIGURA 4.15 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PI, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 23,0 s.

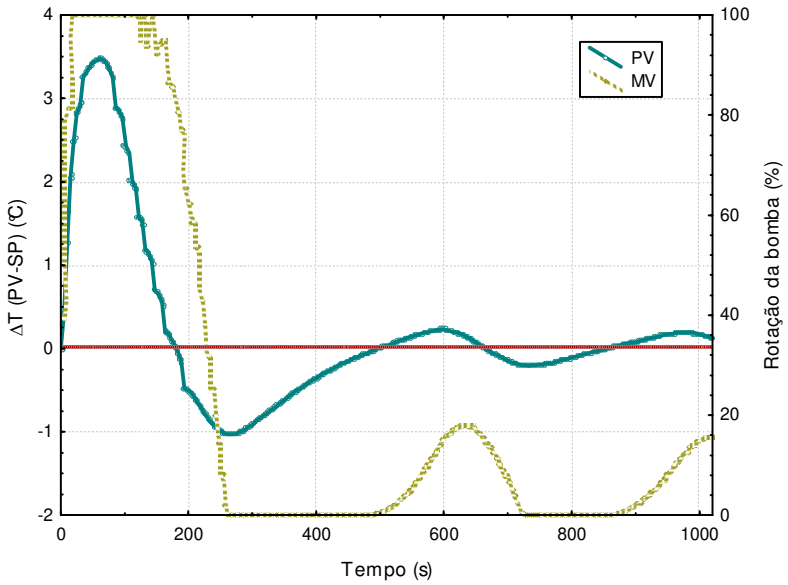


FIGURA 4.16 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PI, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 31,0 s.

A resposta do sistema sob a ação do controlador PI representado pela Figura 4.15 apresentou um menor *overshoot,* em torno de 3,5 °C. Ainda assim, tentou-se um aumento no valor de τ_i para uma melhor resposta do sistema de controle. Observa-se na Figura 4.16 que a alteração no valor de τ_i não afetou significativamente o valor do *overshoot*, porém obteve-se um melhor tempo de subida (183 s). Também pode ser observado um comportamento mais dinâmico na atuação da variável manipulada, visto que o tempo de saturação superior foi reduzido de 154 s para 122 s.

Na Tabela 4.8 são apresentados os parâmetros de desempenho entre os controladores PI apresentados. Foram denominados controladores PI_A, PI_B e PI_C, os controladores representados pelas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 respectivamente.

TABELA 4.8 - Comparação de parâmetros de desempenho entre controladores PI.

Controlador	**PI_A**	**PI_B**	**PI_C**
Overshoot (°C)	3,90	3,5	3,5
Tempo de subida (s)	189	189	183
Tempo de saturação da MV (s)	151	154	122
ITAE	257.663,34	153.738,37	127.943,33

Diante dos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 4.8, justifica-se a seleção do controlador PI_C, o qual apresentou menor valor do índice ITAE. Os parâmetros definidos para este controlador são: $K_c = 35$ %/°C e $\tau_i = 31$ s

4.9.2 - Sintonia Fina do Controlador PID

Vários ensaios foram realizados para a determinação da combinação de parâmetros (K_c, τ_i, τ_d) mais adequada para a atuação do controlador PID. Como ilustração da metodologia aplicada serão apresentadas três propostas testadas experimentalmente.

Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 são apresentados os comportamentos da temperatura no tanque de precipitação da bromelina (PV) sob a atuação da variável manipulada (MV) dada pela rotação da bomba de propilenoglicol, durante a batelada.

No ensaio representado pela Figura 4.17 obteve-se um *overshoot* de aproximadamente 3,5 °C e um tempo de subida de 180 s. Observa-se que a ação do controlador não conseguiu retornar o valor da variável controlada para o valor do *set-point*. Para eliminar este comportamento foi proposto um aumento no valor de τ_i.

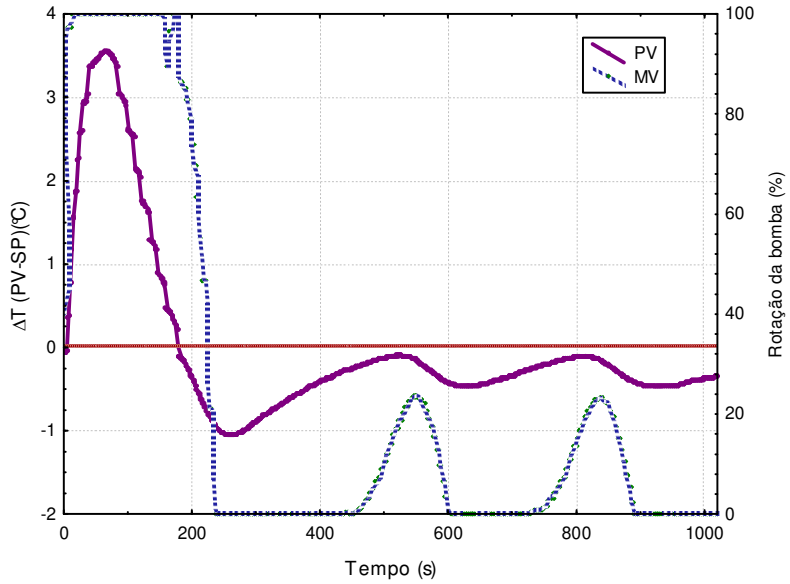


FIGURA 4.17 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PID, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C, τ_i = 18,0 s e τ_d = 1,5 s.

Na Figura 4.18 ainda pode ser observado a presença de um pequeno *off-set* e nota-se que o valor do *overshoot* praticamente não foi alterado. Para proporcionar um melhor desempenho da resposta da variável controlada obtida, o valor do parâmetro τ_d foi aumentado.

Pode ser observado na Figura 4.19 que o aumento do valor do τ_d proporcionou uma pequena redução no valor de *overshoot* apresentado, correspondente a 3,3 °C, e a eliminação do *off-set*.

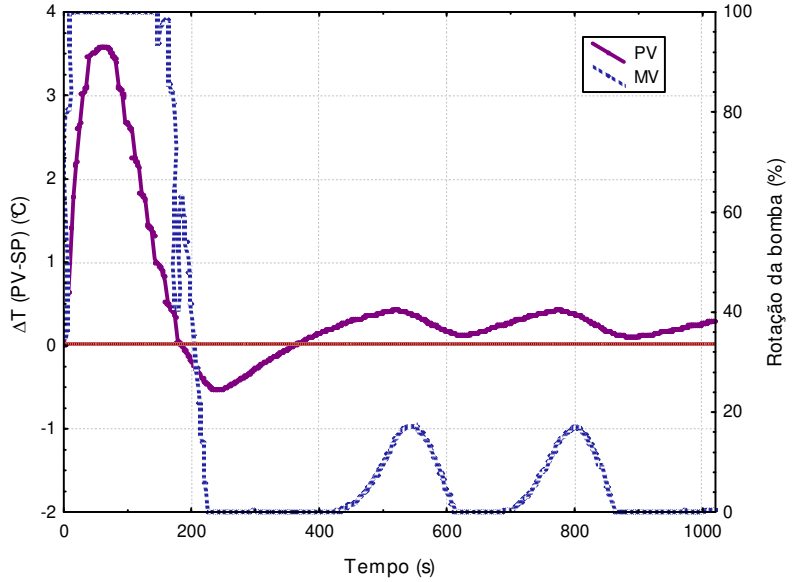


FIGURA 4.18 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PID, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C, τ_i = 28,0 s e τ_d = 1,5 s.

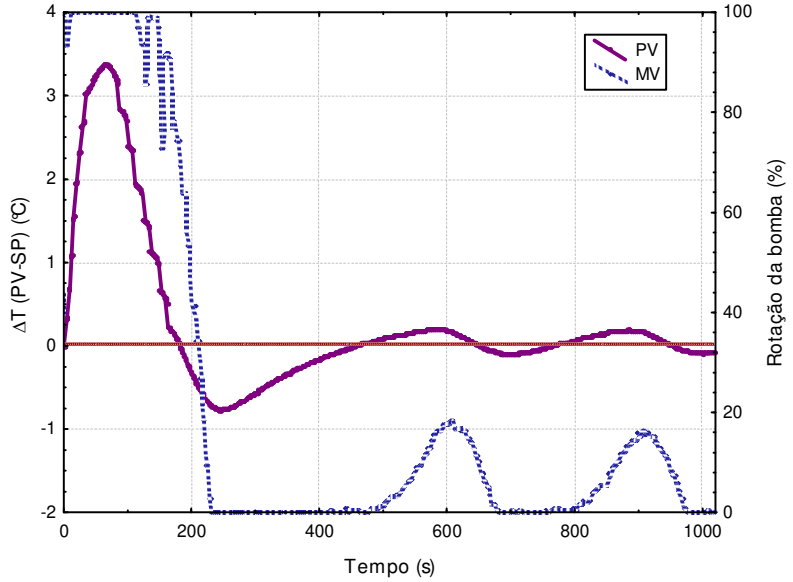


FIGURA 4.19 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação do controlador PID, com parâmetros K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 28,0 s e τ_d = 7,0 s.

A Tabela 4.9 foi construída para facilitar a análise comparativa dos parâmetros de desempenho dos controladores implementados no sistema. Foram denominados controladores PID_A, PID_B e PID_C, os controladores representados pelas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 respectivamente.

TABELA 4.9 - Comparação de parâmetros de desempenho entre controladores PID.

Controlador	**PID_A**	**PID_B**	**PID_C**
Overshoot (°C)	3,5	3,5	3,3
Tempo de subida (s)	180	180	176
Tempo de saturação da MV (s)	170	138	108
ITAE	207.928,62	153.485,62	97.774,17

Uma análise dos parâmetros apresentados na Tabela 4.9 aponta para a utilização da sintonia do controlador PID_C (K_c = 35,0 %/°C e τ_i = 28,0 s e τ_d = 7,0 s). A escolha também foi baseada em uma análise qualitativa do comportamento da variável manipulada.

4.10 - VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PROCESSO

Para a verificação do comportamento dinâmico do processo foram realizadas perturbações positivas e negativas de mesma magnitude em diferentes momentos da batelada, com diferentes volumes. Este procedimento tem como objetivo a obtenção de curvas de reação para determinar o efeito da variação do volume ao longo do processo e verificar o comportamento não-linear do mesmo.

4.10.1 - Efeito da Variação do Volume na Linearidade do Processo.

Perturbações de igual amplitude de 30% (positiva e negativa) foram realizadas na variável manipulada do sistema, rotação da bomba de propilenoglicol, para a obtenção de curvas de reação em diferentes volumes da mistura caldo de abacaxi/etanol: 300 mL (1:1), 450 mL (1:2) e 650 mL (1:3). Também foram feitas perturbações na variável manipulada para a proporção de caldo de abacaxi/etanol de 1:4 (750 mL), no entanto, houve dificuldade na realização do procedimento para este volume, contribuindo para que as curvas de reação apresentassem comportamentos que não estavam de acordo com o esperado, sendo as mesmas desconsideradas.

As curvas de reação obtidas em diferentes volumes da mistura caldo de abacaxi/etanol estão representadas na Figura 4.20.

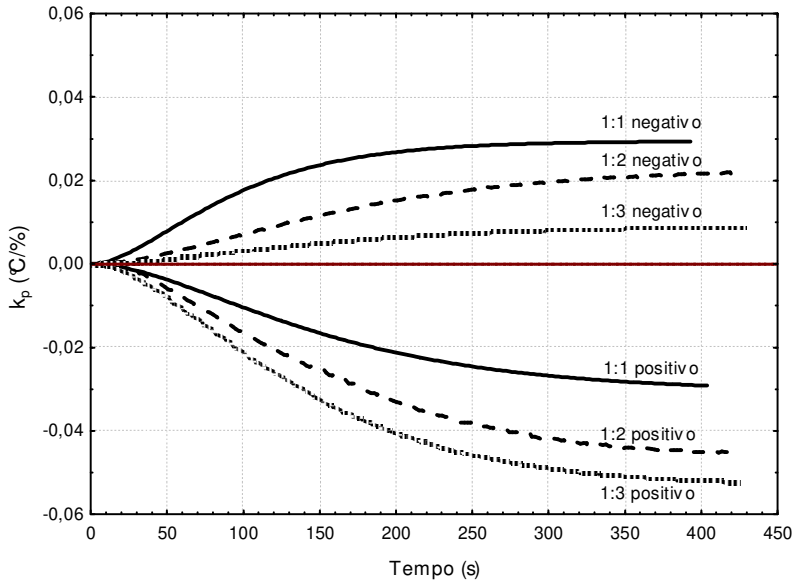


FIGURA 4.20 - Comparação entre as curvas de reação obtidas a partir de perturbações positivas e negativas na variável manipulada, para verificação da linearidade do processo.

Num sistema linear, as respostas apresentadas para perturbações opostas de igual amplitude são simétricas. Pode ser constatado na Figura 4.20 que sistema utilizado neste estudo apresenta não-linearidade acentuada. Esta característica reforça a limitação do uso dos controladores convencionais neste sistema.

A característica não linear é facilmente explicada devido ao efeito da variação do volume contido no tanque durante a batelada. Assim, ocorre uma deficiente troca térmica no início do processo, conseqüência de uma menor área de troca. Outra fonte importante de não linearidade é o calor de dissolução do etanol em uma solução aquosa. No início do processo o calor desprendido é maior, com o decorrer da precipitação esse efeito vai se tornando cada vez menor.

Na Tabela 4.10 são apresentadas as respostas obtidas para a variação de temperatura, de acordo com o efeito da variação do volume no decorrer do processo de precipitação.

TABELA 4.10 - Efeito da variação do volume no tanque de precipitação.

