

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Desenvolvimento de Controladores Inteligentes para o Sistema VASPS

Autor: André Veras de Melo

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo P. Mendes

Campinas, Novembro de 2008

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

M491d Melo, André Veras de
 Desenvolvimento de Controladores Inteligentes para
 o Sistema VASPS / André Veras de Melo. --Campinas,
 SP: [s.n.], 2008.

 Orientador: José Ricardo P. Mendes.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e
 Instituto de Geociências.

 1. Submarinos. 2. Sistemas inteligentes de controle.
 I. Mendes, José Ricardo P. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e
 Instituto de Geociências. III. Título.

Título em Inglês: Development of Intelligent Controllers for the VASPS System

Palavras-chave em Inglês: Submarine, Intelligent control systems

Área de concentração: Exploração de Petróleo

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora: Adriane Beatriz de Souza Serapião, Sérgio N. Bordalo, Valdir
Estevam

Data da defesa: 17/11/2008

Programa de Pós Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Desenvolvimento de Controladores Inteligentes para o Sistema VASPS

Autor: André Veras de Melo

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo P. Mendes



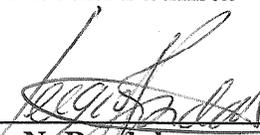
Prof. Dr. José Ricardo P. Mendes
Universidade Estadual de Campinas



Dr. Valdir Estevam
Petrobras



Profa. Dra. Adriane Beatriz de Souza Serapião
Universidade Estadual Paulista



Prof. Dr. Sergio N. Bordalo
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 17 de Novembro de 2008

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo suporte inquestionável, incondicional, tornando a busca pelo conhecimento não apenas possível como também prazerosa. Meu profundo reconhecimento à minha mãe que tanto chorou de saudade, ao meu pai que tanto batalhou dignamente, à minha querida avozinha que tanto rezou e espalhou a bondade no mundo dos homens e ao meu irmão caçula que me manteve ligado aos melhores momentos de minha vida, residentes em minha memória eternamente. Agradeço também à Raquel, indistinguível em sua força, pelo vasto suporte emocional, pela agradável companhia e pelas lições ímpares de determinação.

Saúdo a Prof.^a Adriane pelo trabalho em equipe e pelo esforço realizado no auxílio à minha formação científica. Agradeço ao Prof. José Ricardo pelas oportunidades e compreensão, bem como por ter representado um melhor profissional que qualquer outro no Programa.

Agradeço à ANP pelo suporte financeiro.

Agradeço a Deus pela bela vida que me deu.

Resumo

O cenário de produção em campos de petróleo tem apresentado nos anos recentes condições cada vez mais severas e complexas. Muitas descobertas em regiões de maior profundidade e com formações geológicas mais diversas tem demandado soluções tecnológicas que beiram a fronteira do conhecimento, de forma que a produção tem andado lado a lado com o desenvolvimento de novas tecnologias. Assim, a necessidade do aumento do fator de recuperação para justificar os investimentos nestas condições são desafios presentes nos novos projetos de poços, de elevação artificial e de recuperação secundária, o que vem levando ao desenvolvimento de soluções submarinas e integradas, como o caso do separador submarino VASPS. No entanto, o controle de processos contínuos, como a vazão de produção, a temperatura e a pressão, ainda é tratado da mesma forma que era feito quando do começo da produção *offshore* em campos de óleo leve.

Este trabalho visa permitir a melhoria de desempenho operacional do sistema VASPS, mensurada pelos custos totais gerados pelo sistema e pelos proventos gerados na produção de óleo e gás, bem como propor novas metodologias de sistemas de controle para sistemas similares, utilizando tecnologias recentes de controle inteligente. Vale ressaltar que o problema de controle é atualmente tratado em campo com soluções de automação, sem o estudo devido, causando danos a equipamentos que exigem intervenções custosas. Os controladores propostos neste trabalho visam minimizar os esforços aos quais estes atuadores estão expostos, provendo uma maior vida útil às tecnologias de elevação artificial de alta vazão e podendo ser aplicado de forma modular a outros processos relacionados.

Palavras Chave:

Minimização do esforço de controle, BCS, VASPS, *Fuzzy*, Lógica Nebulosa, Controle Inteligente, Controle Nebuloso, Produção Submarina, Separação Submarina.

Abstract

The oil production scenario has been becoming more and more complex and severe in the recent years. Plenty discoveries in deeper and more diversified formations have been requiring cutting edge technological solutions., such that the production has been deployed side by side with the technological development. Thus, the need for the enhancement of the recuperation factor in order to justify the investment in these new conditions are actual challenges within the recent design of wells, artificial lift systems and secondary recuperation projects, which has been leading to the development towards subsea integrated solutions, such as the VASPS subsea separator. However, the control of continuous processes, i.e. flow, temperature and pressure, is still dealt the same way it was done when the offshore production in light oil fields began.

This work envisions the enhancement of the operational performance of the VASPS system, measured as a function of the total costs implied by the technology, altogether with the receipts generated in the gas and oil production, as well as the delivering of new methodologies for the design of controllers using late technologies of intelligent control. Also, it is worth recalling that nowadays the control task is dealt with automation solutions, without the proper handling, causing failures in equipments that require expensive rig intervention for workover. The controllers proposed in this work are designed to minimize the control effort, to which these actuators are exposed, providing extended lifetime to the high level production artificial lift technologies, being also able to be applied to other related processes in a modular form.

Keywords:

Minimization of control effort, ESP, VASPS, Fuzzy, Intelligent Control, Fuzzy Control, Subsea Production, Subsea Separation.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Nomenclatura	xi
1 Introdução	1
1.1 Organização do Trabalho	2
2 Panorama Tecnológico	4
2.1 Sistemas de Produção <i>Offshore</i>	4
2.2 Sistema VASPS	7
3 Modelagem	12
3.1 Escoamento	12
3.1.1 Escoamento de entrada	12
3.1.2 Escoamento interno ao vaso	14
3.2 Elevação Artificial usando BCS	16
3.3 Equacionamento do Sistema VASPS	19
4 Fundamentos Teóricos	22
4.1 Introdução à Teoria de Conjuntos Nebulosos	22
4.1.1 Nebulização	23
4.1.2 Base de Regras do tipo Mamdani	28
4.1.3 Desnebulização para sistemas Mamdani	34
4.1.4 Sistemas do tipo Sugeno	37
4.2 Introdução à Teoria de Controle	38
4.2.1 Controle PID	43
4.2.2 Controle Nebuloso	44
5 Metodologia	47
5.1 Controle voltado ao Desempenho	47
5.1.1 Controle Híbrido Fuzzy-PID	48
5.2 Controle voltado à Minimização do Esforço	57
5.2.1 Monitoramento da Média Móvel	58
5.2.2 Classificador de Regiões	62
5.2.3 Classificador com Média	64
5.2.4 Histerese com Auto-ajuste	68
6 Resultados	73
6.1 Solução pelo Desempenho	73
6.1.1 Fuzzy-PID	73
6.2 Soluções pelo Esforço de Controle	76
6.2.1 Monitoramento da Média Móvel	76
6.2.2 Classificador por Regiões	79
6.2.3 Classificador com Média	81
6.2.4 Histerese com Auto-ajuste	84
6.2.5 Avaliação de resultados	92
7 Conclusões	95
Referências Bibliográficas	99
Apêndice A	103
Apêndice B	114
Apêndice C	129

Relação de Figuras

Figura 2.1: Representação da instalação do VASPS no sistema de produção (fora de escala).	7
Figura 2.2. Diagrama esquemático do sistema VASPS.	8
Figura 3.1. Modelo preliminar da vazão de entrada de líquido do Gerador de Golfadas (comunicação direta, Teixeira, 2006).	13
Figura 3.2. Comparativo entre o segundo e terceiro geradores de golfada.	14
Figura 3.3. Esquemático do escoamento das fases líquido e gás no VASPS.	15
Figura 3.4. Exemplo de curvas de bomba BCS para diferentes frequências de acionamento.	17
Figura 3.5. Curvas da bomba BCS do VASPS para diferentes frequências de acionamento (comunicação direta, Teixeira, 2006).	18
Figura 3.6. Modelo para a curva da bomba BCS (comunicação direta, Teixeira, 2006).	19
Figura 4.1 Sistema nebuloso genérico, adaptado de Riid (2002).	23
Figura 4.2. Exemplo de três possíveis funções de pertinência para o conjunto nebuloso <i>Baixo</i>	24
Figura 4.3. Representação da variável nebulosa <i>Nível da Piscina</i>	25
Figura 4.4. Representação da variável nebulosa <i>Variação do Nível da Piscina</i>	26
Figura 4.5. <i>Nebulização</i> da variável de entrada <i>Nível da Piscina</i>	27
Figura 4.6. <i>Nebulização</i> da variável de entrada <i>Variação do Nível da Piscina</i>	27
Figura 4.7. Representação da variável de saída ativada pelas entradas exemplificadas.	30
Figura 4.8. Representação da aplicação da Base de Regras para uma entrada dada.	31
Figura 4.9. Processo de conversão de variáveis exemplo do VASPS para o domínio nebuloso. ...	34
Figura 4.10. Técnicas de desnebulização aplicadas ao exemplo, com o valor de saída destacado.	36
Figura 4.11. Representação de um sistema em malha aberta.	38
Figura 4.12. Diagrama de blocos para um sistema em malha fechada.	39
Figura 4.13. Diagrama de blocos com o detalhamento da planta do sistema VASPS.	42
Figura 4.14. Sinal de resposta com o destaque dos parâmetros de desempenho.	42
Figura 4.15. Diagrama esquemático de controle PID convencional.	43
Figura 4.16. Processo controlador por sistema nebuloso com entradas Erro e Derivada do Erro.	45
Figura 4.17. Exemplo de aplicação de sistema com controle nebuloso.	46
Figura 5.1. Diagrama de Blocos do Controlador PID.	49
Figura 5.2. Diagrama de blocos do controlador Supervisório, adaptado de Van Nauta Lemke e De-Zhao (1985).	50
Figura 5.3. Detalhamento do controlador FPID do Modelo Supervisório.	51
Figura 5.4. Diagrama de blocos do controlador FPID.	51
Figura 5.4. Conjuntos nebulosos para o controlador FPID.	53
Figura 5.6. Comportamento desejado para o sistema voltado à redução do esforço de controle.	58
Figura 5.7. Diagrama de blocos para o controlador Média Móvel aplicado ao VASPS.	59
Figura 5.8. Funções de pertinência para o controlador Média Móvel aplicado ao VASPS.	60
Figura 5.6. Ilustração da função utilizada pelo Classificador.	62
Figura 5.10. Diagrama de blocos para o controlador Classificador de Regiões aplicado ao VASPS.	63
Figura 5.6. Conjuntos nebulosos de entrada para o Classificador de Regiões.	63

Figura 5.12. Diagrama de blocos para o controlador Classificador com Média.....	65
Figura 5.13. Funções de pertinência para o controlador Classificador com Média.....	66
Figura 5.14. Detalhamento do filtro de sinal aplicado entre o controlador e o atuador.....	67
Figura 5.15. Diagrama de blocos do controlador Histerese com Auto-ajuste.....	68
Figura 5.16. Esquemático ilustrativo do comportamento da histerese.....	70
Figura 5.17. Diagrama esquemático do controlador Histerese com Auto-ajuste.....	72
Figura 6.1. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PID e o FPID.....	74
Figura 6.2. Sinal de controle e comportamento das constantes entre o PID e o FPID.....	75
Figura 6.3. Curvas de resposta para o controlador Média Móvel, com nível inicial em 30 metros.	78
Figura 6.4. Curvas de resposta para o controlador Média Móvel, com nível inicial em 60 metros.	79
Figura 6.5. Resposta para o Classificador por Regiões para o nível inicial de 30 metros.	80
Figura 6.6. Resposta para o Classificador por Regiões para o nível inicial de 60 metros.	81
Figura 6.7. Resposta e Sinal de Controle para controlador Classificador com Média, com referência constante.....	82
Figura 6.8. Resposta e Sinal de Controle para controlador Classificador com Média, com referência variável.....	83
Figura 6.9. Resposta e Sinal de Controle para controlador Classificador com Média, com o último gerador de golfadas, de frequência e amplitude variáveis.	84
Figura 6.10. Esquemático da histerese adaptado para o caso VASPS.....	85
Figura 6.11. Resposta para o controlador Histerese com Auto-ajuste, com referência constante. 86	
Figura 6.12. Resposta para o controlador Histerese com Auto-ajuste, com referência variável. ..87	
Figura 6.13. Simulação 3, teste de u_z , apresentando as curvas 3.1 e 3.2.	89
Figura 6.14. Curvas para as simulações de teste do mecanismo de auto-ajuste.	91
Figura A.1. Diagrama de Blocos do Controlador PI.....	104
Figura A.2. Diagrama de Blocos do Controlador PI com derivada.	104
Figura A.3. Diagrama de Blocos do Controlador PD.	105
Figura A.4. Diagrama de blocos do controlador FPID.	105
Figura A.5. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPID. a) Variáveis de entrada (x, ix, cx). b) Variação da constante K_P , ΔP . c) Variação das constantes K_I e K_D , ΔI e ΔD	106
Figura A.6. Diagrama de blocos do controlador FPI.....	106
Figura A.7. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPI. a) Erro relativo, x. b) Integral relativa do erro, ix.. c) Variação da constante K_P , ΔP . d) Variação da constante K_I , ΔI	107
Figura A.8. Diagrama de blocos do controlador FPI com derivada.....	107
Figura A.9. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPID. a) Variáveis de entrada (x, ix, cx). b) Variação da constante K_P , ΔP . c) Variação da constante K_I , ΔI	108
Figura A.10. Diagrama de blocos do controlador FPD.....	108
Figura A.11. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPD. a) Variáveis de entrada (x, ix, cx). b) Variação da constante K_P , ΔP . c) Variação da constante K_D , ΔD	109
Figura A.12. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PID e o FPID.....	110
Figura A.13. Sinal de controle e comportamento das constantes entre o PID e o FPID.....	111
Figura A.14. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PD e o FPD.	112
Figura A.15. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PI com derivada e o FPI com derivada.....	113

Figura A.16. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PI e o FPI.	113
Figura B.1. Sinal do Gerador de Golfadas para o tempo de 20000 segundos.....	115
Figura B.2. Simulação A, teste de n , apresentando as curvas A11 e A12.	118
Figura B.3. Simulação A, teste de n , apresentando as curvas A21 e A22.	118
Figura B.4. Simulação B, teste de f , apresentando as curvas B1, B2 e B3.	119
Figura B.5. Simulação C, teste de h , apresentando as curvas C1, C2 e C3.	120
Figura B.6. Simulação 1, teste de h , apresentando a curva 1.1.	122
Figura B.7. Simulação 1, teste de h , apresentando a curva 1.2.	123
Figura B.8. Simulação 1, teste de h , apresentando a curva 1.3.	124
Figura B.9. Simulação 2, teste de f , apresentando as curvas 2.1 e 2.2.	125
Figura B.10. Simulação 3, teste de f , apresentando as curvas 3.1 e 3.2.	126
Figura C.1. Planta do controle de nível. No bloco do controle de nível, Planta Nível, fica a equação da variação do nível, Equação (3.4). No bloco da bomba, fica sua curva, Equação (3.1). No bloco de vazão de entrada, Qoe, fica o gerador de golfadas.	130
Figura C.2. Primeiro gerador de golfadas.	130
Figura C.3. Segundo gerador de golfadas – amplitude variável.	130
Figura C.4. Componente do segundo e terceiro gerador de golfadas – sinal em onda para gerar amplitude variável.	130
Figura C.5. Terceiro gerador de golfadas – amplitude e frequência variáveis. Detalhe do gerador de sinais para teste do mecanismo de auto-ajuste.	131
Figura C.6. Malha de controle do controlador <i>Fuzzy</i> PID supervisor.	131
Figura C.7. Controlador <i>Fuzzy</i> PID Supervisor.	131
Figura C.8. Malha de controle do controlador Monitoramento da Média Móvel.	132
Figura C.9. Malha de controle do controlador Classificador por Regiões.	132
Figura C.10. Controlador Classificador por Regiões.	132
Figura C.11. Malha de controle do controlador Histerese com Auto-ajuste. Detalhe dos geradores de sinal de referência.	133
Figura C.12. Controlador Histerese com auto-ajuste. Detalhes do classificador, da histerese, da parametrização da rotação de transição e dos filtros de saída.	133
Figura C.13. Componente do controlador Histerese com Auto-ajuste – parametrização da rotação de transição.	133
Figura C.14. Componente do controlador Histerese com Auto-ajuste – mecanismo de auto-ajuste.	134
Figura C.15. Componente do mecanismo de auto-ajuste – monitoramento da média móvel do sinal de controle.	134