Perturbação:		**Positiva**	**Negativa**
Volume (mL)	Proporção	k_p (°C/%)	k_p (°C/%)
300	1:1	-0,030	0,030
450	1:2	-0,047	0,020
600	1:3	-0,053	0,010

Analisando-se as curvas de reação a diferentes volumes (Figura 4.20) e a Tabela 4.10, pode-se perceber que a não linearidade vai aumentando a medida que aumenta-se o volume no processo, sendo mais fortemente observada para o volume de 600 mL (1:3). Para perturbações positivas na variável manipulada, obteve-se um ganho do processo de -0,053 °C, quando para perturbações negativas, obteve-se um ganho do processo de 0,010 °C. Este fato deve-se às mudanças nas características transientes do processo.

Um sistema é dito sensível quando uma pequena variação na variável manipulada causa uma grande variação na variável controlada, ou seja, quanto menor for o valor da MV necessário para provocar maior variação no valor de PV, mais sensível é o sistema.

Quando aplicada uma perturbação positiva na variável manipulada, em um volume de 600 mL, a temperatura interna do tanque sofreu maior diminuição quando comparada com o volume de 450 mL e com o de 300 mL. Sendo assim, pode-se afirmar que a sensibilidade do sistema aumenta com o aumento do volume no decorrer do processo de precipitação.

Na determinação dos parâmetros dos controladores para as diferentes curvas de reação, para perturbações positivas na variável manipulada, foi observada uma redução do valor do ganho do controlador (K_c) de acordo com o aumento do volume, visto que aumentava a sensibilidade do sistema.

Os valores de K_c foram determinados, para cada condição, utilizando as curvas de reação obtidas na Figura 4.20. O comportamento do parâmetro Kc é apresentado na Figura 4.21.

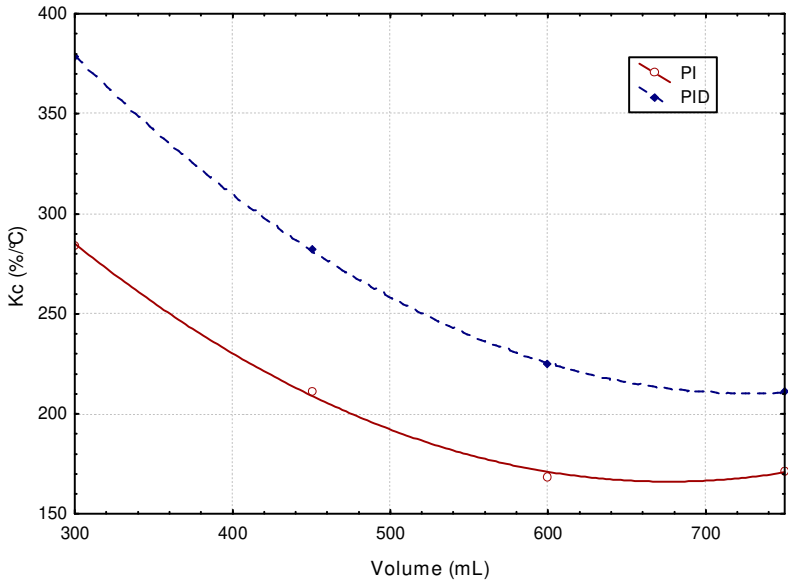


FIGURA 4.21 - Comportamento de K_c para diferentes volumes contidos no tanque de precipitação, sob perturbações positivas na variável manipulada.

Na Figura 4.21, observa-se o aumento da sensibilidade do sistema com o aumento do volume presente no tanque de precipitação, tendo em vista que o valor de K_c vai diminuindo. Este comportamento pode ser facilmente explicado, pois as ações de controle serão mais efetivas em um maior o volume para precipitação, devido a um aumento da área de troca térmica do líquido (caldo de abacaxi + álcool) com o fluido refrigerante. O aumento do volume de precipitação também diminui o impacto provocado pela dissolução do etanol na solução contida no tanque.

Para perturbações negativas na rotação da bomba de propilenoglicol pode-se perceber um comportamento contrário do efeito da variação de volume durante a batelada. O efeito de atuação da variável manipulada na variável controlada foi maior quanto menor era o volume. Quando aplicada uma perturbação negativa na variável manipulada, a um volume de 300 mL, a temperatura interna do tanque sofreu maior aumento quando comparada com o volume de 450 mL e com o de 600 mL.

Assim, pode-se afirmar que a sensibilidade do sistema é maior quanto menor é o volume do processo de precipitação. Esse comportamento inverso, pode ser explicado devido a existência de duas tendências agindo na mesma direção, fazendo com que a variável controlada aumente: a diminuição da capacidade de troca térmica no sistema, provocada pela queda da vazão do fluido refrigerante e, a liberação de calor, provocada pela dissolução do etanol. Estes efeitos, em conjunto, proporcionam o aumento da temperatura no tanque de precipitação, principalmente quando o volume é menor. Com o aumento do volume no decorrer do processo, a concentração de álcool vai aumentando e o calor de dissolução vai diminuindo, contribuindo também para um menor aumento da variável controlada e consequentemente, menor variação positiva da temperatura.

O comportamento dos valores calculados para o ganho do controlador (K_c) é apresentado na Figura 4.22.

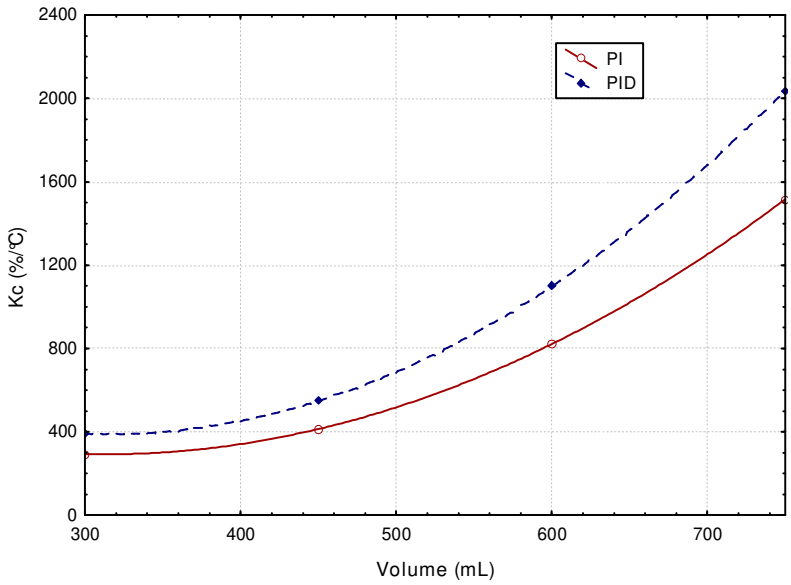


FIGURA 4.22 - Comportamento de K_c para diferentes volumes contidos no tanque de precipitação, sob perturbações negativas na variável manipulada.

Com o aumento do volume observa-se um aumento no valor de K_c. Este comportamento era esperado visto que o sistema torna-se menos sensível para uma atuação decrescente da variável manipulada, ou seja, maior deveria ser a atuação negativa da bomba de propilenoglicol necessária para conseguir proporcionar um aumento no valor da temperatura do tanque.

A análise do comportamento dinâmico do sistemas e das não-linearidades apresentadas pelo processo de precipitação de bromelina contribuiu para a construção de um conhecimento especialista do sistema, habilidade importante no desenvolvimento do controlador *fuzzy*.

4.11 - DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR *FUZZY*

4.11.1 - Determinação dos Parâmetros do Controlador *Fuzzy*-PI

A verificação do comportamento dinâmico e de não linearidades do processo de precipitação de bromelina contribuiu para um melhor conhecimento especialista e, consequentemente, para o projeto do controlador *fuzzy*. A determinação do universo de discurso, dos conjutos suporte, das funções de pertinência e da base de regras foram parâmetros manipulados com o objetivo de proporcionar uma melhor atuação do controlador *fuzzy* projetado.

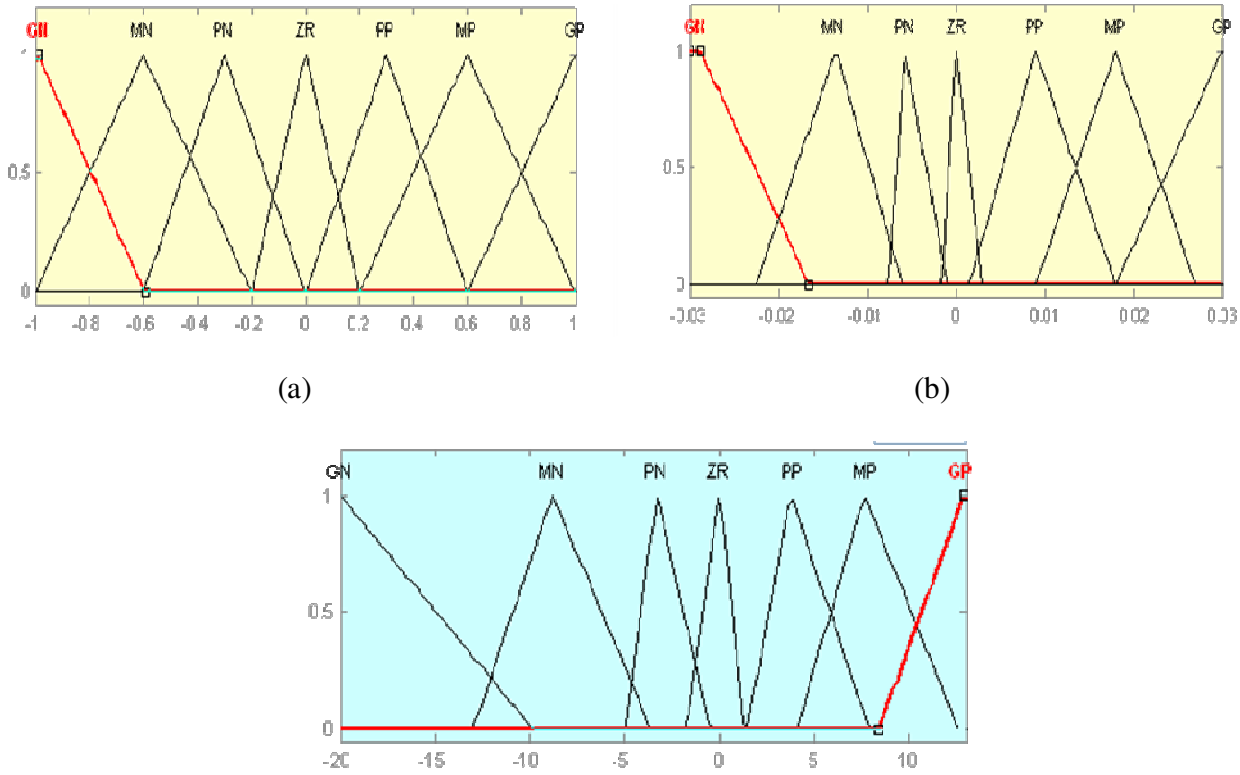
Durante o procedimento de projeto do controlador *fuzzy* a fase de sintonia do controlador apresentou um maior grau de complexidade e subjetividade quando comparado à sintonia do controlador convencional.

O conhecimento do processo era acumulativo, assim a cada ensaio de ajuste da sintonia do controlador *fuzzy* o comportamento das variáveis do processo proporcionava um ajuste mais adequado dos parâmetros do controlador para os ensaios seguintes.

Foram realizados vários ensaios para sintonia de um controlador *fuzzy*-PI. Para ilustrar a metodologia adotada serão apresentados três ensaios, onde foram analisados os comportamentos das variáveis controlada e manipulada.

Em todos os ensaios foram utilizadas funções de pertinência triangulares. Assim, a combinação dos parâmetros universo de discurso, conjuntos suporte e base de regras foram definidos como Sintonia 1, Sintonia 2 e Sintonia 3.

A combinação dos parâmetros utilizados na Sintonia 3 proporcionaram melhor desempenho do controlador *fuzzy*-PI após a etapa de sintonia. As estruturas das funções de pertinência, universo de discurso e conjunto suporte utilizados na Sintonia 3 são apresentados na Figura 4.23 (a, b e c). Os parâmetros utilizados na Sintonia 1 e 2 podem ser visualizados no Apêndice E.



(a) (b)

(c)

FIGURA 4.23 - Estruturas das funções de pertinência para as variáveis (a) ErroTT302 (b) DErroTT302 e (c) DSaidaFzz empregadas no desenvolvimento do controlador *fuzzy*-PI utilizando parâmetros da Sintonia 3.

Na Tabela 4.11 está representada a matriz da base de regras utilizada na Sintonia 3. Pode ser observado que foram utilizadas sete funções de pertinência de cardinalidade 7 (GN - grande negativo; MN - médio negativo; PN – pequeno negativo; ZR – zero; PP – pequeno positivo; MP – médio positivo e GP – grande positivo) e três variáveis linguísticas (ErroTT302, DErroTT302 e DSaídaFzz).

TABELA 4.11 - Matriz de base de regras para controlador *fuzzy*-PI utilizada na Sintonia 3.

ERRO	**ΔERRO**						
	GN	**MN**	**PN**	**ZR**	**PP**	**MP**	**GP**
GP	**PN**	**PN**	**PN**	GP	GP	GP	GP
MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	**MP**
ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	**PP**
MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	**ZR**
GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR

A sintonia do controlador avançado *fuzzy* foi realizada com base em analogia à sintonia efetuada para os controladores convencionais.

Na Sintonia 3 foram utilizados universos de discurso para as variáveis ErroTT302, DErroTT302 e DSaidaFzz de [-1,1], [-0,03,0,03] e [-20,13] respectivamente.

O universo de discurso proposto para a variável de entrada ErroTT302 [-1, 1] representa uma faixa estreita visto que foi observado que o início do processo é a etapa mais crítica, exigindo uma rápida atuação da variável manipulada mesmo para pequenos desvios da variável controlada. Sendo assim, mesmo para pequenos desvios na PV é necessária a atuação da MV, o que também explica a escala positiva de 13, no universo de discurso da variável de saída DSaidaFzz.

A escala negativa (-20), em termos de valores absolutos, foi maior que a positiva (13) devido à observação da necessidade de diminuir mais rapidamente a refrigeração após a etapa inicial, onde a menores vazões de propilenoglicol são capazes de conter a elevação da temperatura do tanque provocada pela liberação de calor de dissolução do álcool durante o processo de precipitação, conforme conhecimento obtido na etapa de verificação do comportamento dinâmico do processo .