Relação de Tabelas

Tabela 4.1. Aplicação da Base de Regras a uma entrada ativa.	30
Tabela 4.2. Implementações mais comuns de operadores lógicos E e OU.	32
Tabela 4.3. Aplicação da Base de Regras usando entradas associativas.	33
Tabela 4.4. Aplicação da Base de Regras Sugeno.	38
Tabela 5.1. Representação dos conjuntos nebulosos para a base de regras.	56
Tabela 5.2. Base de regras do controlador supervisor FPID.	56
Tabela 5.3. Base de regras do controlador supervisor FPID.	57
Tabela 5.4. Base de regras do controlador Monitoramento da Média Móvel.	61
Tabela 5.3. Aplicação da Base de Regras usando entradas associativas.	61
Tabela 5.6. Base de regras do controlador Classificador por Regiões.	64
Tabela 5.7. Base de regras do controlador Classificador com Média adaptado ao VASPS.	66
Tabela 6.1. Planejamento dos experimentos computacionais para verificação da relação entre parâmetros, sinal de controle e resposta do sistema.	88
Tabela 6.2. Comparação dos controladores voltados à minimização do esforço.	93
Tabela A.1. Base de regras do controlador supervisor FPID.	106
Tabela A.2. Base de regras do controlador supervisor FPI.	107
Tabela A.3. Base de regras do controlador supervisor FPI com derivada.	108
Tabela A.4. Base de regras do controlador supervisor FPD.	109
Tabela B.1. Planejamento dos experimentos computacionais para verificação da relação entre parâmetros, sinal de controle e resposta do sistema.	116
Tabela B.2. Explicação dos parâmetros de simulação.	117

Nomenclatura

Letras Latinas

ce mudança no erro

$ce(T)$ mudança no erro discretizada

cx mudança relativa normalizada do erro

$cx(T)$ mudança relativa normalizada do erro discretizado

d_e diâmetro externo da piscina na região interna ao VASPS.

d_i diâmetro interno da piscina na região interna ao VASPS.

D_0 Constante Derivativa Inicial, em uso no controlador PID

D_f Variação percentual a ser impressa na constante derivativa

$e(t)$ ou e sinal de erro

$e(T)$ sinal de erro discretizado

$\bar{e}(t)$ ou \bar{e} sinal de erro médio

f frequência de acionamento da bomba BCS

f_s função de saturação

f_{LR} função de limitação de rampa

f_Q função de quantização

h nível de líquido

H_r Profundidade do reservatório na formação até a superfície

H_S Profundidade de referência da superfície

H_{wh} Profundidade da cabeça do poço no leito marinho até a superfície

H_{BCS} Profundidade da bomba BCS no poço falso até a superfície

ie integral do erro

$ie(T)$ integral do erro discretizada

ix integral relativa normalizada do erro

$ix(T)$ integral relativa normalizada do erro discretizado

I_0 Constante Integral Inicial, em uso no controlador PID

I_f Variação percentual a ser impressa na constante integral

K_p ou P Constante proporcional, ou ganho proporcional, do controlador PID

K_d ou D Constante derivativo, ou ganho derivativo, do controlador PID
 K_i ou I Constante integral, ou ganho integral, do controlador PID
 K_e Constante de ganho de entrada de erro do controlador supervisor Fuzzy-PID
 K_{ie} Constante de ganho de entrada da integral do erro do supervisor Fuzzy-PID
 K_{ce} Constante de ganho de entrada da mudança no erro do supervisor Fuzzy-PID
 n Número de pontos utilizados para realizar a média móvel de um sinal
 N_0 nível inicial da piscina do VASPS, durante a partida do sistema
 $P(s)$ Função de transferência qualquer de uma planta não-linear
 P_0 Constante Proporcional Inicial, em uso no controlador PID
 P_f Variação percentual a ser impressa na constante proporcional
 P_r Pressão estática do reservatório
 P_{in} Pressão de entrada do fluido multifásico no VASPS
 P_{out} Pressão de saída de líquido bombeado pelo BCS no VASPS
 \dot{Q}_{oe} vazão de entrada do VASPS, impressa pelo escoamento multifásico do poço
 \dot{Q}_{os} vazão de saída do VASPS, impressa pela bomba BCS
 $r(t)$ ou r sinal de referência, ou *setpoint*
 $r(T)$ sinal de referência, ou *setpoint*, discretizado
 s variável de Laplace
 $T_{reação}$ Tempo de reação
 T_{estab} Tempo de estabilização
 $u(t)$ ou u sinal de controle, ou esforço de controle
 $u(T)$ sinal de controle, ou esforço de controle discretizado
 $\bar{u}(t)$ ou \bar{u} sinal de controle médio
 u_{PB} valor constante do sinal de controle para operação no entorno do valor de pertinência positiva alta (*‘Positive Big’*) no controlador Histerese com Auto-Ajuste
 u_{PS} valor constante do sinal de controle para operação no entorno do valor de pertinência positiva baixa (*‘Positive Small’*) no controlador Histerese com Auto-Ajuste
 u_Z valor constante do sinal de controle para operação no entorno do valor de pertinência Zero no controlador Histerese com Auto-Ajuste
 u_{NS} valor constante do sinal de controle para operação no entorno do valor de pertinência negativa baixa (*‘Negative Small’*) no controlador Histerese com Auto-Ajuste

u_{NB} valor constante do sinal de controle para operação no entorno do valor de pertinência negativa alta ('*Negative Big*') no controlador Histerese com Auto-Ajuste

V_L Volume de Líquido

x erro relativo normalizado

$x(t)$ sinal de entrada do sistema

$x(T)$ erro relativo normalizado discretizado

$y(t)$ ou y sinal de saída do sistema

$y(T)$ sinal de saída do sistema discretizado

Letras Gregas

Δe derivada do erro

ΔD Variação na constante derivativa

ΔI Variação na constante integral

ΔP Variação na constante proporcional

ΔP_{BCS} Energia de pressão adicionada pela bomba BCS ao fluido bombeado

$\mu(t)$ sinal de pertinência atribuído para o erro como saída do Classificador

$\bar{\mu}(t)$ sinal de pertinência média

$\mu_A(x)$ função de pertinência do conjunto nebuloso A na variável x

$\mu_B(x)$ função de pertinência do conjunto nebuloso B na variável x

μ_1 e μ_2 valores de transição entre regiões de trabalho para a histerese de subida no controlador Histerese com Auto-Ajuste.

δ intervalo de histerese.

Siglas

BCS Bombeio Centrifugo Submerso

FT Função de Transferência

FPID Controlador supervisor Fuzzy PID

LI Limite Inferior de estabilidade para o nível de líquido no VASPS

LS Limite Superior de estabilidade para o nível de líquido no VASPS

PID Proporcional-Integral-Derivativo

PI Proporcional-Integral

PD Proporcional-Derivativo

rsl *rising slew rate*, inclinação da rampa de aceleração máxima do atuador

fsl *falling slew rate*, inclinação da rampa de desaceleração máxima do atuador

SP valor instantâneo do sinal de referência

VASPS *Vertical Annular Separation and Pumping System*

Capítulo 1

Introdução

O sistema de separação submarina vertical VASPS (*vertical annular separation and pumping system*), que permite separar ainda no leito marinho as fases líquida e gasosa do fluido produzido em poços de petróleo, foi introduzido com sucesso no Brasil, contribuindo com aumentos significativos de produção conforme reportado por do Vale *et al.* (2002). No entanto, a tecnologia de elevação artificial presente no sistema – uma bomba BCS – apresentou dificuldades operacionais em seu sistema de controle, conforme Peixoto *et al.* (2005), devido ao acionamento imposto na bomba, que encurtou sua vida útil.

Diferentemente da indústria de manufatura, onde processos em batelada são rigorosamente controlados para seguir uma dada trajetória, ou qualquer outro sinal de referência, os processos contínuos, como controle de vazão, temperatura ou pressão, não necessitam de acompanhamento tão próximo do sinal de referência, mas sim de minimizar o desgaste do atuador, maximizando sua vida útil através do tratamento do sinal de controle, devido ao alto custo que o atuador representa no processo. Em um sistema submarino como o VASPS, uma intervenção para manutenção da bomba BCS (*Bombeio Centrífuco Submerso*), conforme reportado por Peixoto *et al.* (2005), implica em elevados custos, que, caso não minimizados, podem inviabilizar a solução.

Neste contexto o objetivo deste trabalho é aplicar a Teoria de Controle à opção de elevação artificial de BCS usada no sistema VASPS, objetivando a viabilização da tecnologia e melhor gerenciando o comportamento do sistema. Com isso, obtém-se também uma ferramenta de previsão e simulação do sistema, resultado do uso do *software Simulink*[®], disponibilizado como parte integrante do *software Matlab*[®], que permite a construção de sistemas unidimensionais para a simulação de resultados baseados em uma modelagem voltada para sistemas de controle. Esta

ferramenta de simulação pode então ser usada para o planejamento da produção e mesmo o desenvolvimento de técnicas mais eficientes de operação. Esta última característica do sistema é reforçada pelo uso de técnicas de Inteligência Artificial, que permitem ainda o desenvolvimento de uma interface de operação que facilita a interpretação do sistema, através do uso das mesmas variáveis que são usados na leitura dos sinais monitorados em campo.

1.1 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos com a seguinte disposição:

- O Capítulo 2 posiciona este trabalho no cenário histórico do desenvolvimento de tecnologias submarins, introduzindo detalhes sobre o objeto do estudo, o sistema VASPS;
- O Capítulo 3 aprofunda os detalhes acerca do VASPS, apresentando a modelagem e o equacionamento dos componentes principais do sistema. Neste capítulo são realizadas as considerações que delimitam o escopo da teoria desenvolvida no trabalho, contextualizando também a problemática de controle;
- O Capítulo 4 apresenta os fundamentos teóricos da Teoria de Controle, introduzindo alguns conceitos essenciais usados no desenvolvimento de controladores, que devem ser suficientes para o entendimento das técnicas desenvolvidas ao longo do trabalho. O Capítulo possui uma seção para tratar da Lógica Nebulosa, outra para a Teoria de Controle Moderno e conclui com a fusão das duas, apresentando o Controle Nebuloso, usando em todos eles exemplos relacionados aos conceitos do Sistema VASPS trabalhados no capítulo anterior;
- No Capítulo 5 as metodologias de síntese de controladores são apresentadas no contexto das duas principais estratégias de controle adotadas. A primeira segue o conceito de melhoria de desempenho do sinal de resposta, uma tendência dos controladores clássicos, enquanto que a segunda trata da minimização do esforço de controle propriamente dito, que foca mais diretamente o objetivo deste trabalho. Modelos são apresentados e discutidos, sem a apresentação dos resultados;
- No Capítulo 6 são simulados os resultados para os casos propostos. Curvas de resposta são avaliadas individualmente e dispositivos inseridos na malha de controle têm suas

características mapeadas, permitindo avaliar como estes trabalham entre si ao se mesclar conceitos nos controladores finais;

- Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas no decorrer deste estudo e são propostas sugestões de trabalhos futuros;

O trabalho também possui três apêndices. O Apêndice A se dedica ao detalhamento matemático dos modelos de controladores voltados ao desempenho, com a definição dos parâmetros e a apresentação das curvas de resposta para variações desenvolvidas neste trabalho. O Apêndice B apresenta todas as simulações computacionais realizadas para o último modelo de controlador proposto, voltado à minimização do esforço de controle, apresentando resultados preliminares de uma proposta para a experimentação real. Por fim, o Apêndice C apresenta os modelos computacionais de todos os controladores desenvolvidos e do sistema físico do VASPS, desenvolvidos na forma de diagrama de blocos no *Simulink*[®].

Capítulo 2

Panorama Tecnológico

2.1 Sistemas de Produção *Offshore*

As descobertas mais recentes de reservatórios de óleo têm ocorrido cada vez mais frequentemente em alto mar e em lâminas d'água cada vez mais profundas, especialmente no Brasil, onde o volume da reserva sofreu incrementos expressivos nos anos recentes. Com estas novas descobertas são impostos novos desafios, uma vez que as condições operacionais ficam mais complexas e as tecnologias existentes não são suficientes para a exploração dos novos campos. Um exemplo de adaptação para um novo cenário é dado em Campos et al. (2006), onde a plataforma P-55 a ser instalada em uma lâmina d'água de 1800 metros teve de sofrer o desenvolvimento de um novo sistema de controle para atender as condições críticas de escoamento em golfadas (variação brusca da vazão) recebida pela plataforma, característica esta causada, entre outras coisas, pelo alto volume de produção, pela forte presença de gás - que causa uma diferença de velocidade entre as fases instabilizando o fluxo - e pela geometria do terreno, mais acidentado devido à sua localização de maior profundidade - o que faz com que a gravidade gere este escoamento nos risers que levam a produção do fundo do mar até a plataforma.

Assim, a exploração e produção em alto mar na Bacia de Campos que até então lançava mão de tecnologias consagradas, como o uso quase que exclusivo da técnica de gas lift como solução de elevação artificial, teve de sofrer novos desenvolvimentos e aplicações a fim de sustentar a operação nas novas condições. Para o exemplo da elevação artificial, a transição para o cenário de água ultra-profundas exigiu em alguns casos soluções mais apropriadas para

escoamento de grandes vazões, como o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), que conta com uma bomba elétrica para o incremento da pressão no fluido.

Com plataformas locadas em regiões mais distantes do litoral, e com o maior custo de produção devido à necessidade de se desenvolver novas tecnologias, apenas a produção em maior escala consegue prover o retorno suficiente para estes custos com um risco controlado, de forma que nestas novas condições são usadas plataformas maiores e em menor quantidade, integrando regiões mais vastas, aumentando a distância entre os postos. Com isso, a ocupação de espaço em plataforma se torna uma questão crítica, pois uma maior produção exige maiores tanques de armazenamento, maiores separadores, maior mão-de-obra e um descarregamento da produção mais frequente. Todo este novo cenário implicou no desenvolvimento de tecnologias ainda mais inovadoras, que têm surgido na forma de sistemas de produção submarinos, campos inteligentes e transporte de produção para longas distâncias através de oleodutos e gasodutos. Junto com todas estas novas abordagens também aparecem questões adicionais, como processamento de produção, garantia de escoamento, monitoramento dos poços em longo prazo e questão de meio ambiente e segurança, que no todo caracterizam uma transição tecnológica significativa das tecnologias de exploração de petróleo.

As questões mencionadas são abordadas por Devegowda e Scott (2003), que fazem um levantamento de possíveis soluções para este novo cenário, considerando o desenvolvimento recente de tecnologias submarinas. Dentre as possibilidades de processamento submarino, cinco alternativas de soluções são mencionadas na referência e avaliadas segundo os critérios destacados anteriormente:

- Bombeio Multifásico
- Separação Gás/Líquido
- VASPS
- Separação Água/Óleo

O bombeio multifásico consiste de uma bomba capaz de transmitir fluido nas fases líquida e gasosa em uma única linha, não necessitando de outros equipamentos submarinos. Esta tecnologia consegue lidar com frações de gás de até 97%, tão embora não consiga trabalhar com uma fração maior que esta. Além disso, partículas sólidas podem danificar o sistema e seu consumo de energia pode ser bastante alto quando o bombeio necessitar ser realizado para grandes distâncias, o que exigiria uma maior manutenção e ocupação de espaço na plataforma

para os geradores de energia. Ainda assim, o bombeio multifásico é apontado como uma “tecnologia comprovada”, e bastante competitiva para bombeio em pequenas distâncias.