Apesar da realização desta etapa ter contribuído para a fase inicial de determinação dos universos de discurso e disposição das funções de pertinência, a adaptação destes parâmetros foi fortemente influenciada por conhecimentos subjetivos baseados em observações práticas do comportamento do controlador diante destas modificações.

4.11.2 - Sintonia do Controlador *Fuzzy*-PI

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 estão representados os comportamentos dos controladores *fuzzy*-PI desenvolvidos utilizando os parâmetros propostos nas Sintonias 1, 2 e 3, respectivamante.

No ensaio representado pela Figura 4.24 (Sintonia 1) obteve-se um *overshoot* de aproximadamente 3,5°C, tempo de resposta de 193 s, tempo de estabilização em torno de 200 s e tempo de saturação máximo da variável manipulada de 167 s. Para um melhor desempenho do controlador foi proposto alterações no intervalo do universo de discurso, na disposição das funções de pertinência e nas regras, obtendo-se respostas representadas nas Figuras 4.25 e 4.26.

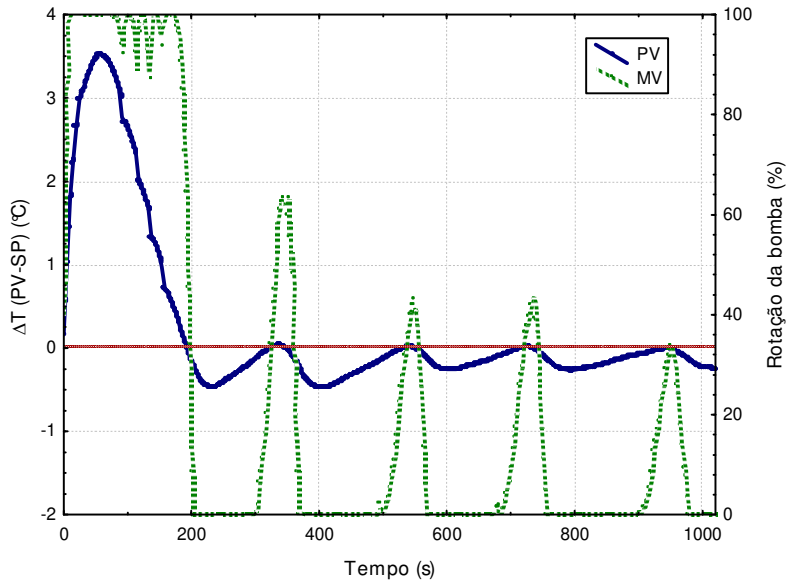


FIGURA 4.24 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação de controlador *fuzzy*-PI, utilizando parâmetros da Sintonia 1.

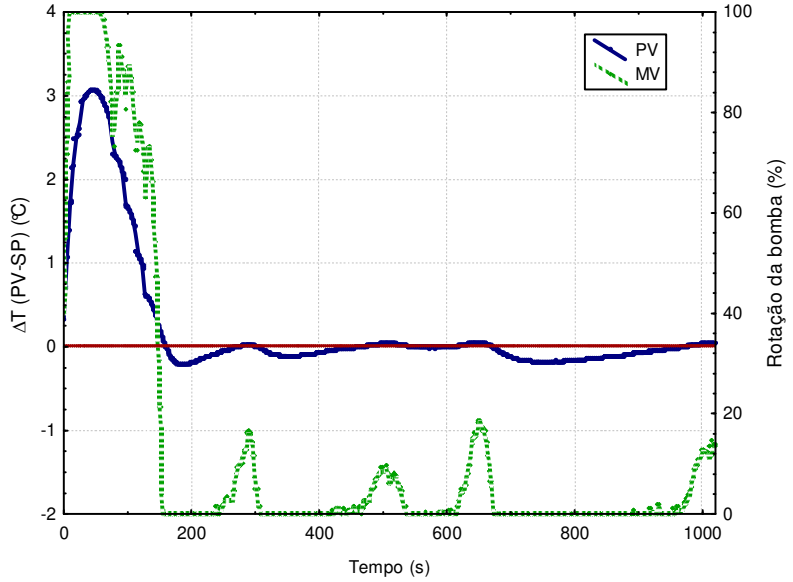


FIGURA 4.25 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação de controlador *fuzzy*-PI, utilizando parâmetros da Sintonia 2.

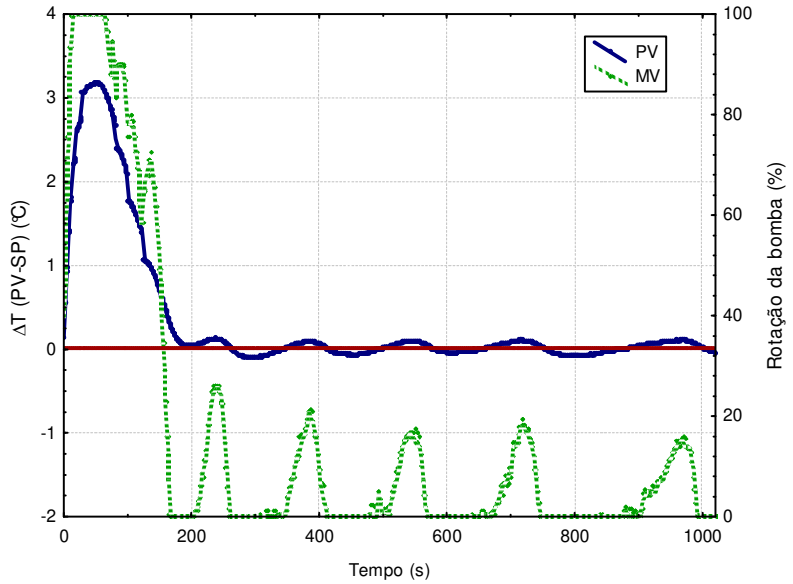


FIGURA 4.26 - Comportamento da variável controlada (ΔT = PV – SP) e variável manipulada MV, sob a ação de controlador *fuzzy*-PI, utilizando parâmetros da Sintonia 3.

Para os controladores *fuzzy*-PI projetados com a Sintonia 2 e 3 foram observados *overshoots* de aproximadamente 3,0 °C, com tempos de resposta e de estabilização de 157 s e 186 s, e tempo de saturação máximo da variável manipulada de 54 s e 49 s respectivamente.

A grande melhoria do desempenho da variável manipulada, com grande redução do tempo de saturação, quando comparado ao desempenho apresentado mediante uso de controladores convencionais, deve-se ao bom ajuste do controle *fuzzy* na região em que o erro é grande positivo (GP) e a variação do erro é grande negativa (GN).

Como o desempenho entre os controladores *fuzzy* com sintonia 2 e 3 foi muito semelhante, a escolha do melhor controlador foi determinada a partir do critério de erro ITAE, segundo dados da Tabela 4.12.

TABELA 4.12 - Critério de erro ITAE para escolha entre controladores *fuzzy*-PI.

Parâmetro do controlador *fuzzy*-PI	**ITAE**
Sintonia 1	109.254,76
Sintonia 2	55.950,05
Sintonia 3	49.598,99

Na Tabela 4.12 é observado menor valor de ITAE para o controlador *fuzzy*-PI utilizando parâmetros da Sintonia 3, sendo esta a sintonia selecionada como mais adequada.

Na Figura 4.27 é apresentada a superfície de controle, do controlador *fuzzy*-PI, utilizando os parâmetro propostos na Sintonia 3. As superfícies de resposta obtidas para os controladores *fuzzy*-PI com parâmetros de Sintonia 1 e 2, estão apresentadas no Apêndice D.

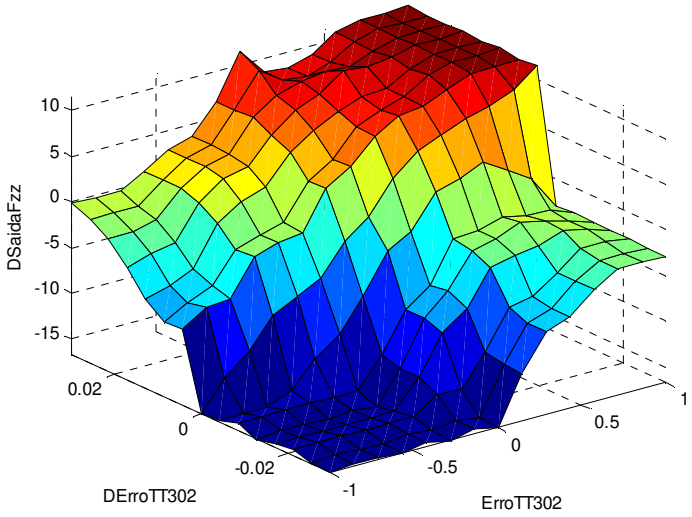


FIGURA 4.27 - Superfície de controle, do controlador *fuzzy*-PI, com os parâmetros da Sintonia 3.

A Equação 4.2 determinou a ação de saída do controlador *fuzzy*-PI, utilizando parâmetros da Sintonia 3. Esta equação foi obtida através do *Table-curve* e apresenta coeficiente de determinação (r^2) de 0,9602.

$$DSaidaFzz =$$
$$-1{,}38 + 15{,}36.ErroTT\ 302 + 634{,}36.DErroTT\ 302 - 1{,}28.ErroTT\ 302^{2}$$
$$-882{,}16.DErroTT\ 302^{2} - 18{,}60.ErroTT\ 302.DErroTT\ 302 - 6{,}21.ErroTT\ 302^{3}$$
$$-341846\ .07.DErroTT\ 302 - 4644{,}82.ErroTT\ 302.DErroTT\ 302^{2}$$
$$-134{,}12.ErroTT\ 302^{2}.DErroTT\ 302$$

EQUAÇÃO 4.2

4.12 - CARACTERIZAÇÃO DA BROMELINA PARA OS DIFERENTES TIPOS DE CONTROLADORES

As proteínas totais e a atividade enzimática foram determinadas para as amostras dos ensaios finais de cada tipo de controlador sintonizado. Os ensaios finais de controle foram realizados com a mesma amostra de suco da casca e talo do abacaxi e no mesmo dia, assim como as análises do precipitado obtido.

4.12.1 - Determinação de Proteínas Totais

As proteínas totais refletem a concentração de proteínas em determinada amostra. Para a determinação desta foi necessária a construção de uma curva padrão utilizando soluções com concentrações conhecidas, que relacionou a concentração de enzimas e a absorbância lida, segundo Figura 4.28.

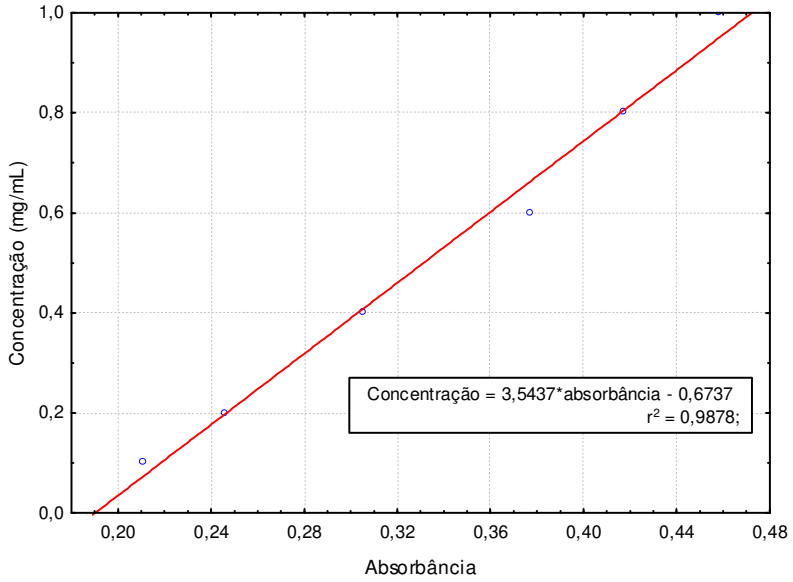


FIGURA 4.28 - Curva de calibração de Bradford para determinação de proteínas totais.

Os resultados obtidos das análises de proteínas para cada tipo de controlador encontram-se na Tabela 4.13, sendo que a amostra de suco puro, sem precipitação por adição de reagente, foi utilizada como referência.

TABELA 4.13 - Resultados obtidos a partir da determinação das proteínas totais.

Tipo de amostra	**Média de absorbância medida**	**Proteínas totais (mg/mL)**
Suco puro	0,4324 ± 0,0230	0,8587
Malha aberta	0,4205 ± 0,0935	0,8166
Controlador PI	0,4208 ± 0,0164	0,8176
Controlador PID	0,4164 ± 0,0110	0,8020
Controlador *fuzzy*-PI	0,4167 ± 0,0136	0,8030

Diante dos resultados apresentados pode-se perceber que não houve variação da concentração de proteínas totais entre as amostras, o que já era de se esperar visto que as condições de precipitação foram as mesmas para todos os tipos de amostra independentemente do uso de controlador. A concentração média de proteínas totais na amostra final após o processo de precipitação foi de 0,8358 ± 0,0194 mg/mL o que equivale a aproximadamente 627 mg de proteínas em cada 750 mL de suco da casca e talo do abacaxi.

4.12.2 - Determinação da Atividade Enzimática

Com o intuito de avaliar a qualidade da enzima obtida, foi determinada a atividade enzimática após processo de precipitação por uso de diferentes controladores. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 4.14.

TABELA 4.14 - Resultados obtidos a partir da determinação da atividade enzimática

Tipo de amostra	**Atividade (U/L)**	**Atividade específica (U/g)**	**Atividade relativa (%)**
Suco puro	2,865 ± 0,000	3,34	100
Malha aberta	0,262 ± 0,569	0,32	9,15
Controlador PI	0,763 ± 0,259	0,93	26,62
Controlador PID	0,823 ± 0,186	1,03	28,72
Controlador *fuzzy*-PI	1,438 ± 0,114	1,80	50,21

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 4.14 pode-se perceber que o uso de controladores durante o processo de precipitação da bromelina foi favorável à recuperação da atividade proteolítica inicial da bromelina. Para o ensaio em que não foi efetuado controle sobre a temperatura do líquido onde se encontrava a enzima, a recuperação foi mínima quando comparada a recuperação obtida quando o controlador foi utilizado.