A separação submarina de gás e líquido consiste de um vaso de separação submarino com um sistema de bombeio para transmitir a fase líquida separada por uma linha enquanto o gás é transmitido por outra linha, independente, sem bombeio. Este sistema necessita de um aparato complexo de separação, o que se agrava pela dificuldade de realizar intervenções e pelo uso de instrumentação adicional, como o uso de manifold, válvulas e um sistema de controle. Além disso, esta tecnologia também apresenta dificuldades com sólidos e com a geração de energia para o bombeio. No entanto, há diversos benefícios inerentes, como a redução da pressão de trabalho na cabeça do poço, aumentando a produção significativamente, a possibilidade do uso do gás separado para a reinjeção no poço, a inibição da formação de hidratos na tubulação devido à segregação do metano em uma linha independente e a redução do diâmetro dos risers e das linhas de transmissão, barateando o custo do bombeio para longas distâncias.

A diferença entre o VASPS e a separação submarina de gás e líquido convencional é a integração do sistema de bombeio com o vaso de separação, que é também mais compacto. Isso implica em uma redução da complexidade do equipamento, elimina a necessidade de linhas independentes de gás e líquido entre a bomba e o separador, podendo ser usada apenas uma linha de alimentação multifásica de fluido e reduz o consumo de energia por parte da bomba, uma vez que o sistema fica próximo da base do riser, e não do campo submarino, reduzindo o comprimento da linha elétrica.

A separação de água e óleo consiste de um separador ciclônico instalado no leito submarino ou no fundo do poço que separa a água do óleo e a usa para a reinjeção no poço, bombeando o óleo com uma bomba submersa, seja elétrica (BCS) ou hidráulica. A separação pode ser ciclônica ou por gravidade e faz uso de duas linhas de saída – uma para o gás e outra para o óleo – enquanto que a água é enviada para um dispositivo submarino de tratamento. Este sistema amplia os benefícios da separação de gás e líquido por liberar espaço na plataforma devido à redução do dispositivo de separação e tratamento de água e por inibir ainda mais a formação de hidratos devido à remoção da água da linha de transmissão. Este sistema entretanto não foi elevado à maturidade, de forma que com poucas aplicações ainda não se pode garantir uma alta confiabilidade. Além disso, caso a água não seja usada para a injeção, seu descarte torna-se um

problema. Ademais, todos os problemas de complexidade de equipamento no fundo do mar continuam valendo, bem como as dificuldades com a energia para as bombas.

Em Devegowda e Scott (2003), o Bombeio Multifásico é indicado como a tecnologia mais consagrada e desenvolvida, devido ao alto custo de intervenção que pode inviabilizar o uso de uma bomba BCS, presente nos outros sistemas, mesmo se considerando que este último oferece maiores benefícios que o primeiro. Isto apenas justifica o propósito deste trabalho, que visa buscar a viabilidade do sistema VASPS através da redução da quantidade de intervenções na bomba BCS, como será visto nos capítulos seguintes.

2.2 Sistema VASPS

Como visto na seção anterior, o sistema VASPS (*Vertical Annular Separation and Pumping System*) consiste de um separador submarino de óleo e gás instalado no leito marinho com um sistema de bombeio integrado, o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS). Juntamente com o BCS, o VASPS usa a técnica de *gás lift* para a elevação artificial do óleo produzido.

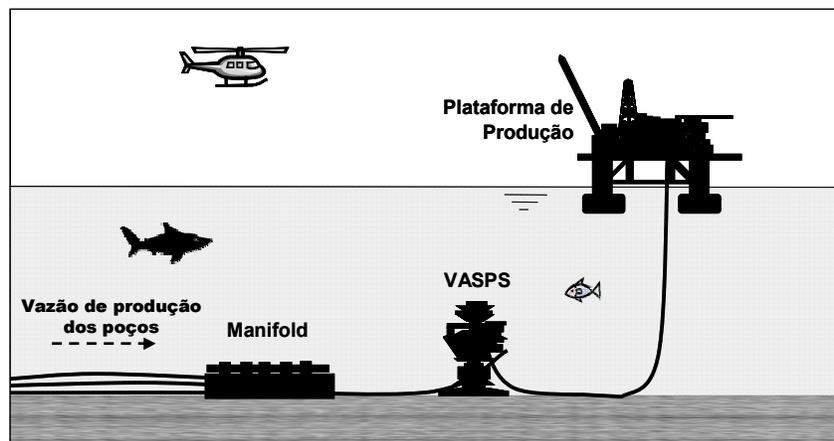


Figura 2.1: Representação da instalação do VASPS no sistema de produção (fora de escala).

O sistema VASPS apresenta um conceito inovador de separação e bombeamento bifásico submarino. Em detalhes, ele é constituído de uma torre de aproximadamente 70 metros de altura cuja estrutura interna contém um separador ciclônico dividido em três estágios de separação e uma bomba do tipo BCS. Este vaso de separação é parcialmente enterrado em um poço falso na região dos poços e próximo à base do *riser* de produção, possivelmente integrando poços próximos através do uso de um *manifold*. Para uma melhor compreensão, a Figura 2.2 apresenta um esquema do sistema VASPS, onde as dimensões são dadas à esquerda e abaixo, os estágios de

separação são indicados à direita e as saídas da produção para as linhas independentes de líquido e gás são dadas acima.

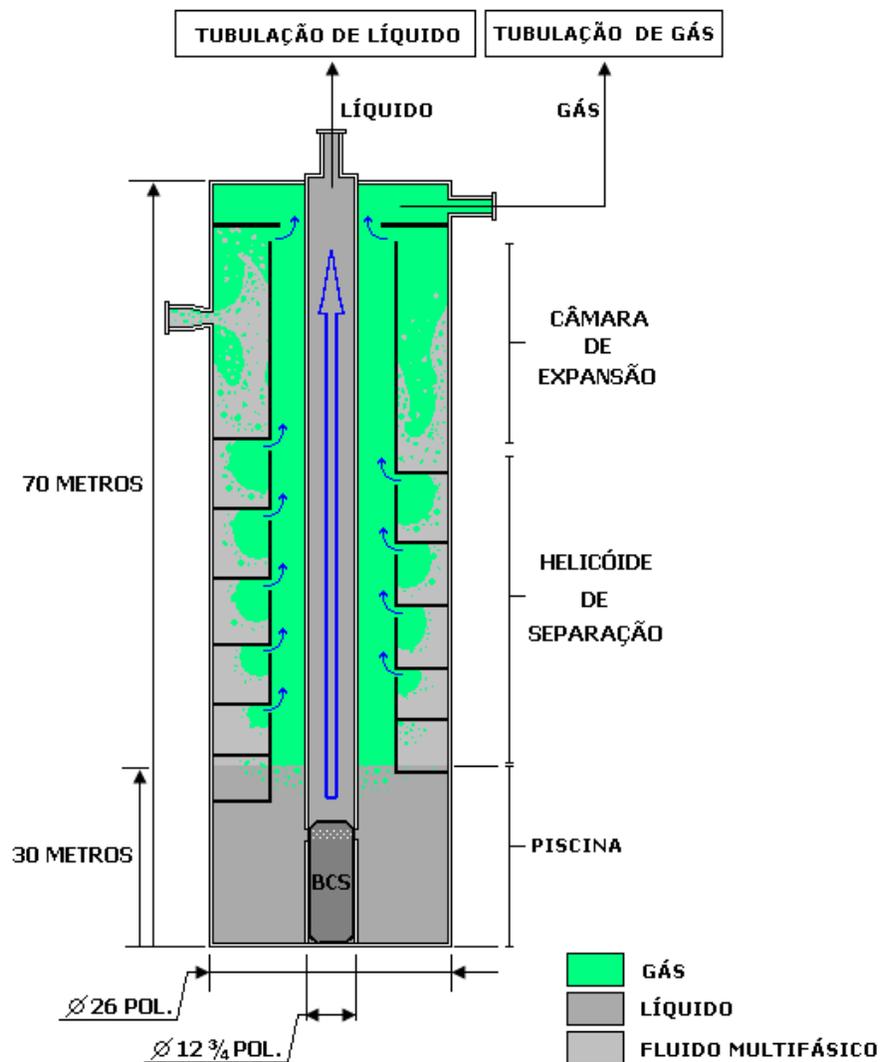


Figura 2.2. Diagrama esquemático do sistema VASPS.

As principais condições operacionais do VASPS, conforme relatado por do Vale *et al.* (2002) e Peixoto *et al.* (2005), são:

- Utilização de *gás lift*
- Produção de líquido: 1000 m³/d
- Produção de gás: 100.000 m³/d
- Pressão de admissão do fluido multifásico: 14 kgf/cm²

- Pressão no vaso separador: 8 a 12 kgf/cm²
- Pressão de descarga da BCS: 61 kgf/cm²
- Pressão na linha de gás: 7 kgf/cm²

Aliada a estas condições, a saída para a linha de gás é aberta por um longo trecho, de forma que não há uma válvula *choke* ou qualquer outro dispositivo de restrição de vazão de gás que permita controlar a pressão no vaso com muita precisão ou velocidade. Considerando também o volume do VASPS - algo em torno de 6,5 m³ - há a indicação de que este sistema não está pressurizado, pois as pressões da fase gasosa são bastante menores que as do poço, e de que isto não apresenta problemas operacionais, pois não há dispositivo que permita influenciar diretamente esta variável. Além disso, o pequeno volume que as fases líquidas ocupam frente à produção, considerando-se que sua saída para a linha independente é controlada pela bomba, e a grande variação de pressão que sofrem, indicam também que este é o componente crítico do sistema. Considerando ainda que a bomba BCS não deva trabalhar com frações muito altas de gás e notando que há o uso do *gás lift*, faz-se imperativo que o controle do volume da piscina seja mais elaborado, ou ao menos fortemente monitorado.

Dadas a instalação e as condições operacionais, o sistema VASPS atingiu resultados expressivos logo em sua primeira operação (do Vale *et al.*, 2002). Dentre fatores positivos importantes no cenário apresentado na seção anterior, como a redução da ocupação de espaço na plataforma, a interligação de regiões produtivas e o bombeio para longas distâncias, o principal balisador da viabilidade deste sistema é a redução da pressão de trabalho na cabeça do poço, que permite o aumento da vazão de produção.

Em do Vale *et al.* (2002), foi publicada a experiência com a primeira instalação do VASPS no Brasil, que ocorreu no campo de Marimbá em uma lâmina d'água de 395 metros. O poço que alimentou o separador estava produzindo antes da intervenção uma vazão de 750 m³/d de óleo com uma assistência de 100.000 m³/d de *gas lift*, a uma pressão de 36 kgf/cm². Após a instalação e com o sistema estabilizado, o *gas lift* foi interrompido e a nova condição de operação era a produção de óleo de 1000 m³/d a uma pressão de 11 kgf/cm² no VASPS. A pressão na linha de líquido, após a saída da BCS, era de 56 kgf/cm² e a pressão na linha de gás era de 8 kgf/cm². Os ganhos dramáticos sustentaram a operação do VASPS por muito tempo, em despeito das dificuldades mencionadas na seção anterior.

Alguns anos após a primeira operação, um outro trabalho foi publicado relatando algumas das dificuldades que ocorreram no período de 2001 a 2004. O trabalho de Peixoto *et al.* (2005) relata todo o trabalho de *workover* (manutenção e correção de falhas de um poço) realizado para retomar a produção do VASPS. Como era de se esperar, a intervenção para a realização deste *workover* foi ocasionada pela falha da bomba BCS, que fora então trocada.

A falha da BCS ocorreu em Dezembro, cinco meses depois da instalação do sistema que ocorrera em Julho. A causa foi atribuída à parte mais complexa do sistema, o sistema de controle – o que não comprometeu o sucesso da nova tecnologia, uma vez que o sistema de proteção e controle não reagiu como esperado por não ter detectado uma operação imprópria de uma das válvulas. Para a retomada da produção utilizando o VASPS, esta válvula *choke* presente na linha de gás foi removida, e proteções adicionais foram implementadas para o aumento da vida útil da nova bomba BCS.

Após estas correções e depois da realização de ajustes no sistema de controle, a bomba foi trocada em Janeiro de 2004 e retomou a operação em Maio de 2004. Na segunda operação, a condição operacional do sistema corrigido era bastante similar à primeira operação, apresentando uma vazão de óleo de 860 m³/d sem o uso do *gas lift* e a uma pressão de 11 kgf/cm².

No começo de 2005, tendo sido verificada a estabilidade operacional do sistema e a não reincidência de falhas, uma nova condição operacional, prevista no projeto inicial, foi posta em produção: o uso de *gas lift* concomitante à operação do VASPS. Retomando o uso do *gas lift*, a vazão de produção de óleo retornou ao patamar de 1000 m³/d, a uma pressão de 14 kgf/m³. A pressão na saída da BCS foi de 61 kgf/cm² e a pressão na linha de gás se manteve no patamar de 7 kgf/cm². É interessante notar que embora o uso de uma altíssima vazão gás no sistema gera alguma vibração adicional na bomba, isto não implica necessariamente na pressurização do VASPS ou da linha de saída de gás, de forma que o sistema continua a trabalhar com o vaso despressurizado e conectado diretamente à linha sem a presença da válvula *choke*.

É importante ressaltar que a necessidade de proteções dinâmicas e estáticas em um controlador são sempre necessárias, pois são os dispositivos de automação que realizam a parada do sistema em casos eventuais de falhas. No entanto, estes sistemas servem para apoiar o gerenciamento, podendo nunca ser ativados ao longo da vida útil de um equipamento. Para que isto (o não acionamento das proteções) ocorra, é necessário que o sistema de controle esteja

adequado aos objetivos operacionais, de forma que a estratégia de controle seja elaborada de acordo.

Enquanto aplicação para um sistema de controle, o VASPS mostra-se altamente propício a ganhos de eficiência, uma vez que é um sistema mecanicamente eficaz e robusto e que trouxe resultados comprovados no campo. Sendo o controlador o gargalo de uma tecnologia tão avançado, é interessante endereçar este problema diretamente com um trabalho focado, que é o caso deste estudo especificamente. Aqui serão propostas alternativas para solucionar a problemática de controle da bomba BCS – ou ao menos de minimizar os impactos desta – de forma que novas estratégias possam ser usadas em concepções futuras do uso deste tipo de bomba, ou novas formulações do problema possam ser tomadas levando-se em conta as diferentes estratégias de controle que podem ser adotadas, avançando-se o conhecimento através do melhor entendimento geral do problema.

Capítulo 3

Modelagem

Neste capítulo o Sistema VASPS é apresentado em detalhes suficientes para a realização do controle. Considerações são realizadas quanto à modelagem do escoamento e quanto ao equacionamento da bomba BCS e da dinâmica interna do vaso separador. Com as delimitações discutidas neste capítulo, o modelo físico é fechado e proposto, de forma que os capítulos seguintes tratarão mais diretamente da metodologia para a síntese de controladores.

3.1 Escoamento

3.1.1 *Escoamento de entrada*

Como visto no Capítulo 2, o Sistema VASPS é alimentado diretamente do poço de produção, com o padrão de escoamento em golfadas. Este escoamento alterna a predominância de líquido e de gás, de forma que funciona como um sinal de distúrbio para as condições de pressão e de vazão – ou de nível de líquido na piscina – dentro do vaso. Como visto mais adiante, o sinal de entrada em um dado sistema afeta a resposta, ou estas condições operacionais, de forma que para estabilizá-las é necessário um controlador. Dessa forma, é importante que seja escolhido um padrão de escoamento de entrada de líquido no VASPS que reflita a condição de campo ou que seja mais agressiva do que esta, de forma que o projeto de controladores considere a robustez necessária para atingir o objetivo de controle mesmo sob distúrbios de entrada bastante significativos.