Observa-se que, mediante a utilização do controlador *fuzzy* para as amostras preparadas com casca e talo do abacaxi, o teor de enzima extraído foi de 1,8 U/g, valor superior ao encontrado por Cesar et al. (1999).

Houve pequena diferença percentual de recuperação de atividade inicial entre os controladores convencionais PI e PID. O uso destes controladores proporcionou a precipitação da enzima com uma recuperação de atividade de aproximadamente 30 %, maior que a do ensaio realizado em malha aberta. No entanto, foi observada uma melhor eficiência do controlador avançado quanto à recuperação da atividade proteolítica da bromelina após o processo de precipitação: aproximadamente 50 % da sua atividade inicial, o que corresponde a uma recuperação quase 6 vezes maior que a obtida quando nenhum controle foi adicionado.

As variações de temperatura, pH e a velocidade de agitação do meio são os principais fatores responsáveis pela perda da atividade enzimática da bromelina durante o processo de precipitação.

4.13 - COMPARAÇÃO FINAL DO DESEMPENHO ENTRE CONTROLADORES CONVENCIONAL E AVANÇADO PARA O PROCESSO DE PRECIPITAÇÃO DA BROMELINA

Para se determinar o desempenho entre os controladores desenvolvidos neste trabalho foram realizadas análises qualitativas e quantitativas do comportamento das variáveis do processo.

As análises qualitativas correspondem a observação geral do comportamento das variáveis controlada e manipulada.

As análises quantitativas correspondem a determinação do *overshoot*, do tempo de subida, do tempo de estabilização, do tempo de saturação máxima da variável manipulada, do critério da integração do erro ao longo do tempo (ITAE), da atividade enzimática recuperada e da energia consumida durante os ensaios em batelada.

Os ensaios finais foram efetuados utilizando as mesmas condições experimentais, tais como: temperatura de entrada na camisa do reator e vazão inicial do fluido refrigerante, vazão e temperatura do reagente de precipitação, velocidade de agitação, pH e amostra de suco dos resíduos do abacaxi.

Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 são apresentados os comportamentos dos controladores PI, PID e *fuzzy*-PI, respectivamente, de forma comparativa ao ensaio realizado em malha aberta.

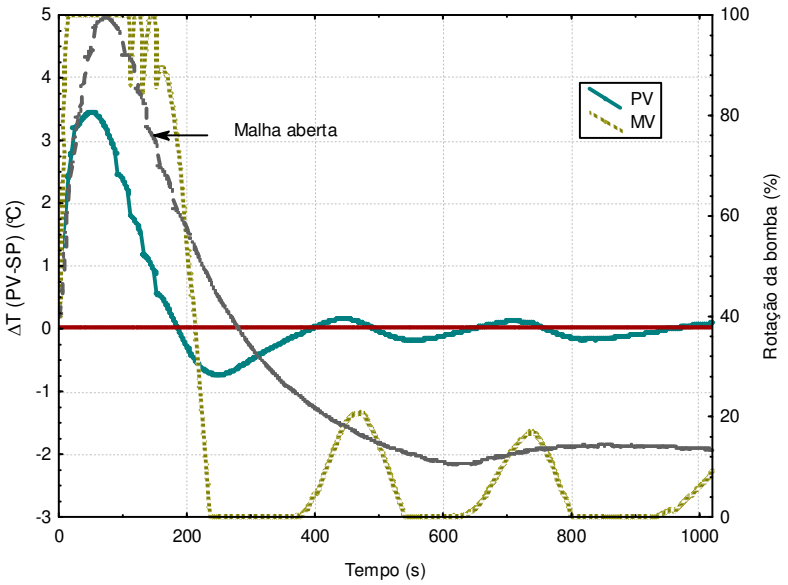


FIGURA 4.29 - Ensaio final do controlador PI: $K_c = 35$ %/°C e $\tau_i = 31$ s.

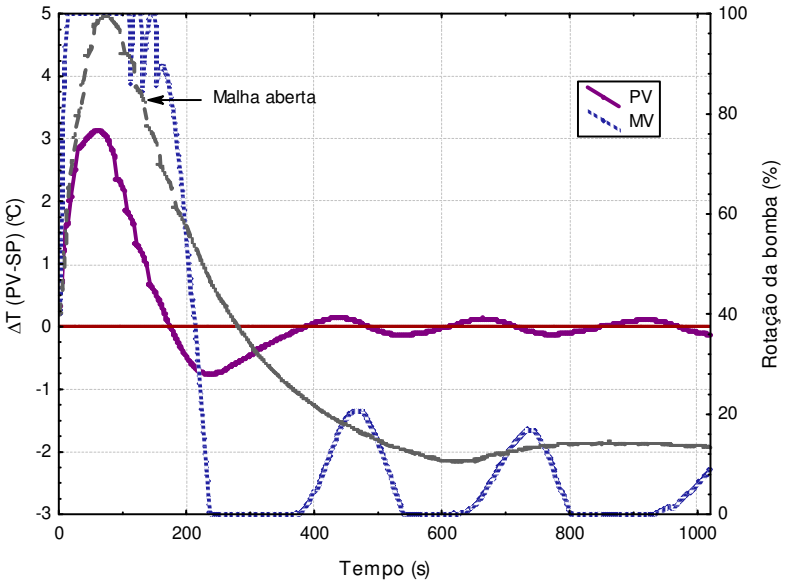


FIGURA 4.30 - Ensaio final do controlador PID: $K_c = 35$ %/°C, $\tau_i = 28$ s e $\tau_d = 7$ s.

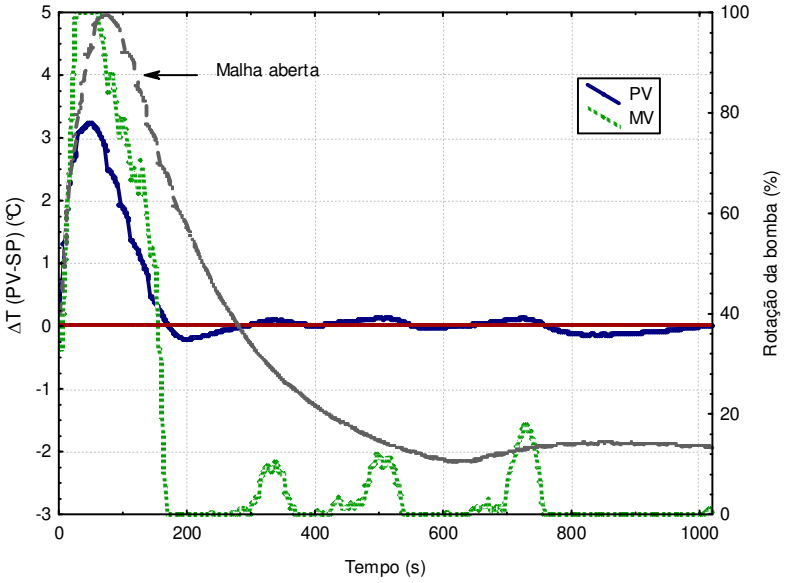


FIGURA 4.31 - Ensaio final do controlador *fuzzy*-PI.

É inegável a melhoria do comportamento da temperatura no tanque de precipitação diante da utilização de controladores quando comparada ao seu comportamento em malha aberta, como visto nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31.

Observa-se um maior *overshoot* apresentado quando o ensaio foi realizado em malha aberta, onde o valor da temperatura interna do tanque de precipitação alcançou 10 °C, propiciando perda de atividade enzimática da bromelina.

Nas Figuras 4.29 e 4.30 pode ser observado que o comportamento da variável controlada e da variável manipulada foi bastante semelhante, sendo observado um comportamento um pouco mais favorável para o controlador PID que apresentou menor tempo de subida e um tempo de saturação da variável manipulada menor.

Os parâmetros de desempenho obtidos nos ensaios comparativos são apresentados nas Figuras 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35.

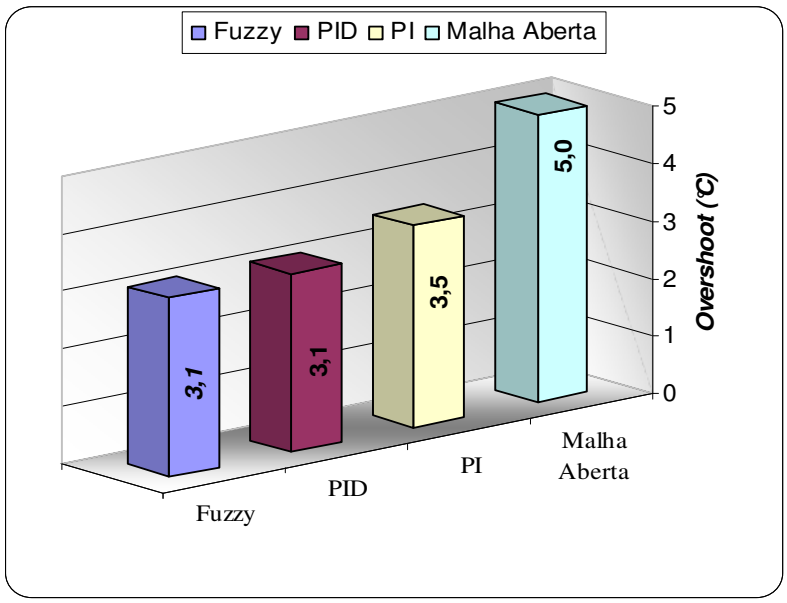


FIGURA 4.32 - Comparação entre valores de *overshoot* para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

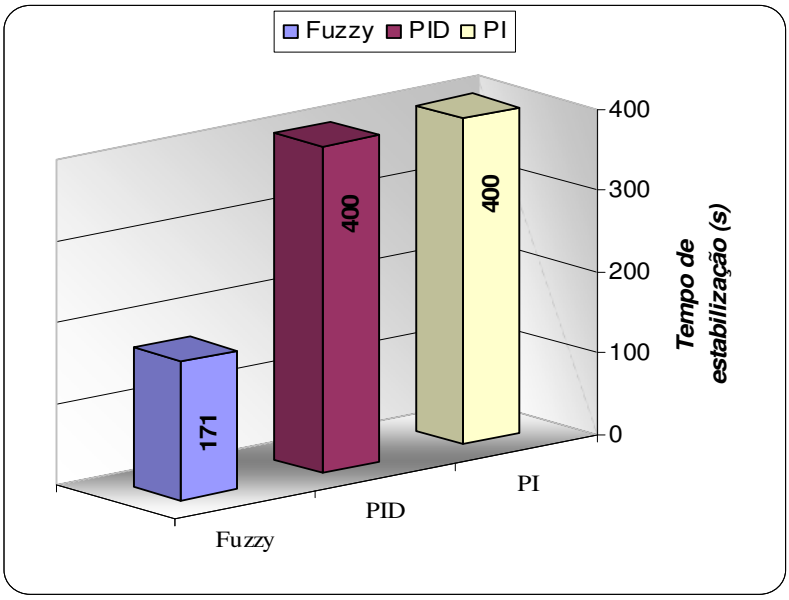


FIGURA 4.33 - Comparação entre tempos de estabilização para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

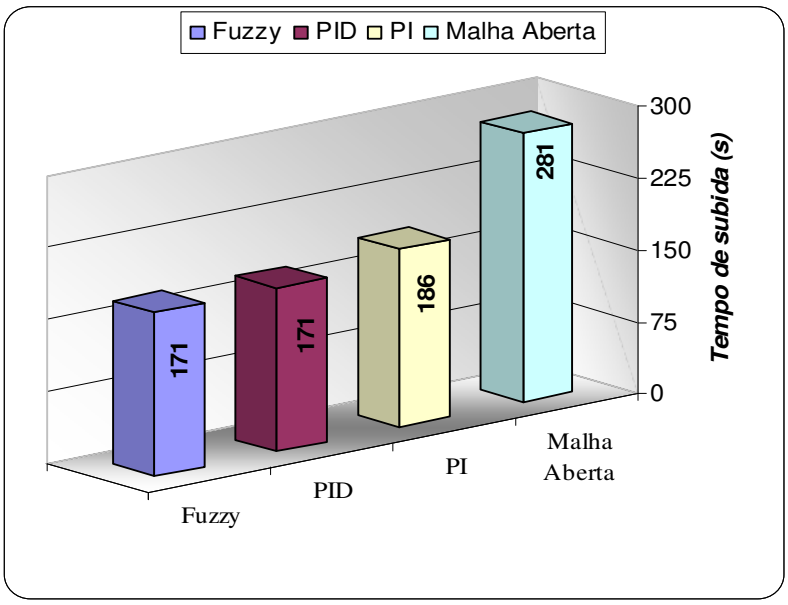


FIGURA 4.34 - Comparação entre tempos de subida para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

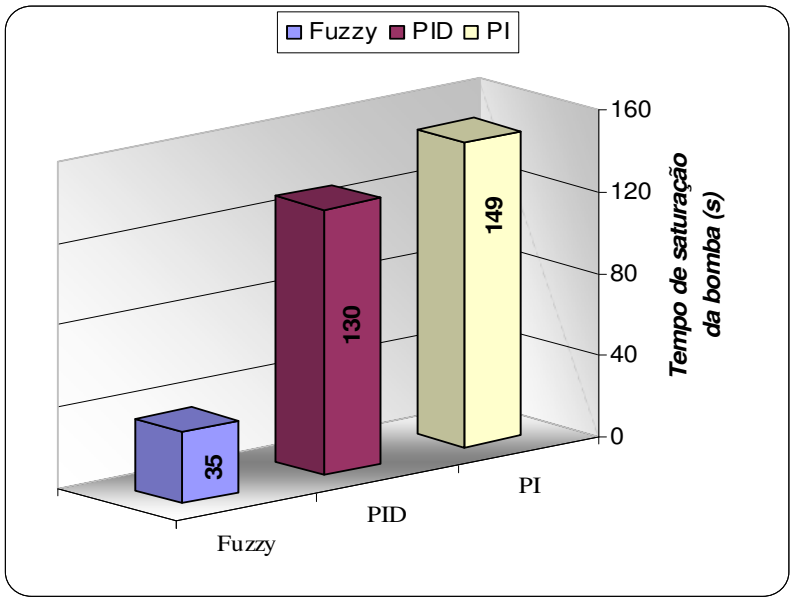


FIGURA 4.35 - Comparação entre comportamentos da variável manipulada para ensaios com controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

Através da Figura 4.32 pode-se perceber que o *overshoot* obtido foi praticamente igual para os dois tipos de controladores (convencional e avançado), os quais apresentaram menores valores que quando o sistema foi realizado em malha aberta, propiciando assim, menor desvio da variável controlada no processo.

Na Figura 4.33 é observado um valor bem menor do tempo de estabilização quando se utiliza controlador avançado *fuzzy*, comparado aos apresentados pelos controladores convencionais PI e PID. Sendo assim, o controle *fuzzy* proporciona uma maior manutenção da variável controlada em torno do *set-point*, a qual favorece na recuperação da atividade enzimática final.

Observa-se que com o sistema operando em malha fechada há um aumento na velocidade de resposta da atuação da variável controlada frente à perturbação na variável manipulada, o qual pode ser notado a partir da diminuição dos valores de tempo de subida, conforme apresentados na Figura 4.34.

De acordo com a Figura 4.35, nota-se que o controlador *fuzzy*-PI apresentou desempenho mais favorável da variável manipulada, onde o tempo de saturação da bomba de propilenoglicol diminuiu para 35 s, e houve melhor manutenção da temperatura em torno do *set-point*.

Este comportamento pode ser atribuído a um ajuste mais adequado das funções de pertinência do controlador *fuzzy* na região em que o erro é grande positivo e variação do erro é grande negativo, as quais contribuíram para a melhoria do desempenho do controlador.

A análise comparativa do ITAE, da energia consumida durante os ensaios e da atividade enzimática recuperada são representados nas Figuras 4.36, 4.37 e 4.38, respectivamente.

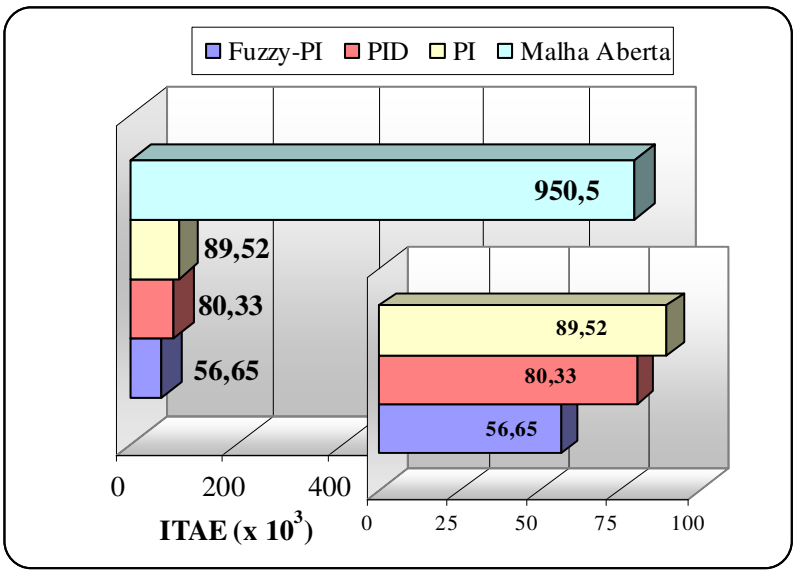


FIGURA 4.36 - Comparação entre valores do parâmetro ITAE (integral do erro absoluto no tempo) para controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

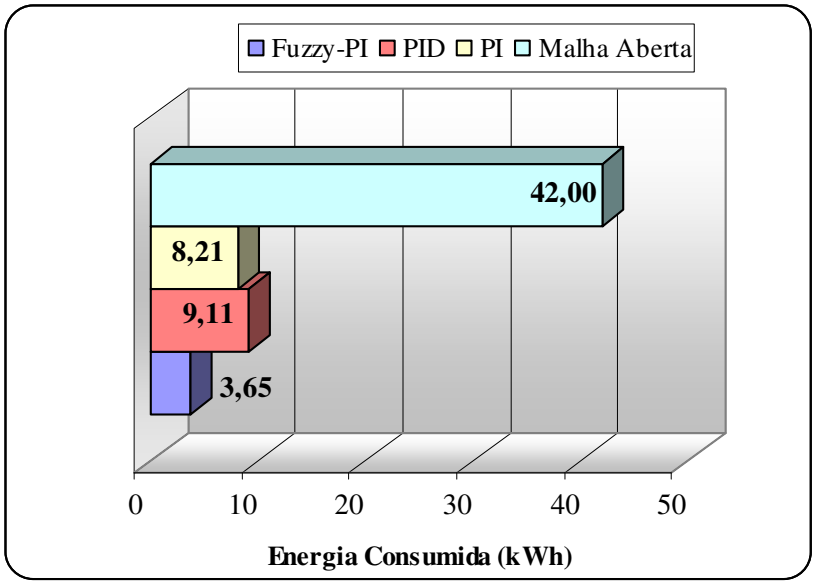


FIGURA 4.37 - Comparação entre valores do consumo de energia elétrica para controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

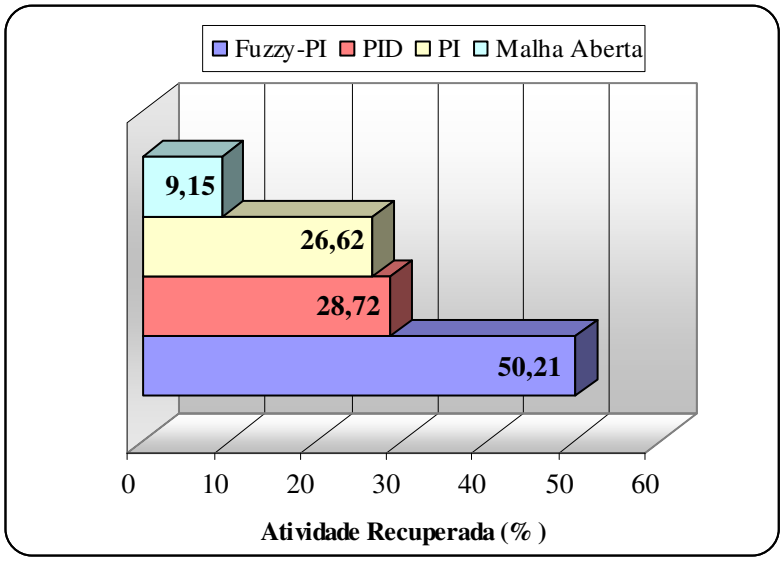


FIGURA 4.38 - Comparação entre valores da atividade enzimática da bromelina recuperada para controladores PI, PID, *Fuzzy*-PI e em Malha aberta.

Na Figura 4.36 são apresentados os valores calculados do ITAE para os diferentes modos de controle e em malha aberta. Sabe-se que valores menores de ITAE apontam para um melhor desempenho geral da resposta do sistema de controle. É evidente a diferença entre os valores obtidos para este índice de desempenho nos ensaios em malha fechada quando comparados aos valores obtidos em malha aberta, sendo o valor de ITAE, em média, aproximadamente 13 vezes menor.

Analisando-se apenas os controladores convencionais observa-se que o valor do ITAE para o controlador PID foi ligeiramente menor que o apresentado pelo controlador PI. Entretanto, o controlador avançado *fuzzy*-PI apresentou desempenho superior, com menor valor de ITAE. Esse comportamento pode ser explicado pela reduzida amplitude de oscilação da variável controlada em torno do valor de referência, durante a maior parte do ensaio.

Quanto ao consumo de energia elétrica durante os ensaios (Figura 4.37), é notável a economia de energia propiciada pelos ensaios em malha fechada. Em malha aberta, onde as condições iniciais do processo de precipitação da bromelina foram constantes, o consumo de energia elétrica chegou a 42 kWh. Utilizando-se um sistema em malha fechada, houve uma grande economia de energia elétrica, sendo consumida, em média, valores menores que 9 kWh.

Os controladores convencionais apresentaram comportamento similar quanto ao consumo de energia elétrica, em média 8,5 kWh. O controlador *fuzzy*-PI apresentou um consumo de 3,65 kWh, o que representa uma redução no consumo de energia elétrica de aproximadamente 58 %. Esta redução significativa no consumo de energia elétrica para o controlador *fuzzy* deve-se à utilização de parâmetros bem ajustados para este controlador, permitindo que o controle da temperatura fosse realizado de maneira mais eficiente, com uma menor saturação da bomba de propilenoglicol. Este fato comprova o melhor desempenho do controlador avançado diante de processos que apresentam não-linearidades.

Em termos de análise da qualidade final da bromelina obtida para os diferentes controladores, de acordo com a Figura 4.38, pode-se observar que o controlador *fuzzy*-PI apresentou um rendimento mais favorável comparado ao apresentado pelos controladores convencionais, proporcionando a recuperação da atividade proteolítica da bromelina de 50,21 %, valor considerado satisfatório em se tratando de um processo de precipitação em um único estágio.

Observa-se que para todos os parâmetros de desempenho que foram apresentados neste capítulo, o controlador avançado *fuzzy*-PI apresentou melhores índices quando comparado aos controladores convencionais PI e PID. Ressalta-se assim, o uso de controlador *fuzzy* como melhor alternativa para o controle da temperatura interna do tanque de precipitação da bromelina.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de controladores avançados aplicados em sistema de precipitação se mostrou viável em uma automação baseada na arquitetura inteligente *fieldbus* que permitiu flexibilidade ao projeto e acesso facilitado a diversas informações dos instrumentos de campo. Além destas vantagens, a topologia em barramento utilizada na interligação dos instrumentos permitiu maior facilidade na manutenção do sistema.

A realização de um planejamento experimental para determinação das condições iniciais do processo foi essencial no entendimento do comportamento geral do processo e representou economia de tempo e gastos desnecessários.

A verificação do comportamento dinâmico do processo revelou importantes características do sistema de precipitação da bromelina, principalmente, a rápida elevação da temperatura interna do tanque de precipitação no início do processo devido a grande liberação de calor resultante da dissolução do álcool e sua interação com o caldo de abacaxi. Com o aumento do volume de líquido a influência do calor de dissolução diminui e aumenta a área de troca térmica entre o caldo de abacaxi e as paredes da camisa de refrigeração do tanque. Dessa forma o processo torna-se termicamente mais eficiente passando a exigir menor atuação da bomba do fluido refrigerante.

A construção do conhecimento especialista proporcionada pelo estudo do comportamento dinâmico do processo foi fundamental na etapa de desenvolvimento do controlador *fuzzy*.

Pôde ser verificado que a simples utilização de um sistema em malha fechada na manutenção da temperatura interna do tanque de precipitação aumentou consideravelmente o desempenho geral do sistema quando comparado o sistema em malha aberta:

proporcionou uma melhoria na qualidade do produto final com um aumento de 449 % da atividade enzimática com uma redução de 91 % no consumo de energia elétrica.

Os controladores convencionais apresentaram uma recuperação da atividade proteolítica da bromelina em torno de 28 % da sua atividade inicial (suco puro sem precipitação). No entanto, é destacável o desempenho do controlador *fuzzy* para este processo quando o mesmo apresentou grau de recuperação de aproximadamente 50 % da atividade proteolítica da enzima, o que corresponde a um rendimento cerca de 80 % maior que o obtido para controladores convencionais.

Confirmando às expectativas com relação à eficiência do controlador avançado *fuzzy*, este apresentou melhor desempenho na manutenção, em torno do valor desejado (*set-point*), da temperatura interna do tanque de precipitação apresentando menor valor de índice de desempenho baseado no erro ITAE, o que constitui um sistema com resposta mais adequada.

O controlador avançado apresentou ainda um consumo de energia elétrica 58 % menor, quando comparado com o requerido pelos controladores convencionais, proporcionando assim, significativa redução de custos de operação.

A maior eficiência do controlador avançado pode ser atribuída a sua adaptação às não-linearidades do sistema, apresentando comportamentos mais favoráveis que o controlador convencional.

Sendo assim, a estratégia do controlador *fuzzy*-PI se apresentou atrativa para o controle sistema de precipitação da bromelina, pois proporcionou: menores valores para os parâmetros de desempenho dos controladores; menor consumo de energia elétrica; maior recuperação da atividade enzimática, garantido a qualidade do produto obtido.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os dados obtidos por este trabalho abrem uma série de novos projetos na área:

- Estudo da influência do pH no meio de precipitação e possível monitoração em tempo real e controle.

- Estudo para a implementação de outras configurações de controladores avançados, como por exemplo, o *fuzzy*-PID, possibilitando a comparação com o desempenho obtido a partir da utilização do controlador *fuzzy*-PI utilizado neste trabalho.

- Comparação da eficiência entre controladores *fuzzy*, utilizando diferentes métodos de inferência (Takagi-Sugeno e Mandani) e a verificação experimental da influência do tipo de função de pertinência no desempenho global do sistema.

- Implementação de controladores avançados utilizando a metodologia de sintonia proposta por Li (1997), que tem como princípio utilizar os parâmetros dos controladores convencionais bem sintonizados para auxiliar na sintonia dos controladores *fuzzy*.

- Projeto de controladores *neuro-fuzzy*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÚJAR, J. M; BRAVO, J. M. Multivariable fuzzy control applied to the physical-chemical treatment facility of a cellulose factory. **Fuzzy Set and Systems**, 150 : 475-492, 2005.