Com o intuito de analisar tanto a robustez dos controladores propostos, quanto a sensibilidade do sistema a variações no escoamento, este trabalho apresenta simuladores de fluxo de entrada de líquido paulatinamente mais agressivos. Foram elaboradas três curvas diferentes para este simulador, chamado de ‘Gerador de Golfadas’, que foram inseridos na malha de

controle para garantir a robustez das soluções propostas. Além disso, ao passo que um objetivo de controle é atingido e os modelos de controlador evoluem, um Gerador de Golfadas mais simples é substituído por outro mais agressivo.

O papel do gerador de golfadas no sistema é importante para a concepção e validação do modelo computacional, pois este é o responsável por simular todos os distúrbios de campo que tornam complexa a operação do separador, constituindo uma ferramenta essencial para a avaliação da robustez do conceito de controlador proposto e sua sensibilidade às variações no escoamento. A primeira curva usada como comportamento da vazão de entrada para o gerador de golfadas é apresentado na Figura 3.1 (comunicação direta, Teixeira, 2006).

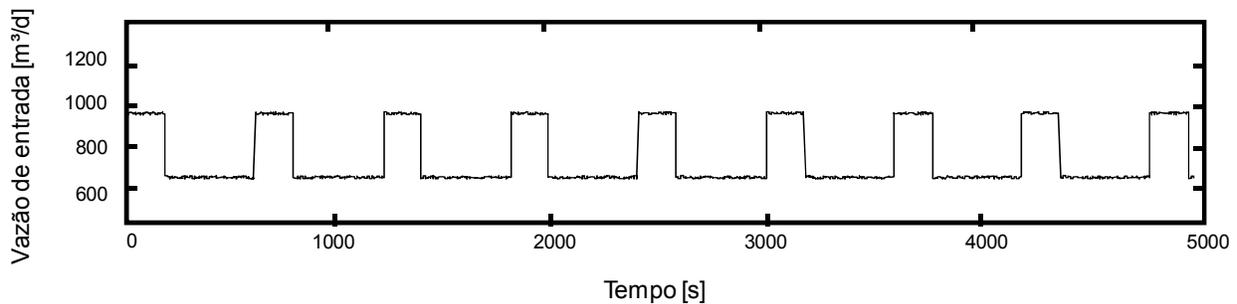


Figura 3.1. Modelo preliminar da vazão de entrada de líquido do Gerador de Golfadas (comunicação direta, Teixeira, 2006).

Embora o Gerador de Golfadas inicial apresente uma componente aleatória nos patamares de amplitude da vazão de entrada, este pode ser considerado bastante conservador, por se assemelhar bastante a uma onda quadrada, previsível. Assim, esta contribuição da literatura sofreu três modificações neste trabalho, de forma a compor as outras duas curvas mais agressivas:

1. O aumento da oscilação aleatória no patamar de vazão;
2. A variação da frequência das golfadas, tornando-as imprevisíveis; e, por fim
3. A variação dos patamares de pancada de líquido, tornando as golfadas diferentemente agressivas.

O primeiro efeito foi combinado com o segundo para compor o segundo modelo de Gerador de Golfada. A adição do terceiro efeito no gerador permitiu constituir o último modelo para a vazão de entrada, de forma que suas curvas tomam as formas apresentadas na Figura 3.2. Nesta figura é mantida a curva primária do gerador de golfadas (comunicação direta, Teixeira,

2006) para apresentar o contraste entre esta e aquelas desenvolvidas como contribuição deste trabalho.

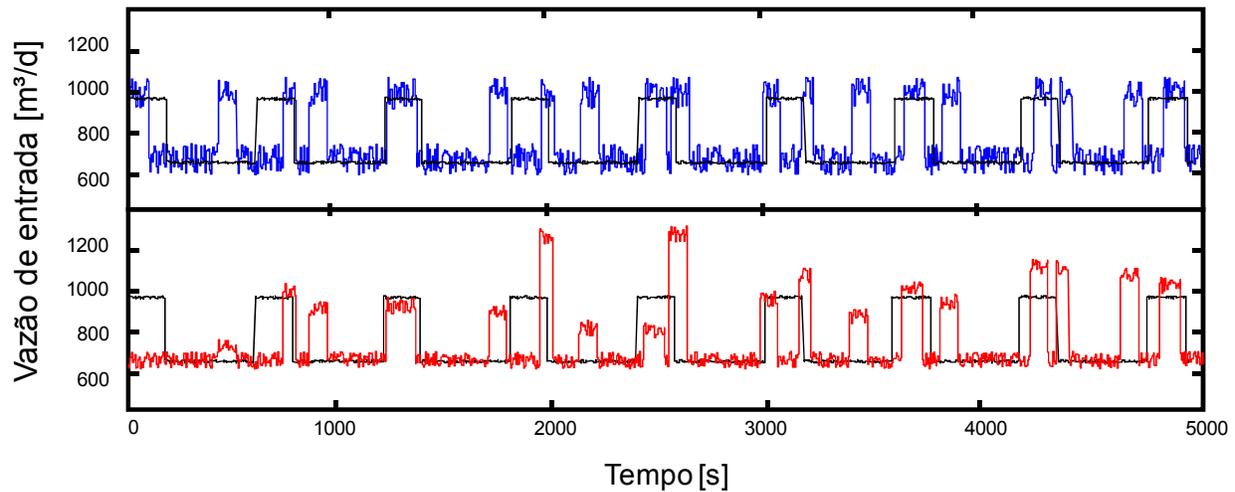


Figura 3.2. Comparativo entre o segundo e terceiro geradores de golfada.

3.1.2 Escoamento interno ao vaso

O escoamento do fluido multifásico internamente ao vaso passa por três estágios de separação, delimitados pela geometria interna conforme apresentados no Capítulo 2 através do esquemático da Figura 2.2. A separação ocorre na Câmara de Expansão, no Helicóide de Separação e na ‘Piscina’, de forma que o princípio de separação identificado em cada um dos estágios é o seguinte:

- **Separação primária:** é composta por uma câmara de expansão onde ocorre a extração de cerca de 50% do gás da mistura gás e líquido (óleo e água). Por efeito da incidência do jato nas paredes cilíndricas internas, forma-se um filme de líquido que desce por gravidade para o helicóide do separador secundário;
- **Separação secundária:** é composta por uma estrutura helicoidal que visa aumentar a eficiência de separação do sistema. A separação se dá pela combinação do efeito centrífugo de segregação do gás livre com o efeito do tempo de residência para a remoção do gás disperso na fase líquida;
- **Separação terciária:** é composta por uma “piscina” na qual o líquido se acumula e parte do gás é separada por efeito gravitacional. Nesta piscina é onde opera uma bomba elétrica submersa do tipo BCS.

O escoamento que ocorre desde a admissão do fluido multifásico no bocal de entrada passando pelos estágios de separação é ilustrado pela Figura 3.3.

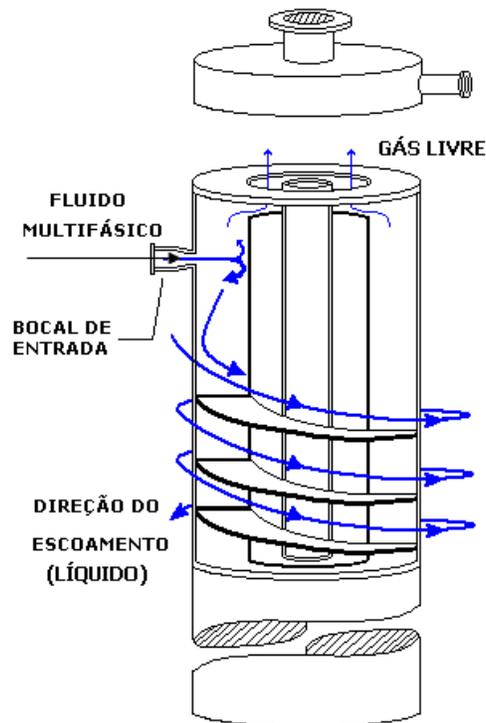


Figura 3.3. Esquemático do escoamento das fases líquido e gás no VASPS.

Assim, a garantia da eficiência de separação no VASPS é o resultado da contribuição de cada uma das etapas deste processo, sendo parcialmente realizada na câmara de expansão e parcialmente causada pelos efeitos de segregação centrífuga, de tempo de residência e gravitacional. Estes últimos três são diretamente afetados pelo nível em que a piscina de encontra, uma vez que caso a piscina esteja muito cheia (e então o nível é considerado ‘alto’, dado que neste trabalho a leitura é realizada do fundo para o topo), o tempo de residência é menor e conseqüentemente o fluido é exposto ao efeito centrífugo por menos tempo. Além disso, com uma fração de gás maior na piscina causada pela redução da eficiência de separação, o efeito gravitacional também é impactado. Toda esta interligação de efeitos implica que o nível da piscina do VASPS deve ser mantido abaixo de um limite superior (LS), para que a eficiência de separação do gás seja garantida.

Da mesma forma, embora a bomba BCS presente no sistema seja resistente a uma certa fração de gás, esta não consegue trabalhar com frações de vazio muito altas. Isto implica em

outra restrição do sistema – a operação com a BCS afogada, ou seja, completamente mergulhada no líquido, para que não haja dano. Com isso estabelece-se um limite inferior (LI) de operação.

Neste trabalho, são considerados os parâmetros usados em campo para estes dois limites propostos. Não há, entretanto, um valor fixo a partir do qual o sistema apresenta problemas, até mesmo porque diversas condições de operação influenciam na capacidade de o sistema absorver com estabilidade as oscilações das variáveis tanto do fluido como do sistema. Será usado, então, um intervalo onde a operação possa ficar mais crítica, restringindo a operação a uma faixa de estabilidade próxima aos valores de referência usados para o nível na operação do sistema atual. Uma vez que esta referência sempre se situa próximo dos 30 metros de altura de nível de líquido, oscilando mais ou menos de alguns metros em condições mais severas, será assumido que a faixa de estabilidade se dá dos 25 aos 35 metros de coluna de líquido e que os valores críticos de operação do sistema são atingidos respectivamente em torno dos 20 metros (LI) e em torno dos 40 metros (LS) de altura.

3.2 Elevação Artificial usando BCS

A vazão de saída de líquido do VASPS é impressa pela Bomba BCS, que por sua vez é acionada por um inversor de frequência. Este dispositivo, comum em sistemas automatizados que fazem uso de rotores elétricos, permite variar a frequência de alimentação do dispositivo acionado – no caso, a bomba – e conseqüentemente variar a vazão impressa no sistema. Este artifício é usado exatamente para adequar o funcionamento dos equipamentos a um comportamento desejado para o sistema, tão embora a modelagem de todos os efeitos resultantes seja bastante intrincada. Com isso, não só a vazão do sistema é alterada, como também a curva de carga sofre variações, uma vez que a componente de perda de carga por escoamento é afetada quando da variação da velocidade do fluido.

Uma ilustração do efeito da variação da frequência de alimentação em uma bomba BCS é apresentada na Figura 3.4. Esta ilustração representa a relação entre altura de elevação (ou *Head*, como apresentado) e vazão de saída, para diversas frequências de acionamento e uma eficiência constante de uma bomba BCS de um estágio, modelo TE1500, retirada do catálogo de produto das curvas de bombas da série 538. Com isso, para uma dada eficiência e uma dada altura de elevação, pode-se encontrar a relação entre a frequência de acionamento da bomba pelo inversor e sua respectiva vazão de saída, de forma que a oscilação presente na vazão de saída depende completamente da forma de acionamento realizada sobre o atuador.

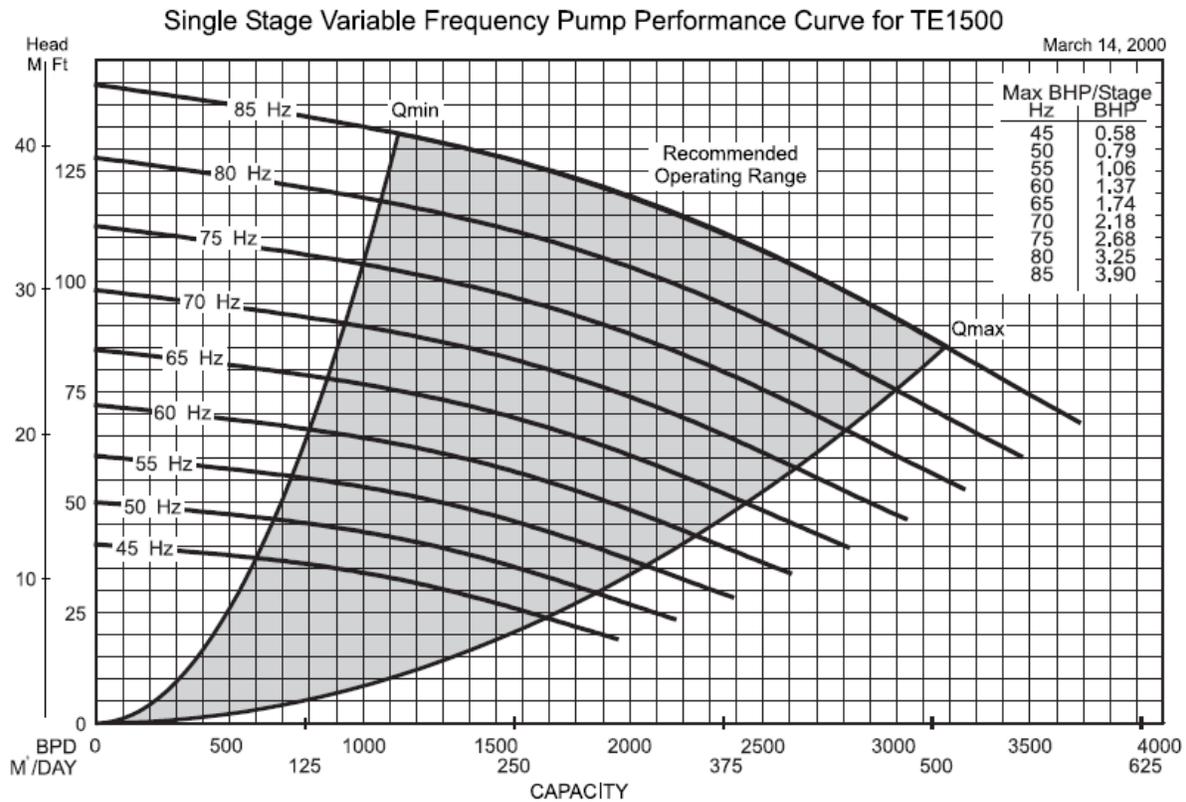


Figura 3.4. Exemplo de curvas de bomba BCS para diferentes freqüências de acionamento.

Para a bomba BCS presente no VASPS, será utilizada a relação proposta por Teixeira *et al.* (2004), apresentada na Equação (3.1).

$$\dot{Q}_{os} = -0.0577 \cdot f^3 + 8.0786 \cdot f^2 - 249.18 \cdot f - 263.36 \quad (3.1)$$

Nesta equação, \dot{Q}_{os} é a vazão de saída em metros cúbicos por dia e f é a freqüência de alimentação da bomba em Hertz.

A realização da modelagem desta curva não é apresentada na referência mencionada, de forma que se faz necessário esclarecer as premissas assumidas, bem como o raciocínio que culminou em tal resultado. Basicamente, foram três as principais considerações realizadas, a saber (comunicação direta, Teixeira, 2006):

- As curvas da bomba obtidas do fabricante, relacionando a altura de elevação, H , com a vazão, Q , para uma série de freqüências, f , selecionadas, são dadas na Figura 3.5. A equação de cada uma das curvas foi obtida através da seleção de pontos de operação no catálogo do fabricante e de sua posterior interpolação usando um polinômio de terceiro grau, com um ajuste maior ou igual a 0,997.