BALDINI, V. L. S., IADEROZA, M., FERREIRA, E. A. H., SALES, A. M., DRAETTA, I. S., GIACOMELLI, E. J. **Ocorrência da bromelina em espécies e cultivares de abacaxizeiro**. Coletânea do ITAL, 23 : 44-55, 1993.

BARROS NETO, B. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 2. Ed. Editora Unicamp, Campinas, 2003. 401p.

BEAN, S. R.; IOERGER, B. P.; PARK, S. H., SINGH, H. "Interaction between sorghum protein extraction and precipitation conditions on yield, purity, and composition of purified protein fractions". **Cereal Chemistry** 83 (1): 99-107, Jan-feb 2006.

BERTO, M. I. **Avaliação experimental do controle de pasteurização contínua de um fluido modelo de suco de laranja.** 271 p. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp, Campinas, 2004.

BRADFORD, M. M. "A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding." **Analytical Biochemistry,** 72(1):248-254, 1976.

CAMPOS, A. M. 1993, In: GRANADA, G.G, ZAMBIAZI, R.C, MENDONÇA, C.R.B. Abacaxi: Produção, Mercado e Subprodutos. **B. CEPPA,** 22 (2): 405-422, Jul-Dez 2004.

CAMPESE, G.M. **Extração e Recuperação da Bromelina em Sistemas de Duas Fases Aquosas PEG4000 – POLICAJU**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 2004.

CESAR, A. C. W. **Análise da viabilidade econômica de um processo de extração e purificação da bromelina do abacaxi**. 111f. Dissertação de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP,Campinas, 2005.

CESAR, A. C. W.; SILVA, R; LUCARINI, A. C. **Recuperação de enzimas proteolíticas presentes na casca e talo do abacaxi.** RIC, 01, 47-54, São Carlos, 1999.

CUNHA, A. M. **Lógica Nebulosa**. ITA. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, sem data. Disponível em: http://www.ele.ita.br/õmarmai/fuzzy.htm. Acessado em: 09 de agosto de 2006.

COX, E. **Fuzzy Logic for Business and Industry**. Rockland: Charles River Media, Inc. 1995.

FERNANDES JUNIOR, 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. **VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.** São Luís, setembro de 2005.

FERREIRA, A. L. G.; PARANHOS, J. P. S. **Controle em tempo real por lógica fuzzy**. 100 f.. Projeto Final (Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica) - Faculdade de Engenharia de Resende, Resende-RJ, 2004.

FILETI, A. M. F.; PEREIRA FILHO, R. D.; PEREIRA, J. A. F. R. The development and experimental testing of a fuzzy control system for batch distillation. **Brazil journal Chemical Engineering**. v. 19, n. 1, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322002000100001&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 19 Out 2006.

FREIMAN, L. O.; SABAA SRUR, A. U. O. Determination of total protein and aminoacid composition of bromelain extracted from pineapple plant residues (Ananas comosus, (L.) Merril). **Ciência e Tecnologia de Alimentos.** , Campinas, v. 19, n. 2, 1999. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20611999000200002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 07 set 2006.

FURIGO JUNIOR, A. PEREIRA, E. B. **Apostila sobre Enzimas e suas aplicações cinética enzimática**. 2001. Acesso em 28 de Novembro de 2006. Disponível em www.enq.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/lista_exerc/cinetica_enzimatica.pdf.

GRANADA, G. G.; ZAMBIAZI, R. C.; MENDONÇA, C. R. B. Abacaxi: produção, mercado e subprodutos. **B.CEPPA**, 22 (2): 405-422, 2004.

GSI. Grupo de Sistemas Inteligentes. DIN-UEM. **Controle Inteligente. Características da Lógica Difusa.** UEM. Universidade Estadual de Maringá. Paraná, 2004. Disponível em: http://www.din.uem.br/ia/controle/fuz_cara.htm. Acessado em: 18 de setembro de 2006.

_____. **Vantagens e Perspectivas**. UEM. Universidade Estadual de Maringá. Paraná, 2004. Acessado em: 13 de setembro de 2006. Disponível em: http://www.din.uem.br/ia/controle/fuz_vant_perspec.htm.

HALE L.P., GREER P.K., TRINH C. T., JAMES C.L. Proteinase activity and stability of natural bromelain preparations. **International Immunopharmacology**, 5:783-793, 2005.

HIROYUKI, H. KOBAYAZHI, T. Fuzzy Control of Bioprocess**. Journal of Bioscience and Bioengineering**, 89, 401-408, 2000.

HORIUCHI, J.; KISHIMOTO, M. Application of Fuzzy Control to Industrial Bioprocess in Japan, **Fuzzy sets and Systems**, 128, 117-124, 2002.

KELLY, G. S. Bromelain: A literature review and discussion of its therapeutic applications. **Alternative Medicine Review**, 1(4): 243-257, 1996.

LI, H.-X. e GATLAND, H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, oct, 1996.

LI, X. H. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control. . **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part B**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

LUCARINI, A. C., KILIKIAN, B. V.; PESSOA JR, A. **Purificação de produtos biotecnológicos**. 2ª edição, Ed. Manole, São Paulo, 2005.

LIMA, F. S.; **Estratégia de escalonamento de controladores PID baseado em regras *Fuzzy* para redes industriais *foundation fielbus* usando blocos padrões**. 68 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica, UFRGN, Natal, 2004.

MATTOS, P.E.O, **Validação Clínica da Suplementação de Bromelina para Atletas**. Projeto de Pesquisa, Instituto de Farmacologia e Biologia Molecular, UNIFESP, São Paulo, 2005.

MAKIYAMA, P. A. **Modelagem e simulação de uma planta integrada HTST de suco de laranja natural com controles fuzzy e convencional**. 165f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, 2004.

MARTÍNEZ, G.; LÓPEZ, A.; ESNOZ, A.; VÍRSEDA, P.; IBARROLA, J. A new fuzzy control system for white wine fermentation. **Food Control,** 10: 175-180, 1999.

MURACHI, T. **Bromelain enzymes**. In: LORAND, L. Methods in Enzymology, v.XLV, p.475-85, New York, Academic Press, 1976.

RABELO, A.P.B; TAMBOURGUI, E.B, PESSOA-JR, A. Bromelain partitioning in two-phase aqueous systems containing PEO-PPO-PEO block copolymers. **J. Chromatografy B**, 807 (1): 61-687, 2004.

SANDRI, S.; CORRÊA, C. **Lógica Nebulosa**. INPE, 1999. Disponível em: http://www.ele.ita.br/cnrn/minicursos-5ern/log-neb.pdf. Acessado em: 07 ago. 2006.

SELLITTO, M. A. Inteligência Artificial: uma aplicação em uma indústria de processo contínuo. **Gestão & Produção**, 9 (3): 363-376, Dez. 2002.

SCOPES, R.K. **Protein Purification: principles and practice**. Springer Verlag, 1994, 329 p.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem. Fuzzy**. FAPESP, 1999.

SILVA, F. **Comparação do desempenho de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, controlado a diferentes modos de controle**. Dissertação de Doutorado. 238 p. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp, Campinas, 2003.

SILVA, M. A. S.; CECCOPIERI, A. M. G.; SANTANA, C. C. C.; VARELA, J. G. **Simulação de um controlador fuzzy no controle de qualidade de fabricação de garrafas PET**. Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), setembro 01-05, Recife, 2003.

SMAR, **Improving your process and profitability**. Disponível em http://www.smar.com/brasil2/fieldbus.asp, acessado em 13 de junho de 2007.

SMAR, **Como implementar projetos com fieldbus foundation**. Sertãozinho: 1998. V.1, 236p.

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

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control: an introduction to theory and practice.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1984. 696p.

STEYER, J. P.; ESTABEN, M; POLIT, M. Fuzzy control of an anaerobic digestion process for the treatment of an industrial wastewater. **IEEE, Fuzzy Systems**, 3 (1-5): 1245-1249, 1997.

TAUSSIG, S. J.; SZEKERCZES, J.; BATKIN, S. Inhibition of tumous Growth *in vitro* by bromelain, an extract of the pineapple plant (*Ananas comosus*). **Journal of Medicinal Plant research**, v. 6, p. 583-639, december,1985.

TRANSCHEIT, R. Sistemas Fuzzy, 6° SBAI – **Simpósio Brasileiro de Automação e Inteligente**, setembro, 2003.

VIEIRA, M.L.H. **Modelagem de um sistema de controle por lógica difusa empregado na secagem por atomização de produtos cerâmicos**.193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

ZADEH, L. A.; JAMSHIDI, M., TITLI, A. Applications of Fuzzy Logic: Towards High Machine Intelligence Quotient Systems. **Environmental and Intelligent Manufacturing Series,** Prentice Hall, 1997.

ZAIA, D. A. M; ZAIA, C. T. B. V.; LICHTIG, J. Determinação de proteínas totais via espectrofotometria: Vantagens e desvantagens dos métodos existentes. **Química Nova**, V.21, n.6. 1998.

ZELLNER M.; WINKLERW.; HAYDEN H.; DIESTINGER M.; ELIASENM.; GESSLBAUER B.; MILLERI.; CHANG M.; KUNGL A.;ROTH E.; OEHLER R. Quantitative validation of different protein precipitation methods in proteome analysis of blood platelets. **Eletrophoresis** (12): 2481-2489 Jun 2005.

APÊNDICE A

Esquemas de montagem do Painel de Comando para o Processo de Precipitação da Bromelina

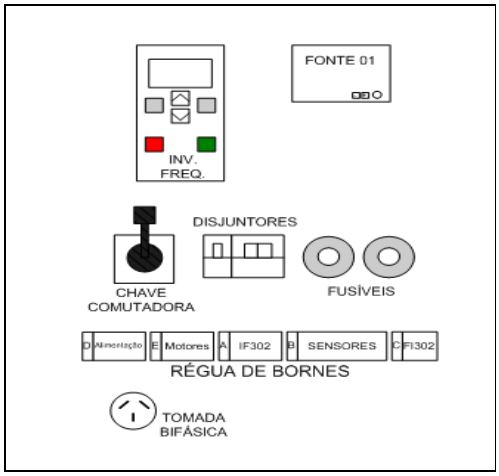


FIGURA A.1 - Visão geral do painel de comando.

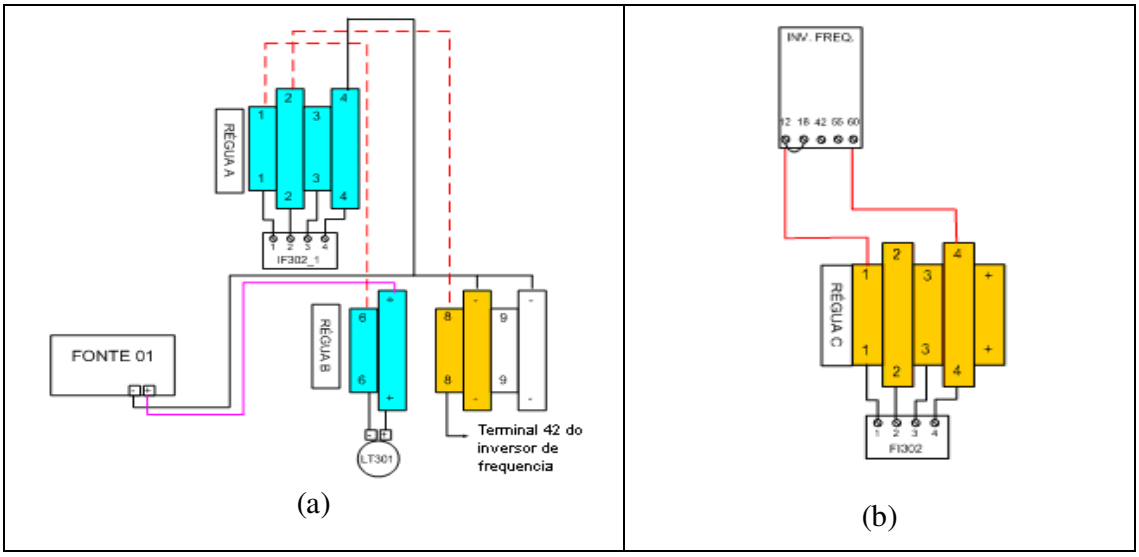


FIGURA A.2 - Ligação utilizada para os conversores corrente-*fieldbus* IF302 (a) e *fieldbus*-corrente FI302 (b).

APÊNDICE B

Configuração do software SYSCON

TABELA B.1 - Versões utilizadas para os instrumentos *fieldbus*

Versão do SYSTEM 302: **6.1.12** *Firmware* do DFI : **V3.9.3** *Firmware* das Devices: **V3.46F**				
Device Tag	***Device Type***	***Device Rev.***	***DD Rev.***	***CF Rev.***
DFI	DF51	7	4	1
TT302_1	TT 302	4	2	1
TT302_2	TT 302	4	2	1
FI302	FI 302	4	2	1
IF302	IF 302	4	2	1

TABELA B.2 - Configuração dos blocos funcionais do DFI

DFI02	FB VFD	*Resource block*		
		DFI-RB-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Transducer block 1		
		DFI-TRDIDSH-1	MODE_BLK PORT_ID	TARGET=Auto 2
		Hardware configuration transducer		
		DFI-HC-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Diagnostic Transducer		
		DFI-DIAG-1	MODE_BLK	TARGET=Auto

TABELA B.3 - Configuração dos blocos funcionais para o 1° transmissor de temperatura.

TT302_1	FB VFD	*Resource block*		
		TT302_1-RB-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Transducer block 1		
		TT302_1-BLK-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			SENSOR_TYPE	Pt 100 IEC
			SENSOR_TRANSDUCER_NUMBER:	1
		Transducer block 2		
		TT302_1-BLK-2	MODE_BLK	TARGET=Auto
			SENSOR_TYPE	Pt 100 IEC
			SENSOR_TRANSDUCER_NUMBER	2
		Dispaly block		
		TT302_1-TRDDSP-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			BLOCK_TAG_PARAM_1	TT301
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	T_ALC
			ACCESS_1	Monitoring
		TT302_1-TRDDSP-1	ALPHA_NUM_1	Mnemonic
			BLOCK_TAG_PARAM_2	TT302
			INDEX_RELATIVE_2	8
			MNEMONIC_2	T_TQ
			ACCESS_2	Monitoring
			ALPHA_NUM_2	Mnemonic
			DISPLAY_REFRESH	Update Display
		Diagnostic Transducer		
		TT302_1-DIAG-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Analog input 1		
		TT301	MODE_BLK	TARGET=Auto
			XD_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
			OUT_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
			STATUS_OPTS	Propogate Fail Fwd
			CHANNEL	1
			L_TYPE	Direct

...

TT302_1	FB VFD	*Analog input 2*		
		TT302	MODE_BLK	TARGET=Auto
			XD_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
			OUT_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
			STATUS_OPTS	Propogate Fail Fwd
			CHANNEL	2
			L_TYPE	Direct
		Signal characterizer		
		TT302_1-CHAR	MODE_BLK	TARGET=Auto
			X UNITS	°C
			Y UNITS	°C
			Curve X	Dados da calibração
			Curve Y	Dados de referência

TABELA B.4 - Configuração dos blocos funcionais para o 2° transmissor de temperatura.

TT302_2	FB VFD	*Resource block*		
		TT302_2-RB-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Transducer block 1		
		TT302_2-BLK-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			SENSOR_TYPE	Pt 100 IEC
			SENSOR_TRANSDUCER_NUMBER	1
		Transducer block 2		
		TT302_2-BLK-2	MODE_BLK	TARGET=Auto
			SENSOR_TYPE	Pt 100 IEC
			SENSOR_TRANSDUCER_NUMBER	2
		Dispaly block		
		TT302_2-TRDDSP-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			BLOCK_TAG_PARAM_1	TT303
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	T_SAI
			ACCESS_1	Monitoring
			ALPHA_NUM_1	Mnemonic
			BLOCK_TAG_PARAM_2	TT304
			INDEX_RELATIVE_2	8
			MNEMONIC_2	T_ENT
			ACCESS_2	Monitoring
			ALPHA_NUM_2	Mnemonic
			DISPLAY_REFRESH	Update Display

	Diagnostic Transducer		
	TT302_2-DIAG-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
	Analog input 1		
	TT303	MODE_BLK	TARGET=Auto
		XD_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
		OUT_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
		STATUS_OPTS	Propogate Fail Fwd
		CHANNEL	1
		L_TYPE	Direct
	Analog input 2		
	TT304	MODE_BLK	TARGET=Auto
		XD_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
		OUT_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
		STATUS_OPTS	Propogate Fail Fwd
		CHANNEL	2
		L_TYPE	Direct

TABELA B.5 - Configuração dos blocos funcionais para o conversor corrente-*fielbus*.

IF302_1	FB VFD	*Resource block*		
		IF302-RB-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Transducer block 1		
		IF302-BLK-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			TAG_DESC	LT301
			TERMINAL_NUMBER	1
		Transducer block 2		
		IF302-BLK-2	MODE_BLK	TARGET=Auto
			TAG_DESC	BA301
			TERMINAL_NUMBER	2
		Dispaly block		
		IF302-TRDDSP-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			BLOCK_TAG_PARAM_1	LT301
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	NIVEL
			ACCESS_1	Monitoring

IF302_1		ALPHA_NUM_1	Mnemonic
		BLOCK_TAG_PARAM_2	BA301
		INDEX_RELATIVE_2	8
		MNEMONIC_2	POTENCIA
		ACCESS_2	Monitoring
		ALPHA_NUM_2	Mnemonic
		DISPLAY REFRESH	Update Display
	Diagnostic Transducer		
	TT302_1-DIAG-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
	Analog input 1		
	LT301	MODE_BLK	TARGET=Auto
		XD_SCALE	EU_100=20 EU_0=4 UNITS_INDEX=mA
		OUT_SCALE	EU_100=100 EU_0=0 UNITS_INDEX=%
		STATUS_OPTS	Uncertain as Good
		CHANNEL	1
		L_TYPE	Indirect
	Analog input 2		
	BA301	MODE_BLK	TARGET=Auto
		XD_SCALE	EU_100=20 EU_0=4 UNITS_INDEX=mA
		OUT_SCALE	EU_100=750 EU_0=0 UNITS_INDEX=W
		STATUS_OPTS	Uncertain as Good
		CHANNEL	2
		L_TYPE	Indirect

TABELA B.6 - Configuração dos blocos funcionais para o conversor *fieldbus*-corrente.

FI302	FB VFD	*Resource block*		
		FI302-RB-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		Transducer block 1		
		FI302-BLK-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
			TERMINAL_NUMBER	1
		Transducer block 2		
		FI302-BLK-2	MODE_BLK	TARGET=Auto
			TERMINAL_NUMBER	2

	Dispaly block		
	FI302-TRDDSP-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		BLOCK_TAG_PARAM_1	INV_FREQ
		INDEX_RELATIVE_1	7
		MNEMONIC_1	%
		ACCESS_1	Monitoring
		ALPHA_NUM_1	Mnemonic
		DISPLAY_REFRESH	Update Display
	Diagnostic Transducer		
	TT302_1-DIAG-1	MODE_BLK	TARGET=Auto
	Analog output 1		
	INV_FREQ	MODE_BLK	TARGET=Cas_Auto
		PV_SCALE	EU_100=100 EU_0=0 UNITS_INDEX=%
		XD_SCALE	EU_100=20 EU_0=4 UNITS_INDEX=mA
		STATUS_OPTS	Propogate Fail Bkwd
		CHANNEL	1
		SHED_OPT	NormalShed_NoReturn
	PID control		
	FI302PID	MODE_BLK	TARGET=Auto
		PV_SCALE	EU_100=50 EU_0=-20 UNITS_INDEX=°C
		OUT_SCALE	EU_100=100 EU_0=0 UNITS_INDEX=%
		CONTROL_OPTS	Direct Acting
		STATUS_OPTS	IFS if Bad IN: Uncertain as Good
		BYPASS	Off
		GAIN (Kc)	1
		RESET (ti)	1
		RATE (td)	1
		SHED_OPT	NormalShed_NoReturn
	Input Selector (ISEL)		
	SELETOR1	MODE_BLK	TARGET=Auto
		SELECT_TYPE	Min
	Constant		
	CONSTANT	MODE_BLK	TARGET=Auto
		CT_VAL_D1	0
		CT_VAL_D2	1

APÊNDICE C

Curvas Obtidas no Planejamento Experimental

Foram selecionadas algumas curvas obtidas no planejamento experimental, onde a análise de tais curvas auxiliou na escolha das condições iniciais dos ensaios de precipitação, tendo como objetivo condições que fornecessem maior desafio ao controlador, propiciando maior variação de temperatura no processo (ΔT, °C) com um menor tempo de resposta (TR, s). Na Tabela B.1 estão indicadas as condições utilizadas para os ensaios representados pelas curvas A, B e C, conforme Figura C.1.

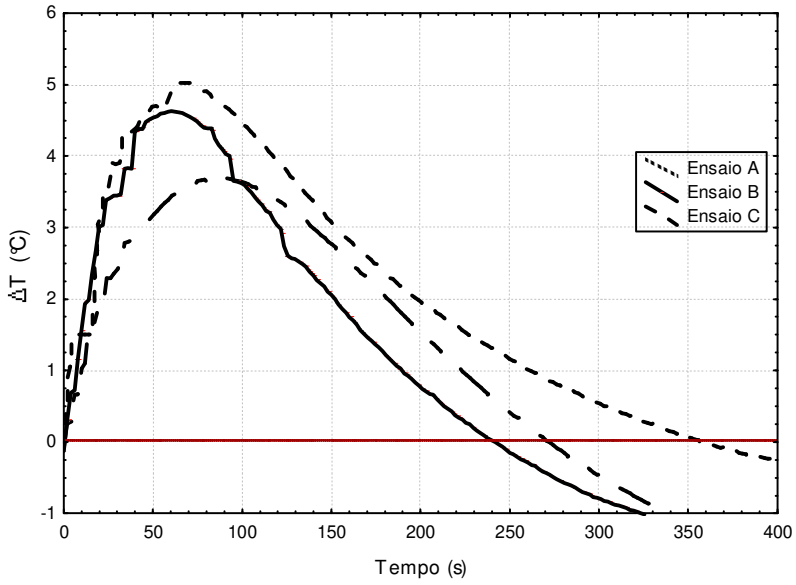


FIGURA C.1 - Curvas do planejamento experimental que auxiliaram na escolha das condições iniciais para uso de controladores do processo de precipitação.

TABELA C.1 - Condições dos ensaios A, B e C do planejamento experimental.

ENSAIO	VE	VB	TE	VE (mL/s)	VB (%)	TE (°C)	ΔT (°C)	TR (s)
A	+	+	+	0,60	45	2	5,0	354
B	+	0	0	0,60	40	0	4,6	236
C	-	-	0	0,34	35	0	3,7	273

Dentre os ensaios apresentados na Figura C.1, pode-se perceber que as condições utilizadas para o ensaio representado pela curva A proporcionaram maior variação de temperatura, no entanto apresentou um maior tempo de resposta. As condições utilizadas para o ensaio C proporcionaram efeitos indesejados para a escolha das condições iniciais do processo, proporcionando menores variações de temperatura e ainda um tempo de resposta elevado, quando comparado com a curva obtida para o ensaio B.

As condições adotadas para o ensaio B proporcionaram variação de temperatura no tanque de precipitação (ΔT) e tempo de resposta (TR) satisfatórios, e sendo assim, estas condições foram adotadas como referência para perturbações posteriores no processo de precipitação.

APÊNDICE D

Curvas de Calibração dos Sensores de Temperatura

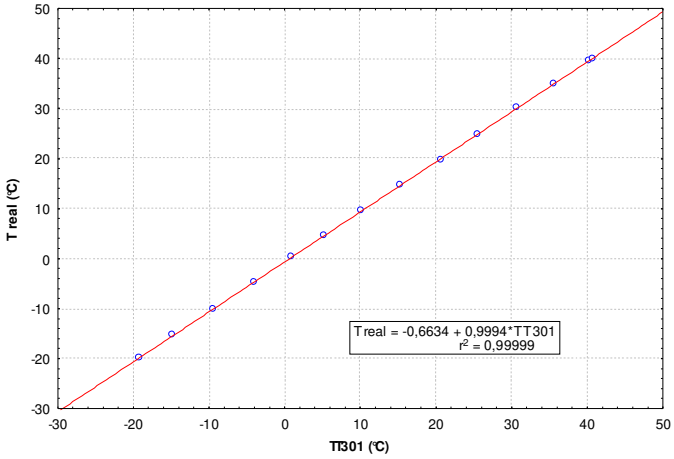


FIGURA D.1 - Curva de calibração do sensor TT301.

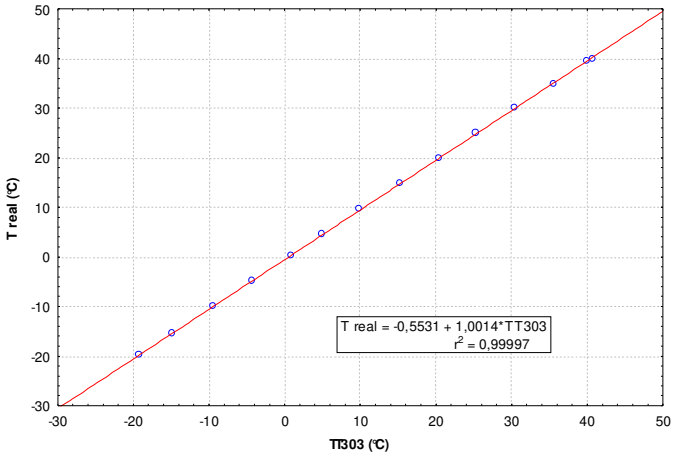


FIGURA D.2 - Curva de calibração do sensor TT303.

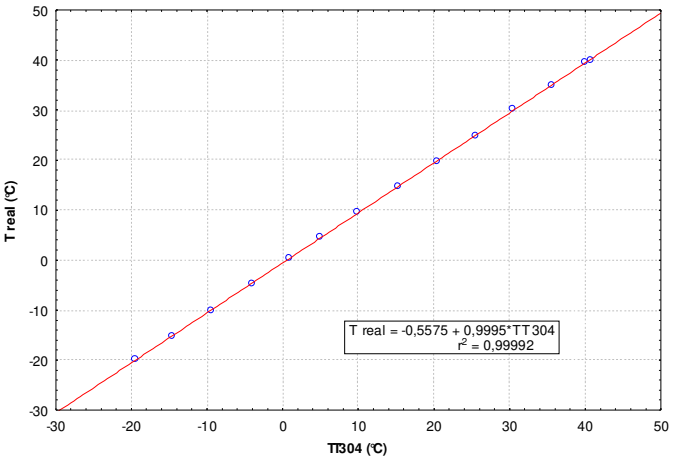
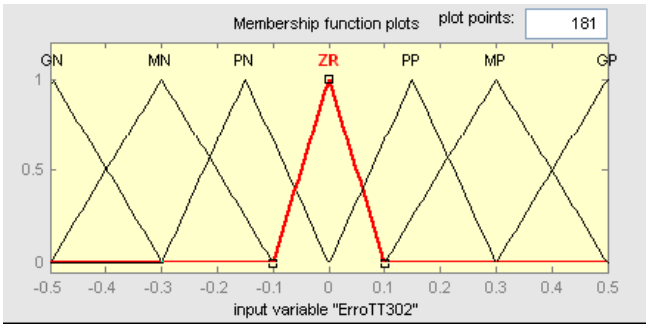


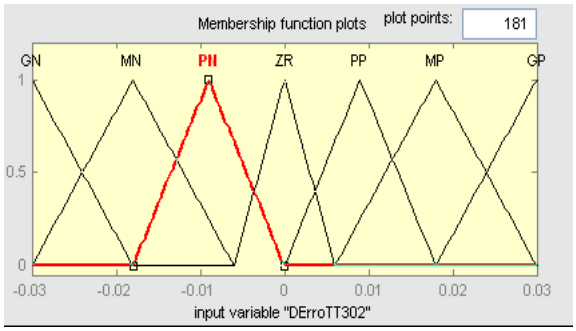
FIGURA D.3 - Curva de calibração do sensor TT304.