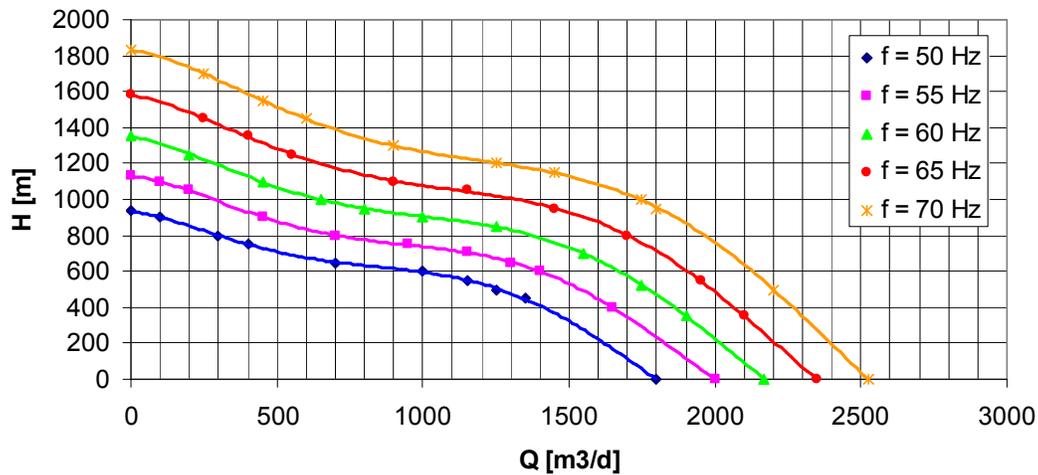


Figura 3.5. Curvas da bomba BCS do VASPS para diferentes frequências de acionamento (comunicação direta, Teixeira, 2006).

- A alteração da frequência de alimentação da bomba, que implica em alternar entre as curvas de vazão do sistema apresentadas, implica também em alteração da curva de carga do sistema, uma vez que a velocidade do fluido varia. Uma vez que o sistema de controle tratará do transiente da variação de nível e que as alterações no acionamento serão pequenas e constantes, este efeito da variação da curva de carga do sistema será desprezado, de forma que apenas a curva da bomba será alterada em um dado acionamento.
- A profundidade do VASPS no campo é algo em torno de 400 metros. Além desta cota da lâmina d'água a ser elevada, há também as perdas de carga no sistema, causadas tanto pelo escoamento quanto pelos dispositivos (válvulas, joelhos, etc) presentes na tubulação. A somatória de todos estes efeitos será considerada constante, de forma que a altura de elevação a ser vencida pela bomba será um parâmetro fixo, de 800 metros, de forma a facilitar a correlação das variáveis para o cômputo da vazão de saída.

Assim, para o equacionamento da relação entre frequência de acionamento da bomba e a vazão de saída, e tomando a altura de elevação fixa de 800 metros, há apenas um ponto de operação da vazão para cada valor de frequência de acionamento da bomba. Assim, ajustando uma curva de terceiro grau entre estes pontos, foi encontrada a curva apresentada na Figura 3.6 (comunicação direta, Teixeira, 2006).

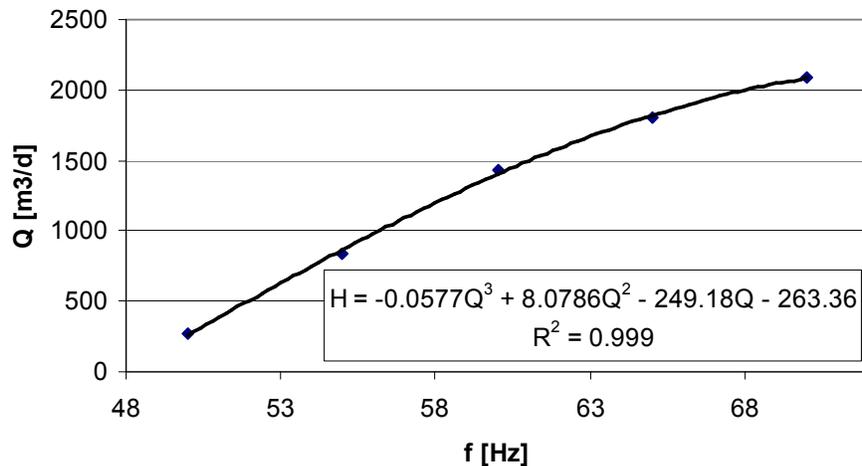


Figura 3.6. Modelo para a curva da bomba BCS (comunicação direta, Teixeira, 2006).

A modelagem da curva da bomba proposta por Teixeira *et al.* foi utilizada neste trabalho para fins de simulação da dinâmica do VASPS na malha de controle. Dadas as considerações realizadas, esta modelagem simplificada atende as necessidades de um modelo físico para a aplicação de um sistema de controle e o desenvolvimento de novas técnicas, o que representa o foco deste trabalho.

3.3 Equacionamento do Sistema VASPS

Como apresentado no Capítulo 2, o sistema VASPS é composto por três partes – a câmara de expansão, o helicóide de separação e a piscina, onde fica instalado o sistema de bombeio que destina a fase líquida para uma linha segregada. Fica visível o tratamento independente do escoamento de cada uma das fases, de gás e de líquido, dentro do vaso.

O primeiro, mais leve, é transportado e possui a pressão como variável governante. Como visto, o gás também não está altamente pressurizado, possuindo uma leve oscilação de pressão no sistema bocal de entrada – vaso – linha, não tendo apresentado problemas operacionais críticos por acúmulo de massa (aumento de pressão) em todo o sistema e conseqüentemente não exigindo a inserção de um equipamento restritivo ou de controle, como uma válvula *choke*, interrompendo a comunicação existente em toda esta extensão aberta. Além disso, a longa extensão da linha independente de transporte de gás implica em um volume bastante grande em que o gás pode se expandir, de forma que a variação da variável principal – a pressão – é de ordem bastante pequena.

O segundo, ainda multifásico pela presença de diferentes líquidos, precisa ser bombeado e é monitorado na plataforma através do altura do nível no vaso, indicando que o volume é a variável

governante. Este sistema por sua vez é mais restrito, uma vez que volume que ele ocupa é limitado pelo vaso. Além disso, neste sistema existe um dispositivo que necessita de uma atenção redobrada – a bomba – sendo o componente crítico do sistema como um todo. A variação deste nível de líquido é algo bastante mais dinâmico e mais rápido que a variação da grandeza da pressão no vaso, o que exige a tomada de decisões com relação ao acionamento da bomba muito mais freqüentes.

Dado este panorama, são feitas algumas considerações para o tratamento da dinâmica física deste sistema para este trabalho:

- As fases de líquido presente no escoamento interno do VASPS compreendem partículas sólidas em pequena escala, uma fase de água salgada e outra fase de óleo, possivelmente com alguns outros elementos dissociados. Estas fases serão consideradas como uma única, sendo as partículas sólidas desprezadas da análise, dado que são poucas e devem ser retidas em algum tipo de filtro específico para isso. O tratamento do líquido como monofásico permite simplificações no modelo sem muita perda de credibilidade.
- O tratamento de cada uma das fases (líquido e gás) no VASPS após a separação será tratado como sistemas com dinâmica diferente, até mesmo porque as variáveis que os regem são diferentes e possuem transientes de ordem bastante distintas. Com isso, considerando que para a análise do controle será usada apenas a resposta transiente, o efeito da variação da pressão na dinâmica do volume de líquido será desprezada;
- A elaboração do sistema de controle tratará apenas do sistema crítico no VASPS, ou seja, o sistema de líquido, focando inclusive no atuador, a bomba BCS, que é o componente crítico do sistema. Entretanto, o trabalho desenvolvido para este atuador não será completamente perdido no tratamento de um possível sistema de controle do gás, pois os conceitos presentes nas estratégias a serem apresentadas podem muito bem ser adaptados para uma nova aplicação.
- Para finalmente distinguir os sistemas de líquido e gás, será considerado que após o ingresso no vaso e conseqüente separação, as fases de líquido e gás não se misturam, não se associam e não seqüestram partículas da outra fase. Considerar o fluxo de massa entre as fases seria um trabalho muito elaborado para o estudo do

sistema controlado, devendo ser realizado num estudo a parte utilizando *softwares* de simulação de escoamento (CFD – *Computational Flow Dinamics*).

- A fase de líquido será considerada incompressível, de forma a facilitar a análise.
- Por fim, a leitura do nível de líquido na piscina tomará como referência a direção emergente, de forma que o zero do sistema será o ponto mais fundo do vaso separado. Com o sistema de coordenadas indo no sentido contrário ao gravitacional, o nível alto da piscina será aquele mais próximo do bocal de entrada, e o mais baixo aquele mais próximo do ponto de instalação da bomba.

Com as devidas considerações realizadas pode-se considerar o equacionamento para o nível de líquido da piscina. Tomando a lei de conservação da massa e sabendo que todo o volume monofásico de líquido que entra é incompressível e não sofre fluxo de entrada ou saída de massa com a fase gasosa, conclui-se que há conservação do volume, como expresso pela Equação (3.2), onde \dot{Q}_{oe} é a vazão de entrada de líquido e \dot{Q}_{os} é a vazão de saída de líquido, que podem ser expressas em metros cúbicos por dia [m³/d].

$$\frac{dV_L}{dt} = \dot{Q}_{oe} - \dot{Q}_{os} \quad (3.2)$$

Ademais, a variação do nível de líquido é relacionada à variação de volume através do fator geométrico dado na Equação (3.3), onde d_e é o diâmetro externo da piscina, d_i é o diâmetro interno, em metros, e h é o nível de líquido, também em metros. O fator geométrico usado representa a seção constante da área do anel onde a piscina do VASPS é localizada.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\pi \cdot (d_e^2 - d_i^2)} \frac{dV_L}{dt} \quad (3.3)$$

Associando as duas relações acima, a dinâmica de variação do nível da piscina é então regida pela Equação (3.4), em função das vazões de entrada e saída e proporcional ao inverso da área da seção constante.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{4}{\pi(d_e^2 - d_i^2)} \left(\dot{Q}_{oe} - \dot{Q}_{os} \right) \quad (3.4)$$

Capítulo 4

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são introduzidos os conceitos fundamentais utilizado na síntese de controladores apresentada no Capítulo 5. Estes fundamentos teóricos são as ferramentas manipuladas quando da redefinição da estratégia de controle para cada modelo desenvolvido, aplicado e testado. Por fim, tão embora os exemplos trabalhados no decorrer deste capítulo não correspondam a um modelo de controlador específico desenvolvido posteriormente, estes exemplos servem como base para guiar o entendimento do funcionamento do sistema VASPS no tocante às características e variáveis relevantes para o sistema de controle, de forma que a lógica apresentada corresponde à realidade física proposta e delimitada no Capítulo 3.

4.1 Introdução à Teoria de Conjuntos Nebulosos

A Teoria de Conjuntos Nebulosos pode ser aplicada a sistemas de controle, provendo uma abordagem prática. Nesta abordagem é importante a formação de uma *Base de Conhecimento* onde o comportamento do sistema – as *Regras* – e as informações sobre as variáveis – os *Dados* – devem ser traduzidas de uma forma matemática.

Conforme proposto por Riid (2002), um sistema que utiliza a Teoria de Conjuntos Nebulosa pode ser representado pelo esquema da Figura 4.1.

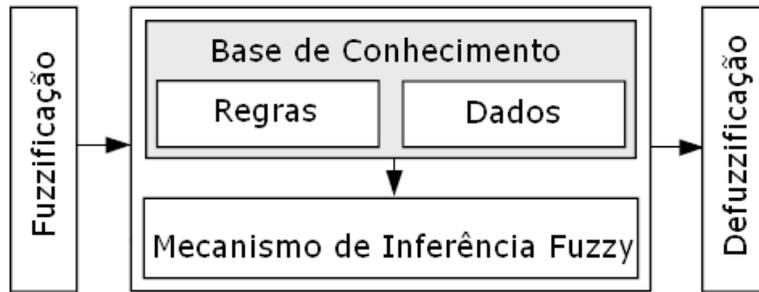


Figura 4.1 Sistema nebuloso genérico, adaptado de Riid (2002).

Na Figura 4.1, o primeiro bloco, à esquerda, identifica a etapa de transformação dos dados reais, numéricos, em dados do sistema nebuloso, lingüísticos. Esta transformação de variáveis pode ser chamada de *Nebulização* (ou *Fuzzificação*, como na referência apresentada). Após esta transformação, as variáveis numéricas tornam-se variáveis lingüísticas, identificadas por substantivos, e possuem valores de pertinência (de 0 a 1) em ‘conjuntos nebulosos’, representados por adjetivos, que identificam o ‘valor’ daquela variável. Este processo é detalhado na seção 4.1.1 Nebulização.

Com as variáveis definidas e classificadas, uma série de regras lógicas, pertencentes a uma Base de Regras, são aplicadas através de um mecanismo de inferência, chamado de nebuloso. Para gerar valores de saída são usados dados de um Banco de Dados que, juntamente com a Base de Regras, formam o Conhecimento sobre o sistema. Este Mecanismo de Inferência Nebuloso pode possuir diversas formas de tratar estes dados, e devem ser configurado de acordo com o sistema em questão. Detalhes são apresentados nas seções 4.1.2 e 4.1.4.

Finalmente, após a aplicação das regras e o cômputo da solução, as variáveis de saída devem ser convertidas de volta para o sistema numérico sendo necessário realizar uma ‘transformada inversa’. Este passo pode ser chamado de *Desnebulização* (ou *Defuzzificação*, como apresentado na referência). Maiores explicações se apresentam nas seções 4.1.3 e 4.1.5.

4.1.1 Nebulização

Para uma melhor compreensão da lógica nebulosa é necessário remeter à teoria de conjuntos. Nesta, pode-se agrupar os elementos de cada conjunto separadamente, de forma que ao avaliar a pertinência $\mu_A(x)$ de uma variável x para um conjunto A em um universo X , pode-se afirmar que:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (4.1)$$

Desta forma, ou o elemento pertence ao conjunto A ou não pertence. Esta classificação implica que a função de pertinência $\mu_A(x)$ assume valores booleanos, 0 ou 1. No entanto, para diversos problemas práticos é difícil classificar uma dada variável em apenas dois valores. Por exemplo, qual o critério para classificar o nível da piscina no VASPS como ‘alto’? Ou ‘baixo’? Ainda, se o nível da piscina é crítico no valor de 30% superior a um dado valor de referência, quão crítico este o é quando estiver em 20% superior? Para trabalhar com estes valores intermediários, que muitas vezes são relevantes, surge a teoria de conjuntos nebulosos, apresentada em Jager (1995), Passino e Yurkovich (1998) e Riid (2002). A teoria de conjuntos nebulosos admite a possibilidade de uma pertinência parcial, com um valor percentual entre 0 e 100%, diferente da noção clássica. Assim, um elemento pode pertencer a um dado conjunto com determinado grau de pertinência $\mu_A(x)$ dentro do intervalo $[0,1]$.

Como exemplo, considere o sistema VASPS apresentado no Capítulo 3. A referência de coordenadas dimensionais será tratada como no sentido da emergência, ou seja, o ponto mais fundo do vaso separador equivale à cota de 0 metro. Adicionalmente, foi visto que o limite inferior de trabalho para o nível, LI, é de 20 metros, e o limite superior, LS, é de 40 metros, de forma pressupõe-se que a região ideal de trabalho seja em torno do nível de 30 metros, equidistante aos limites operacionais. Com isso, um conjunto nebuloso rotulado de *Baixo* pode caracterizar o nível da piscina de líquido do VASPS fortemente para um valor entre 20 e 30 metros, de forma que o “grau de pertinência” para o nível *Baixo* seja dado por uma função $\mu_{Baixo}(h) \in [0,1]$, onde h é o nível da piscina. A pertinência $\mu_{Baixo}(h)$ do nível da piscina h no conjunto *Baixo* pode então ser descrita conforme alguma das funções representada na Figura 4.2.