APÊNDICE E

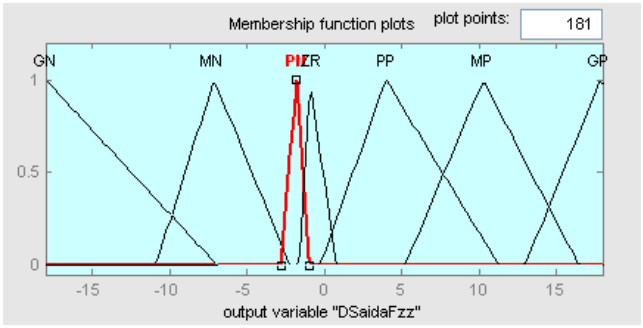
Funções de Pertinências e Matriz da Base de Regras das Variáveis de Entrada e Saída do Processo



(a)

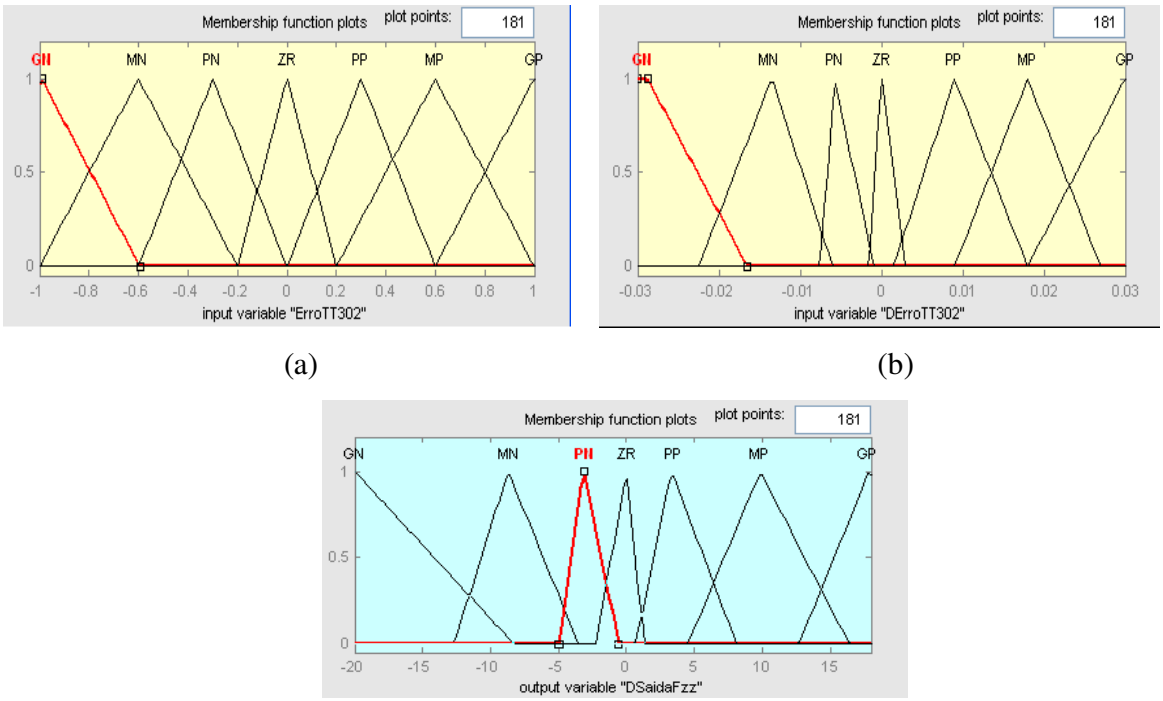


(b)



(c)

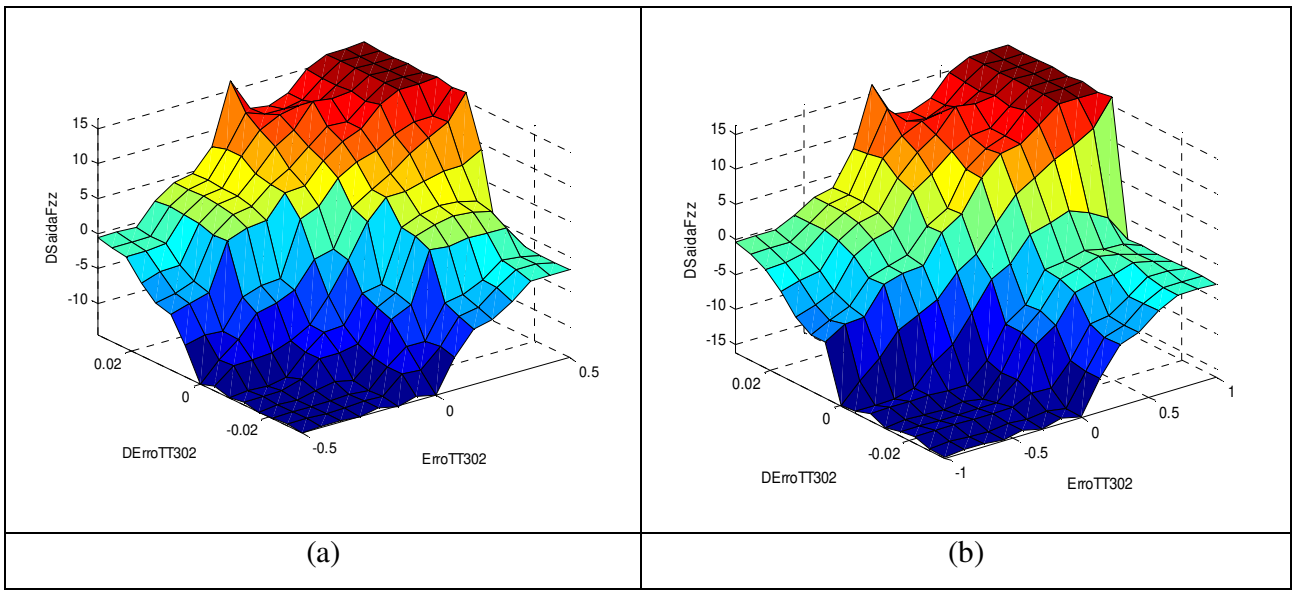
FIGURA E.1 - Funções de pertinência *fuzzy* para variáveis de entrada (a) ErroTT302 e (b) DErroTT302 e variável de saída (c) DSaidaFzz utilizando parâmetros da Sintonia 1.



(a) (b)

(c)

FIGURA E.2- Funções de pertinência *fuzzy* para variáveis de entrada (a) ErroTT302 e (b) DErroTT302 e variável de saída (c) DSaidaFzz utilizando parâmetros da Sintonia 2.



(a) (b)

FIGURA E.3 - Superfícies de resposta dos controladores *fuzzy*-PI utilizando (a) parâmetros da Sintonia 2 e (b) parâmetros da Sintonia 3.

TABELA E.1 - Matriz de base de regras para parâmetros do controlador *fuzzy* P1.

DE / E	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
GP	**PN**	**PN**	***ZR***	GP	GP	GP	GP
MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	**MP**
ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	**PP**
MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	**ZR**
GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR

A matriz de base de regras para controlador *fuzzy* com parâmetros da Sintonia 2 é a mesma aplicada ao controlador com parâmetros da Sintonia 3.

APÊNDICE F

Configuração para Comunicação entre o Supervisório e Instrumentos *Fieldbus*

F.1 - Comunicação com Smar.DFIOleServer

Os sistemas supervisórios comunicam-se com o software SYSCON via OPC, sendo assim possibilitada a comunicação com os instrumentos da planta. Para isso é necessário atribuir aos *tags* da tela de supervisão os valores correspondentes a comunicação com os instrumentos da planta.

TT301 ← TT301.PV.VALUE
TT302 ← TT302.PV.VALUE
TT303 ← TT303.PV.VALUE
TT304 ← TT304.PV.VALUE
LT 301← LT301.PV.VALUE
BA301 ← INV.FREQ.PV.VALUE
PID_OUT ← FI302PID.OUT.VALUE
SP ← FI302PID.SP.VALUE
Kc ← FI302PID.GAIN
τ_d ← FI302PID.RESET
τ_d ← FI302PID.RATE
StatusPID ← FI302PID.MODE_BLK.TARGET

F.2 - Correção da leitura dos instrumentos

Para a correção da leitura no supervisório dos reais valores de temperatura, foram atribuídas aos sensores as equações obtidas após a etapa da calibração.

TT301c = 0.9994*TT301-0.6634

TT302c = 1.0015*TT302-1.0836

TT303c = 1.0014*TT303-0.5531

TT304c = 0.9995*TT304-0.5575

F.3 - Contagem de tempo de processo para controladores PID

tempo = if ((ligaPI),tempo+1)

tempo = if ((ligaPID),tempo+1)

tempo = if ((statusPID=16),0)

tempo = if ((statusPID=8),tempo+1)

F.4 - Script para atuação de controlador avançado *fuzzy* no SYSCON

Foram efetuadas as devidas atribuições as variáveis criadas (*tags*) para monitoramento das variáveis de entrada e saída do controlador *fuzzy* através do sistema supervisório.

ErroTT302 = TT302c – SP

Erro1 = ErroTT302

DErro = Erro1 – Erro2

Erro2 = Erro1

Para o controlador avançado *Fuzzy*-PI :

tempo = if ((ligaPI), tempo+1)

Equação = "equação obtida pelo *Table-curve* que representa a superfície de resposta do controle *fuzzy* - PI"

DsaidaFzz = Equação

PID_OUT = if ((ligaPI), PID_OUT + DsaidaFzz)

ANEXO A

Determinação das Proteínas Totais (BRADFORD, 1976)

A.1 - Preparação do Reagente de Bradford

Foram dissolvidos 0,1 g do corante Coomassie Brilliante Blue G-250 em 50 mL de etanol 95 % (47,73 mL de etanol 99,5 % + 2,26mL de água). Esta solução foi agitada e 100 mL de ácido fosfórico 85 % foram adicionados. Após agitar a solução por 2 horas completou-se o volume para1 L com água deionizada. A solução ficou em agitação por 6 horas. Em seguida, a solução foi filtrada e a armazenada em um frasco coberto com papel alumínio para evitar que o corante *Coomassie blue* reagisse com a luz.

A.2- Construção da Curva-padrão para Determinação de Proteínas Totais

Foram preparadas soluções de BSA (Soro de Albumina Bovino) com as seguintes concentrações: 0,10 mg/mL; 0,20 mg/mL; 0,40 mg/mL; 0,60 mg/mL; 0,80 mg/mL; 1,00 mg/mL. As amostras foram preparadas em triplicata. Foram transferidos 60 uL de cada solução (a diferentes concentrações) para novos *eppendorfs*, e adicionou-se 3 mL de reagente Bradford. Cada *eppendorf* foi agitado durante 5 segundos e foram colocados em repouso por 10 minutos para que a reação ocorresse. Em seguida, as amostras foram transferidas par acubetas plásticas e foram feitas as leituras em espectrofotômetro,para um comprimento de onda de 595 nm.

A.3 - Determinação de Proteínas Totais

Foram transferidos 300 uL de cada solução (a diferentes concentrações) para novos *eppendorfs*, e adicionou-se 3 mL de reagente Bradford. Cada *eppendorf* foi agitado durante 5 segundos e foram colocados em repouso por 10 minutos para que a reação ocorresse. Em seguida, as amostras foram transferidas para cubetas plásticas e foram feitas as leituras em espectrofotômetro, para um comprimento de onda de 595 nm.

ANEXO B

Determinação da Atividade Enzimática

B.1 - Preparação do reagente Biureto

Foram dissolvidos 1,5 g de sulfato de cobre pentaidratado e 6,0 g de tartarato de sódio e potássio em 500 mL de água destilada . Em seguida, adicionou-se 300 mL de solução de hidróxido de sódio a 10% com agitação constante. Adicionou-se água destilada suficiente para 1 Litro de solução.

B.1- Método para Determinação da Atividade Enzimática

A atividade enzimática da enzima bromelina foi medida usando solução de BSA com concentração de 5 g/L. O precipitado, após centrifugação, foi dissolvido em tampão fosfato 0,1 M (pH 7,0) e 1 mL dessa amostra contendo a enzima foi inoculado num tubo contendo 5 mL de BSA, estando este na temperatura de reação. O tubo foi agitado em agitador magnético e foram retiradas três amostras iguais do tubo contendo BSA e colocadas em outros três tubos de ensaios diferentes, para que o ensaio fosse feito em triplicata.

Em cada um dos três tubos adicionou-se 5 mL de solução de biureto e foi iniciada a contagem de 10 minutos para proporcionar a reação completa da enzima com o reagente de biureto. Transcorrido este tempo foram retiradas mais três amostras do tubo contendo

BSA, à temperatura de 5 °C, e coletadas em outros três tubos, e em seguida foram adicionados 5 mL de biureto.

O tempo ‘0’, constitui-se das amostras às quais foram adicionadas o biureto logo após a inoculação da enzima, e o tempo ‘10’, constitui-se das amostras em que somente se iniciou a reação com o biureto após 10 minutos de reação na temperatura desejada para a reação.

Leituras das amostras foram feitas no espectrofotômetro após o tempo mínimo de 10 minutos da adição do reagente biureto, garantindo assim que a reação fosse completa. Foram feitas três leituras de cada uma das amostras, totalizando 9 leituras para as amostras do tempo 0 e 9 leituras para as amostras do tempo 10, para cada condição de precipitação utilizada.

De acordo com este método, uma unidade (U) de atividade enzimática corresponde à quantidade de enzima capaz de variar em uma unidade a leitura de absorbância a 540 nm, durante 10 min a 37 °C.