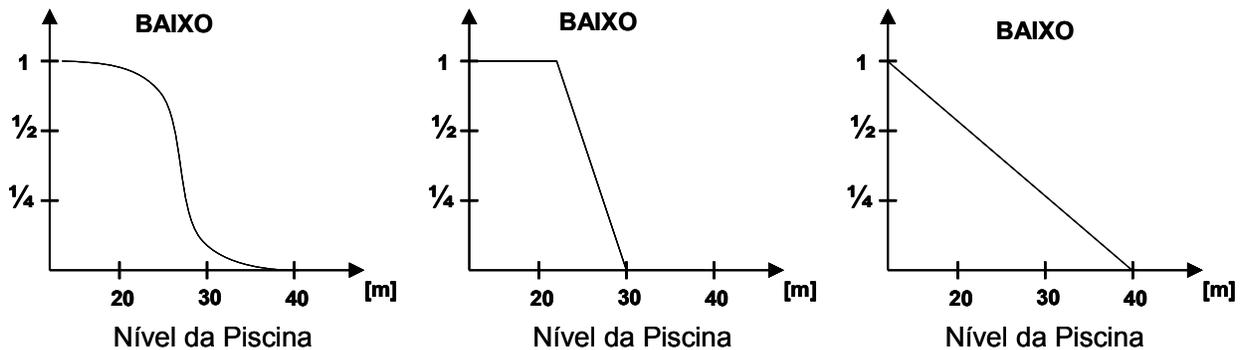


Figura 4.2. Exemplo de três possíveis funções de pertinência para o conjunto nebuloso *Baixo*.

É possível observar pela figura que quanto menor é o valor da variável *Nível da Piscina*, maior é a pertinência que esta tem no conjunto *Baixo*. Da mesma forma, diversas podem ser as funções que classificam este conjunto, sendo mais, ou menos gradativas. No entanto, apenas uma pode ser a função que classifica o conjunto *Baixo* na variável *Nível da Piscina*, de forma que uma das três funções apresentadas – ou alguma outra – deve ser escolhida para relacionar o conjunto nebuloso em uma variável nebulosa.

A variável nebulosa *Nível da Piscina*, entretanto, também pode ser caracterizada por outros conjuntos nebulosos - por exemplo, *Alto* e *Médio* - podendo conter mais de um conjunto ativo, com diferentes *graus de pertinência*, ou seja, com diferentes participações em cada conjunto. Desta maneira, a variável *Nível da Piscina* é modelada como uma *variável lingüística nebulosa*, assumindo valores como *Alto*, *Baixo* e *Médio*, chamados de *rótulos lingüísticos*. A variável lingüística é caracterizada pela pertinência que possui em cada um de seus *conjuntos nebulosos* – no caso, os conjuntos *Alto*, *Baixo* e *Médio* – que possuem, cada um, sua função de pertinência, que deve ser única para cada conjunto. A Figura 4.3 mostra uma possível configuração para a variável *Nível da Piscina*.

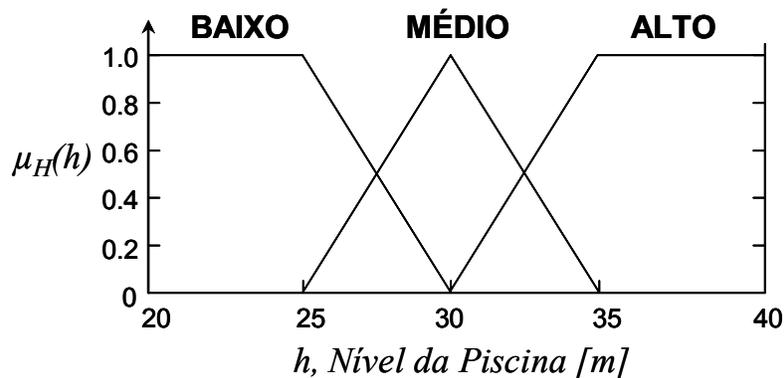


Figura 4.3. Representação da variável nebulosa *Nível da Piscina*.

Através da figura, pode-se observar que nesta modelagem da variável de entrada, foram cobertos os valores reais de entrada (que podem ser medidos com um sensor no sistema) de 20 a 40 metros de altura do líquido da piscina, considerando como referência para medição a emergência (início da medição no fundo do vaso). É possível concluir também que caso os valores estejam acima ou abaixo desta faixa, eles ativam os conjuntos extremos (*Alto* ou *Baixo*, respectivamente) com 100% de pertinência.

Outra variável que pode ser considerada para o sistema VASPS e que pode ser relevante no sistema de controle é a *Variação do Nível da Piscina*, como uma derivada no tempo, da variável

anterior. Neste caso, também deve ser adotado um critério para a classificação do universo de operação da variável, a fim de cobri-lo com conjuntos nebulosos.

Supondo que a variação máxima do nível seja a vazão nominal de entrada, 1000 m³/d, sem vazão de saída, a variação de nível equivale a:

$$\dot{h} = \frac{\dot{Q}}{(A_e - A_i)} = \frac{1000}{\pi(r_e^2 - r_i^2)} = 4,45 \text{ cm / s} \quad (4.2)$$

Considerando também que é necessário um bombeamento de igual taxa para manter o equilíbrio do sistema, no caso crítico inverso – bombeio a 1000 m³/d e vazão de entrada nula – o decrescimento do nível seria no valor oposto, - 4,45 cm/s. Assim, o universo de variação da nova variável será dado pelo intervalo [-5;5]. Gerando rótulos adequados, a representação desta segunda variável pode ser dada pela Figura 4.4.

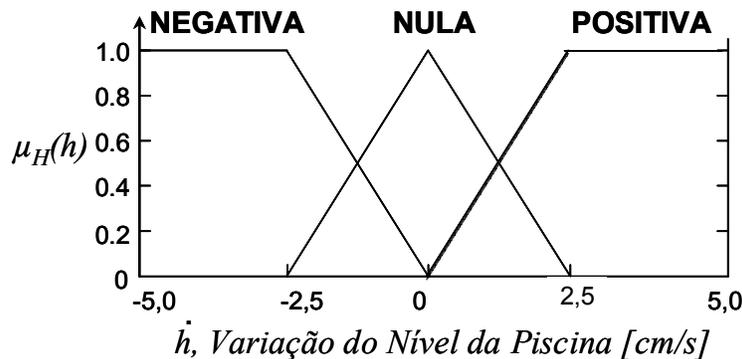


Figura 4.4. Representação da variável nebulosa *Variação do Nível da Piscina*.

Uma vez definidas as variáveis de entrada do sistema e seu universo de valores de entrada, é possível traduzir um valor real em termos lingüísticos aplicando a transformação de variáveis, a *Nebulização*, conforme exemplificado na Figura 4.5, que apresenta a conversão do valor de 32 metros de altura do *Nível da Piscina* para o valor de 60% *Médio* e 40% *Alto*, e na Figura 4.6, que apresenta a conversão do valor - 0,8 cm/s da variável *Variação do Nível da Piscina* para o valor de 30% *Negativa* e 70% *Nula*.

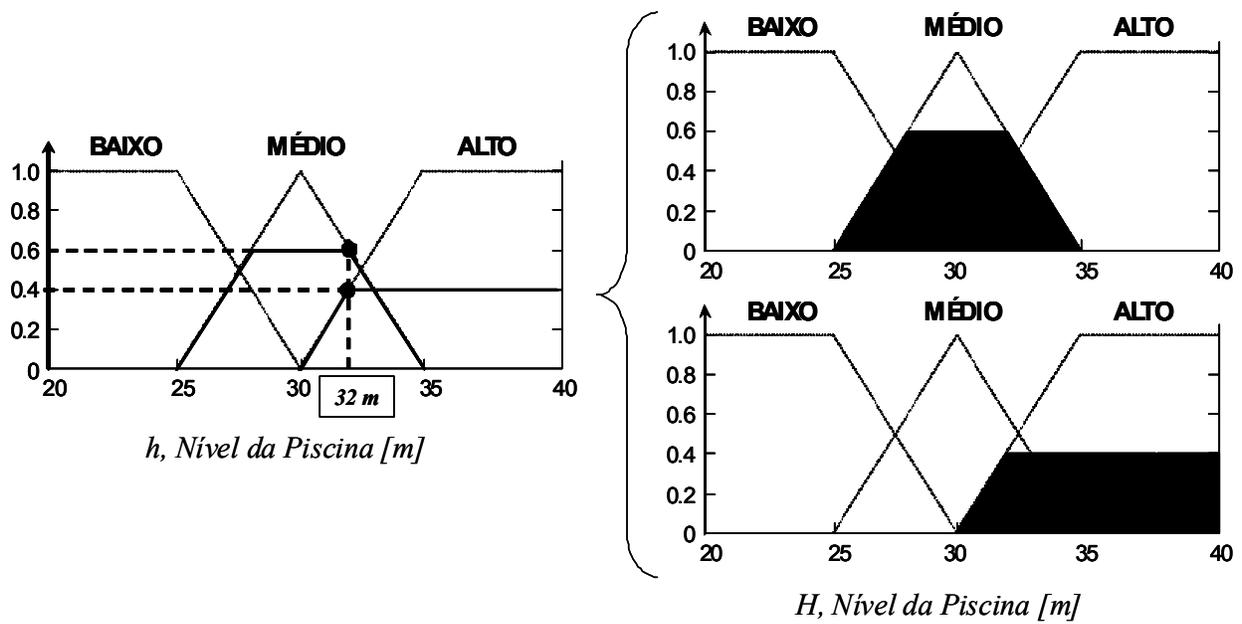


Figura 4.5. *Nebulização da variável de entrada Nível da Piscina.*

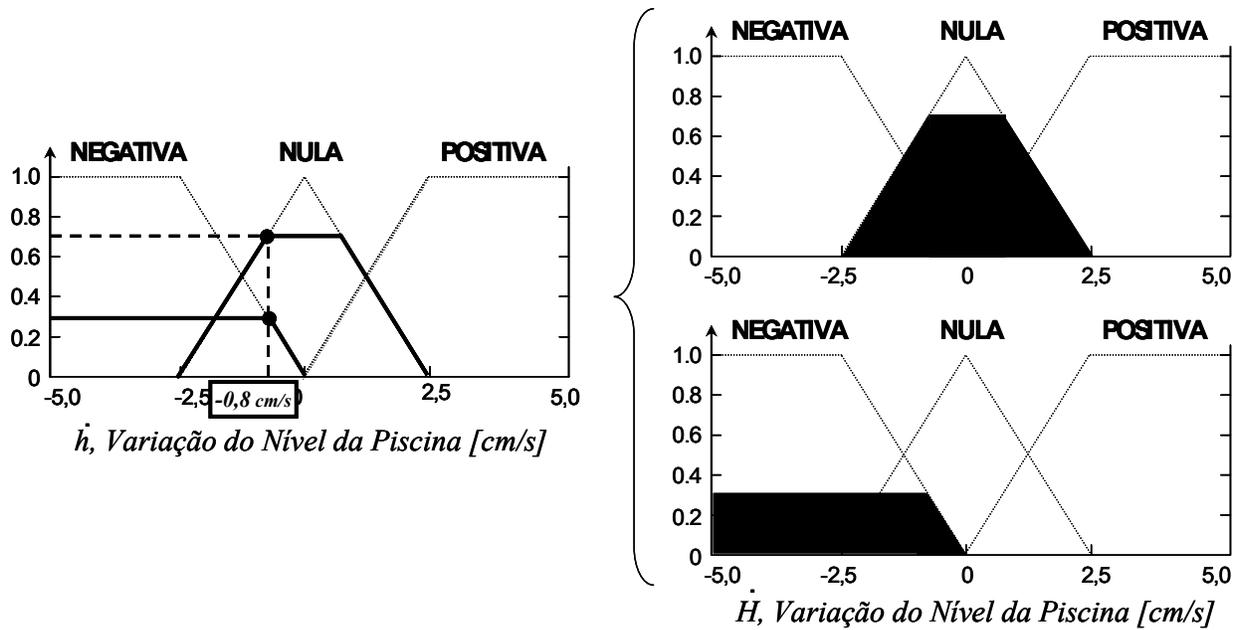


Figura 4.6. *Nebulização da variável de entrada Variação do Nível da Piscina.*

O mesmo processo de definição de variáveis lingüísticas e de conjuntos nebulosos deve ser realizado para as variáveis de saída, de forma que estas sejam expressas em termos lingüísticos e cobrindo o universo conhecido para o atuador.

4.1.2 Base de Regras do tipo Mamdani

Uma vez definidas as variáveis nebulosas de entrada e saída referentes a um determinado processo é possível codificar o conhecimento sobre tal por meio de regras lingüísticas condicionais, com a estrutura “*Se <condição>, Então <conseqüência>*”. Assim, para uma dada *condição* de ativação de uma variável de entrada, em que esta possua qualquer valor de pertinência diferente de zero em algum de seus conjuntos nebulosos, a *conseqüência* é a ativação de algum conjunto nebuloso de uma variável de saída, conforme definido pela regra lingüística. Considerando o exemplo da seção anterior, um exemplo de regra lingüística é apresentado a seguir:

“Se o Nível da Piscina é *Alto*, Então a Rotação da Bomba é *Alta*.”

Esta regra aciona o conjunto nebuloso *Alta* da variável de saída *Rotação da Bomba* quando a variável *Nível da Piscina* possuir o conjunto *Alto* ativo. A partir daí, a associação de diversas regras lingüísticas compõe a Base de Regras, que determina o comportamento do sistema. Assim, dando continuidade ao exemplo da seção anterior, é possível construir um sistema nebuloso usando as mesmas duas variáveis de entrada propostas ativando uma variável de saída *Rotação da Bomba*, com o objetivo de manter o *Nível da Piscina* com a maior pertinência possível no conjunto *Médio*. Isso poderia ser obtido segundo a seguinte Base de Regras:

1. Se o Nível da Piscina é *Baixo*, Então a Rotação da Bomba é *Baixa* (Peso 2).
2. Se o Nível da Piscina é *Médio*, Então a Rotação da Bomba é *Média* (Peso 2).
3. Se o Nível da Piscina é *Alto*, Então a Rotação da Bomba é *Alta* (Peso 2).
4. Se a Variação do Nível da Piscina é *Negativa*, Então a Rotação da Bomba é *Baixa* (Peso 1).
5. Se a Variação do Nível da Piscina é *Nula*, Então a Rotação da Bomba é *Média* (Peso 1).
6. Se a Variação do Nível da Piscina é *Positiva*, Então a Rotação da Bomba é *Alta* (Peso 1).

Através desta Base de Regras, a leitura do *Nível da Piscina* garantiria que quando este começasse a subir em direção ao limite superior, LS, a BCS seria acionada com uma maior rotação e conseqüentemente com maior vazão, reduzindo então o volume de óleo na piscina e fazendo o nível manter o conjunto *Médio* ativo. O mesmo raciocínio se aplica para o abaixamento do nível.

Já a *Variação do Nível* segue a lógica de que se o nível diminuir (conjunto *Negativa*), deve-se também reduzir a rotação para que se reduza a vazão de saída, equilibrando o balanço de

massa no transiente. Com isso, a redução de nível se daria vagarosamente, de forma a minimizar os efeitos no transiente – o que também funciona para o raciocínio inverso, de aumento de nível.

No entanto, no caso de manipulação da bomba através da variável *Variação do Nível*, trata-se de uma variável auxiliar, uma vez que seu status direto não necessariamente significa que seja necessária a atuação apresentada na Base de Regras. Isto ocorrerá, por exemplo, quando a *Variação do Nível* for *Negativa* e o *Nível* for *Alto* – neste caso, a saída desejada para a *Rotação da Bomba* é sim *Alta*, o que estabilizará o sistema. Claro que tão logo a correção de nível seja realizada, caso a variação se mantenha no status de negativa, desejar-se-á reduzir a vazão de saída. Assim, para conciliar as regras conflitantes, foi considerada uma diferença no peso entre as regras, provendo maior importância para as regras onde há a avaliação da variável crítica (peso 2) e menor para a variável auxiliar (peso 1).

A fim de ilustrar a aplicação dos pesos das regras no sistema, considere os conjuntos nebulosos ativos no exemplo da seção anterior e a Base de Regras proposta. Há quatro conjuntos nebulosos ativos nas variáveis de entrada, o que implica na ativação de quatro regras, com diferentes *graus de ativação*. Assim, é obtido o seguinte resultado de saída:

1) Conjunto *Médio* da variável *Nível da Piscina*, com pertinência 0,6.

Esta condição ativa a regra 2, ativando a variável de saída *Rotação da Bomba* no conjunto *Média*. O grau de ativação é a pertinência ativa da entrada vezes o peso da regra:

$$\text{Pertinência } 0,6 \times \text{Peso } 2 = \text{Grau de ativação } 1,2$$

2) Conjunto *Alto* da variável *Nível da Piscina*, com pertinência 0,4.

Esta ativa a regra 3, ativando o conjunto *Alta*.

$$\text{Pertinência } 0,4 \times \text{Peso } 2 = \text{Grau de ativação } 0,8$$

3) Conjunto *Negativa* da variável *Variação do Nível da Piscina*, com pertinência 0,3.

Esta ativa a regra 4, ativando o conjunto *Baixa*.

$$\text{Pertinência } 0,3 \times \text{Peso } 1 = \text{Grau de ativação } 0,3$$

4) Conjunto *Nula* da variável *Variação do Nível da Piscina*, com pertinência 0,7.

Finalmente, a última condição ativa a regra 5, ativando também o conjunto *Média*.

$$\text{Pertinência } 0,7 \times \text{Peso } 1 = \text{Grau de ativação } 0,7$$

Assim as saídas ativas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Aplicação da Base de Regras a uma entrada ativa.

Variável de Entrada	Conjunto ativo	Pertinência	Regra acionada	Peso	Variável de saída	Conjunto acionado	Grau de ativação
Nível da Piscina	Médio	0,6	2	2	Rotação da Bomba	Média	1,2
Nível da Piscina	Alto	0,4	3	2	Rotação da Bomba	Alta	0,8
Variação do Nível	Negativa	0,3	4	1	Rotação da Bomba	Baixa	0,3
Variação do Nível	Nula	0,7	5	1	Rotação da Bomba	Média	0,7

O grau de ativação total do sistema é a soma das parcelas ativadas por cada regra: $1,2 + 0,8 + 0,3 + 0,7 = 3,0$. Com os graus de ativação calculados, é possível descobrir a pertinência dos conjuntos nebulosos de saída ativos, através da ponderação do valor relativo com o total. Assim, para a variável de saída *Rotação da Bomba*, os conjuntos ativos (*Baixa*, *Média* e *Alta*) têm a pertinência dada por:

$$\text{Baixa)} \frac{0,3}{3,0} = 0,10$$

$$\text{Média)} \frac{1,2}{3,0} + \frac{0,7}{3,0} = \frac{1,9}{3,0} = 0,63$$

$$\text{Alta)} \frac{0,8}{3,0} = 0,27$$

O resultado para a saída nestas condições é a figura geométrica representativa da variável *Rotação da Bomba*, apresentada na Figura 4.7.

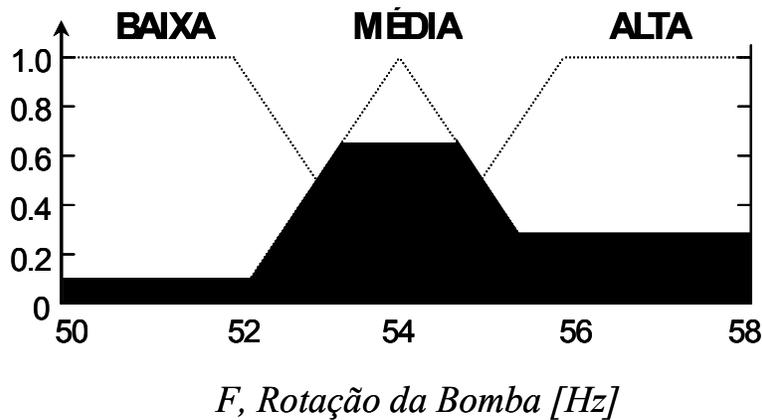


Figura 4.7. Representação da variável de saída ativada pelas entradas exemplificadas.

O processo de aplicação das regras é representado na Figura 4.8, onde as contribuições para cada conjunto nebuloso de saída são apresentadas separadamente à direita, com as respectivas condições de entrada que ativaram a saída.

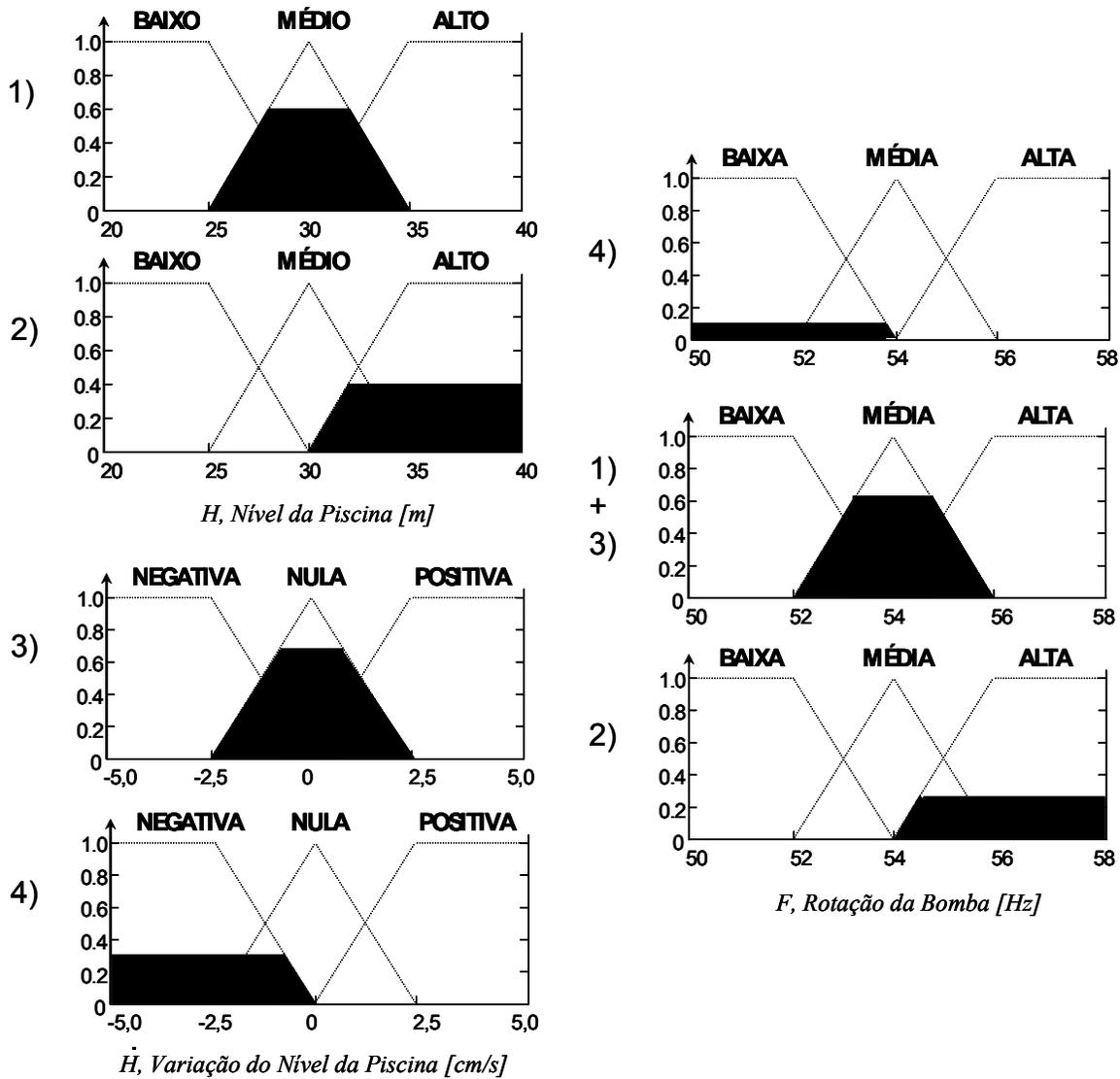


Figura 4.8. Representação da aplicação da Base de Regras para uma entrada dada.

Outra forma de aplicar a Base de Regras é utilizando a associação de entradas na mesma regra. Linguisticamente, a associação de regras ou variáveis se dá através dos operadores E e OU, enquanto que matematicamente são computadas segundo a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Implementações mais comuns de operadores lógicos E e OU.

	E	OU
Lukasiewicz	$\max(p + q - 1, 0)$	$\min(p + q, 1)$
Probabilístico	$p \cdot q$	$p + q - (p \cdot q)$
Zadeh	$\min(p, q)$	$\text{Max}(p, q)$

Pela tabela, é possível exemplificar tomando uma situação arbitrária. Considere que na Base de Regras anteriormente apresentada, o efeito da oscilação do nível apenas fosse considerado em condições específicas do nível da piscina, de forma a melhor caracterizar uma condição e conseqüentemente melhor controlar a resposta. Neste caso, a Base de Regras poderia ser reconstruída para o seguinte formato:

1. Se o Nível da Piscina é *Médio*, Então a Rotação da Bomba é *Média* (Peso 1).
2. Se o Nível da Piscina é *Baixo* E a Variação do Nível da Piscina é *Positiva*, Então a Rotação da Bomba é *Média* (Peso 2).
3. Se o Nível da Piscina é *Baixo* E a Variação do Nível da Piscina NÃO é *Positiva*, Então a Rotação da Bomba é *Baixa* (Peso 2).
4. Se o Nível da Piscina é *Alto* E a Variação do Nível da Piscina é *Negativa*, Então a Rotação da Bomba é *Média* (Peso 2).
5. Se o Nível da Piscina é *Alto* E a Variação do Nível da Piscina NÃO é *Negativa*, Então a Rotação da Bomba é *Alta* (Peso 2).

Nas regras apresentadas aparece também o operador NÃO, que tem a função de ativar a regra com o complemento do valor de pertinência do conjunto em questão, ou seja, se o conjunto é acionado com pertinência 0,3, este é não acionado em 0,7, de forma que este segundo valor é usado no cômputo do grau de ativação.

Retomando o exemplo anterior e considerando a mesma entrada (*Nível da Piscina* com 0,6 em *Médio* e 0,4 em *Alto* e *Variação do Nível da Piscina* com pertinência igual a 0,3 em *Negativa* e 0,7 em *Nula*), as regras ativas seriam as de número 1, 4 e 5, pois:

- A regra de número 1 possui a entrada ativa (*Nível da Piscina* em *Médio*) com pertinência de 0,6;
- A regra 4 possui ativos o *Nível da Piscina* em *Alto* com 0,4 de pertinência e a *Variação do Nível da Piscina* em *Negativa* com 0,3;
- A regra 5 possui ativo o *Nível da Piscina* em *Alto* com 0,4 e possui NÃO ativa a *Variação do Nível da Piscina* em *Negativa* com 0,7;

Para associar as duas entradas acionadas nas regras 4 e 5, é necessário usar alguma das regras para o operador E. Tomando ambos os casos e aplicando cada um dos critérios, as pertinências totais de entrada ficam:

Regra 4)

- Lukasiewicz: $\max(0,4 + 0,3 - 1 ; 0) = \max(-0,3 ; 0) = 0$
- Probabilístico: $0,4 \cdot 0,3 = 0,12$
- Zadeh: $\min(0,4 ; 0,3) = 0,3$

Regra 5)

- Lukasiewicz: $\max(0,4 + 0,7 - 1 ; 0) = \max(0,1 ; 0) = 0,1$
- Probabilístico: $0,4 \cdot 0,7 = 0,28$
- Zadeh: $\min(0,4 ; 0,7) = 0,4$

Verificam-se os diferentes níveis de conservadorismo adotados por cada critério, de forma que cada um pode ser usado de acordo com a necessidade de cada sistema. No caso desta segunda Base de Regras, como a associação das duas variáveis de entrada permitiram tratar cada condição independentemente, as alternativas configuradas são as condições críticas do sistema, e por isso o peso maior frente à regra de número 1. Então, de forma a reforçar a importância das regras associativas, escolhe-se o critério que permite o maior aumento de pertinência e conseqüentemente o acionamento mais rápido – o critério de Zadeh.

Finalmente, o grau de ativação das regras é dado pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Aplicação da Base de Regras usando entradas associativas.

Variável de Entrada	Conjunto ativo	Pertinência	Regra acionada	Peso	Variável de saída	Conjunto acionado	Grau de ativação
Nível da Piscina	Médio	0,6	1	1	Rotação da Bomba	Média	1
Nível da Piscina	0,4 Alto	0,3	4	2	Rotação da Bomba	Média	0,6
Variação do Nível	0,3 Negativa						
Nível da Piscina	0,4 Alto	0,4	5	2	Rotação da Bomba	Alta	0,8
Variação do Nível	0,7 NÃO Negativa						

A saída do sistema com esta nova Base de Regras pode então ser calculada, de forma que a Rotação da Bomba é representada pela condição:

$$1. \text{ Média com pertinência de } \frac{1,0 + 0,6}{1,0 + 0,6 + 0,8} = \frac{1,6}{2,4} = 0,67$$

$$2. \text{ Alto com pertinência de } \frac{0,8}{1,0 + 0,6 + 0,8} = \frac{0,8}{2,4} = 0,33$$

4.1.3 Desnebulização para sistemas Mamdani

Com o valor das pertinências dos conjuntos nebulosos das variáveis de saída calculados, o próximo passo é realizar a Desnebulização de forma a calcular o valor da variável no domínio do tempo para então acionar o sistema. Considerando as variáveis tomadas como exemplo na seção anterior, pode-se ilustrar o processo segundo a Figura 4.9. Repare que h é o *Nível da Piscina*, \dot{h} é a *Variação do Nível da Piscina* e f é a *Rotação da Bomba*, de forma que as letras minúscula representa a variável no domínio do tempo, o domínio real, e as letras maiúsculas representam as variáveis no domínio nebuloso.

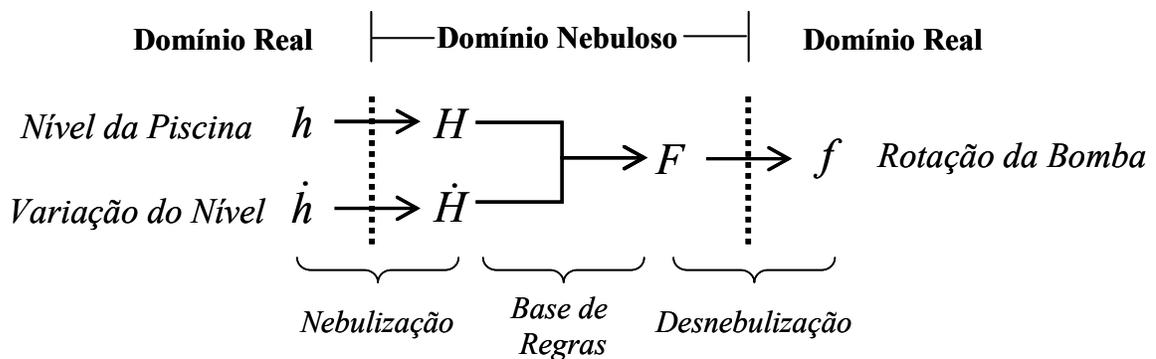


Figura 4.9. Processo de conversão de variáveis exemplo do VASPS para o domínio nebuloso.

Da mesma forma que no processo de nebulização, também é necessário definir o intervalo de discurso para a variável de saída. No caso do nosso exemplo, isso pode ser feito utilizando-se a expressão para a equação da curva da bomba apresentada no Capítulo 3, Equação (3.1), bem como a curva de vazão de entrada, apresentada através do Gerador de Golfadas, na Figura 3.1 e na Figura 3.2. Considerando que é necessário acionar a bomba com uma frequência que permite uma vazão de saída média que garanta o balanço de massa, é possível definir uma vazão igual à média do patamar inferior de vazão do gerador de golfadas, algo em torno de 750 m³/d. Os acionamentos superiores serviriam então para compensar as golfadas, e os acionamentos inferiores, para compensar a redução do nível causada pelos acionamentos sucessivos.

Assim, substituindo o valor de 750 m³/d na Equação (3.1), obtém-se uma frequência de acionamento de aproximadamente 54 Hz – esta frequência funcionará como o centro de faixa. Então, considerando a oscilação de vazão entre 500 e 1000 m³/d, os valores de acionamento encontrado estão respectivamente pouco acima de 52 Hz e pouco abaixo de 56 Hz. Estes são os valores ideais com que a bomba deveria trabalhar. No entanto, nos casos mais críticos, estes valores de vazão apenas equilibrarão a vazão de entrada com a de saída, de forma que o nível se mantenha estático em um nível específico. É desejado que haja a possibilidade de correção do nível da piscina, o que doravante exige o acionamento mais crítico da bomba. Tomando os acionamentos de 250 m³/d e 1200 m³/d, de forma a prover uma velocidade de correção apropriada, são encontrados os valores críticos de acionamento da bomba, 50 Hz e 58 Hz. Claro que tão embora estes estejam no universo de discurso, é desejado que não ocorra nenhum acionamento nestes patamares.

Assim, com o intervalo da variável de saída definido, deve-se determinar a desnebulização. Há diversos métodos para tratar este processo. Comumente estes são métodos geométricos, imaginando que os conjuntos nebulosos de saída compõem uma figura com área calculável. Assim, há tentativas de se encontrar o valor numérico em torno do qual esta figura se localiza, seja através do centro de massa (COG), do centro de área (COA), do pico da figura geométrica formada (MOM) ou desprezando parcelas de menores valores de pertinên

- Centro de Gravidade (COG): calcula o centro de massa, (média ponderada) da figura.

$$cog(F) = \frac{\int \mu_F(x) x dx}{\int_x \mu_F(x) dx} \quad (4.3)$$

- Centro de Gravidade discreto (COG): a mesma técnica pode ser utilizada quando a função de pertinência é discretizada, utilizando-se a variável q como índice para a discretização.

$$cog(F) = \frac{\sum_{q=1}^{N_q} \mu_F(x_q) x_q}{\sum_{q=1}^{N_q} \mu_F(x_q)} \quad (4.4)$$

- Centro de Gravidade indexado (ICOG): calcula o centro de gravidade considerando apenas a região que possui valor de pertinência igual ou acima de um dado parâmetro,

chamado de α . No exemplo, a função *cut* representa a remoção de área com pertinência menor que α .

$$icog(F, \alpha) = cog(F \cap \alpha - cut(F, \alpha)) \quad (4.5)$$

- Média do Máximo (MOM): calcula o ponto onde a região de valor de pertinência máximo (pico) é dividida pela metade.

$$mom(F) = icog(F, hgt(F)) \quad (4.6)$$

- Centro de Área (COA): calcula o ponto onde a área para desnebulização é dividida pela metade. Na equação, as funções $inf(x)$ e $sup(x)$ representam, respectivamente, o valor inferior e o valor superior da abscissa no intervalo avaliado.

$$\int_{\inf x}^{coa(F)} \mu_F(x) dx = \int_{coa(F)}^{\sup x} \mu_F(x) dx \quad (4.7)$$

A Figura 4.10 ilustra a aplicação dos métodos de desnebulização apresentados para a variável de saída obtida nos exemplos desenvolvidos ao longo deste capítulo.

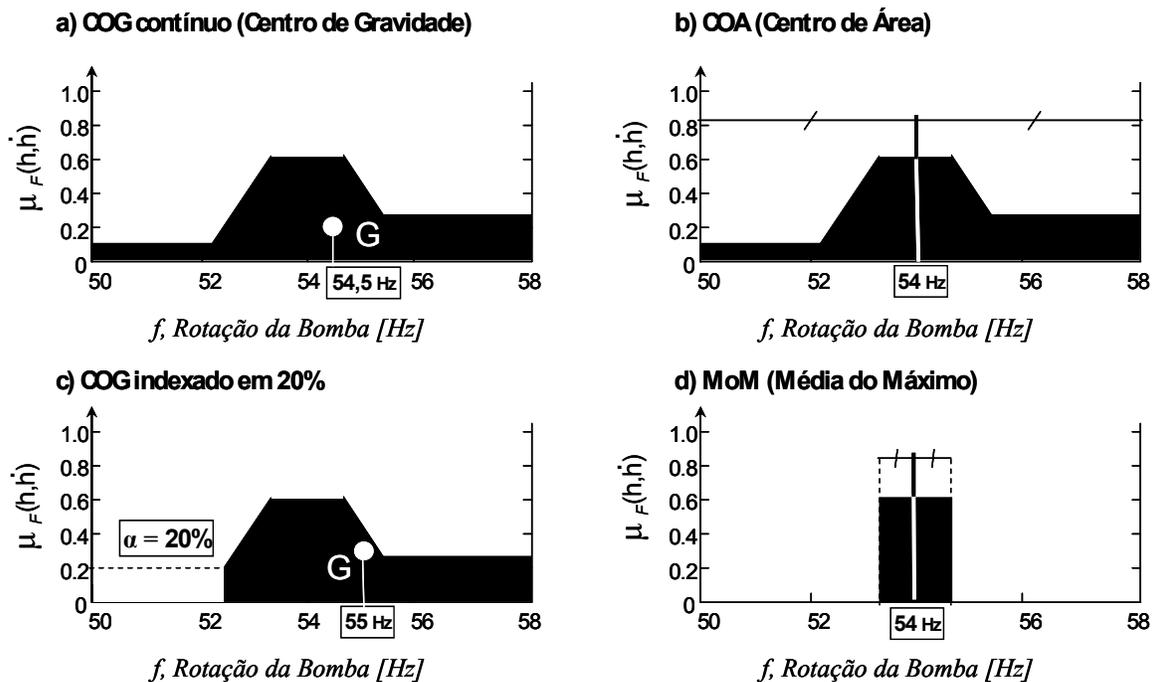


Figura 4.10. Técnicas de desnebulização aplicadas ao exemplo, com o valor de saída destacado.

4.1.4 Sistemas do tipo Sugeno

Outro tipo de sistema nebuloso encontrado comumente na literatura e usado neste trabalho, é o sistema com regras do tipo Sugeno, como apresentado em Tanaka e Sugeno (1992) e Takagi e Sugeno (1985). Neste sistema, não são usados conjuntos nebulosos na saída, mas sim constantes ou funções das variáveis de entrada. Assim, a representação de uma regra poderia ser dada por:

Se o Nível da Piscina é *Baixo*, Então a Rotação da Bomba deve ser *igual a 54Hz*.

Matematicamente falando, e denotando o conjunto nebuloso *Baixo* por H_B :

Se H é H_B , Então $f = 54 \text{ Hz}$.

Note que não há conjunto nebuloso de saída. No entanto, a definição de uma função para uma dada regra permite a interpolação de diversas funções lineares simples para obter um resultado não linear complexo, ou uma representação não linear de um sistema com funcionamento linear em diversas regiões.

Assim, retomando o último exemplo de Base de Regras, apresentado no formato Mamdani, é possível convertê-la para Sugeno através da definição de valores constantes de acionamento da saída (*Rotação da Bomba*) para cada regra, de forma que esta poderia ser expressa da seguinte maneira:

1. Se o Nível da Piscina é *Médio*, Então a Rotação da Bomba é *54 Hz* (Peso 1).
2. Se o Nível da Piscina é *Baixo* E a Variação do Nível da Piscina é *Positiva*, Então a Rotação da Bomba é *54 Hz* (Peso 2).
3. Se o Nível da Piscina é *Baixo* E a Variação do Nível da Piscina NÃO é *Positiva*, Então a Rotação da Bomba é *50 Hz* (Peso 2).
4. Se o Nível da Piscina é *Alto* E a Variação do Nível da Piscina é *Negativa*, Então a Rotação da Bomba é *54 Hz* (Peso 2).
5. Se o Nível da Piscina é *Alto* E a Variação do Nível da Piscina NÃO é *Negativa*, Então a Rotação da Bomba é *58 Hz* (Peso 2).

Embora os valores críticos 50 e 58 Hz estejam presentes nas regras, estes não serão diretamente acionados, uma vez que o grau de pertinência toma valores progressivos, permitindo o uso parcial do valor crítico. Para o entendimento, vide abaixo na Tabela 4.4 a aplicação das regras à mesma condição anterior de acionamento da entrada usando o critério associativo de Zadeh.

Tabela 4.4. Aplicação da Base de Regras Sugeno.

Variável de Entrada	Conjunto ativo	Pertinência	Regra acionada	Peso	Variável de saída	Valor acionado	Grau de ativação
Nível da Piscina	Médio	0,6	1	1	Rotação da Bomba	54 Hz	1
Nível da Piscina	0,4 Alto	0,3	4	2	Rotação da Bomba	54 Hz	0,6
Variação do Nível	0,3 Negativa						
Nível da Piscina	0,4 Alto	0,4	5	2	Rotação da Bomba	58 Hz	0,8
Variação do Nível	0,7 NÃO Negativa						

Com os graus de ativação em mãos, é possível realizar a desnebulização. Como as saídas são dadas em função de constantes, o valor final da saída é dado então pela média ponderada dos valores de acionamento pelos respectivos graus de ativação:

$$\text{Rotação da Bomba é igual a } \frac{(1,0 + 0,6) \cdot 54 + 0,8 \cdot 58}{1,0 + 0,6 + 0,8} = \frac{132,8}{2,4} = 55,3 \text{ Hz}$$

Diferentemente dos sistemas Mamdani, os sistemas Sugeno já provêm a resposta no domínio real diretamente, por tratar de valores numéricos reais. Entretanto, caso as variáveis de saída fossem expressas em termos de funções lineares, haveria outra forma de computar a saída, também baseado em médias ponderadas, mas como não este artifício não será usado neste trabalho, esta situação também não será aqui introduzida.

4.2 Introdução à Teoria de Controle

Um *sistema* é representado por suas equações diferenciais, modelado de acordo com a dinâmica física que este apresenta. É considerado como sistema qualquer fenômeno que possa ser representado por uma equação – a trajetória de um projétil quando este é disparado, o comportamento do nível de um tanque em função de suas vazões de entrada e saída ou a vazão de saída de uma bomba em função da rotação de seu rotor e da carga a que está submetida. Assim, um sistema responde com uma saída $y(t)$ para uma dada entrada $x(t)$, podendo ser ilustrado pela Figura 4.11.



Figura 4.11. Representação de um sistema em malha aberta.

Diz-se que um sistema está em *malha aberta*, quando sua saída $y(t)$ não é usada para *controlar* sua entrada, ou seja, quando o cômputo do sinal de entrada $x(t)$ independe do valor de saída que o sistema apresentou. Por outro lado, se o valor da saída é monitorado e deve atingir um dado alvo, um valor desejado, é possível calcular o *erro* que a saída apresentou em relação a esta *referência*, de forma que o valor de entrada $x(t+1)$ para o sistema é corrigido na expectativa de se reduzir o erro causado pelo valor anterior de saída. Este processo configura o sistema em *malha fechada*.

A teoria de controle clássico prevê que o sistema controlado deve ser um sistema em malha fechada. Assim, os sistemas controlados possuem, além do bloco representando o fenômeno físico em questão, chamado de *Planta*, o bloco referente ao *Controlador*, que irá realizar o cálculo corretivo do valor de entrada do processo no próximo instante de tempo. O sistema em malha fechada é então representado pelo diagrama de blocos da Figura 4.12.

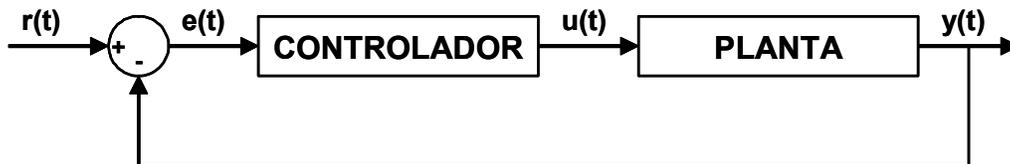


Figura 4.12. Diagrama de blocos para um sistema em malha fechada.

Além dos dois blocos, que possuem cada um sua dinâmica representada por equações diferenciais, há os sinais característicos deste tipo de sistema, a saber:

- **$r(t)$** : sinal de referência, ou *set point*. O sistema deve ser forçado a retornar o seu sinal de saída para o valor de referência por atuação do controlador. No sistema VASPS, o sinal de referência é o nível desejado de líquido na piscina;
- **$e(t)$** : sinal de erro. É a diferença entre o sinal de referência e o sinal de saída;
- **$u(t)$** : sinal de controle, ou esforço de controle. É o sinal que corrige o processo para que este retorne à referência. A variável que sofre a ação de controle é encontrada no atuador, e é chamada de variável manipulada. No VASPS, a variável manipulada é a frequência de rotação da BCS, que é diretamente relacionada com a vazão de saída de líquido.
- **$y(t)$** : sinal de saída. É um valor medido no processo que indica seu *status*. A variável medida é a variável controlada. No caso, o nível real (medido) da piscina.

O problema de controle tradicional tem o objetivo de fazer a saída $y(t)$ se comportar de uma forma desejada através da manipulação do sinal de controle $u(t)$. Esta forma desejada é ditada pela referência $r(t)$, de forma que o erro $e(t)$ seja minimizado. Na literatura também é comum encontrar referências ao problema do *regulador*, que nada mais é que realizar o problema de controle para um sinal de referência $r(t)$ constante, sendo usualmente nulo. Diversos exemplos podem ser encontrados na literatura, como Ogata (1996) e Skogestad e Postlethwaite (1996).

No caso do VASPS, a Planta é dada pela dinâmica de variação do nível da piscina, apresentada no Capítulo 3 pela Equação (3.4), que é função das vazões de entrada (golfadas) e saída (vazão da BCS) de líquido.

A vazão de entrada funciona como um distúrbio no sistema, causando oscilações no sinal de saída, $y(t)$, representado pelo nível da piscina. Este sinal de distúrbio é conjugado na dinâmica de variação do nível com a vazão de saída, que é acionada pela saída do controlador, estando, portanto, relacionada com o sinal de controle, $u(t)$. A modelagem do sistema de controle será discutida com mais detalhes no Capítulo 5 usando a modelagem física apresentada no Capítulo 3.

Em suma, o distúrbio de entrada provoca flutuações na variável controlada, que, no controle clássico, devem ser suavizadas a fim de melhorar o desempenho do sistema. Neste caso de controle clássico, o desempenho do sistema poderia ser entendido como a manutenção de um patamar de vazão restrito à garantia da eficiência de separação. No caso do sistema VASPS, onde são utilizadas também outras técnicas que não o controle clássico, como visto mais adiante, além deste objetivo de controle, outro será abordado – a minimização do esforço de controle sobre a bomba. Isso se deve ao fato de que, conforme relatado em Peixoto *et al.* (2005) e no Capítulo 3, o atuador é um componente crítico do sistema que afeta a estratégia de controle a ponto de redefinir o conceito do controlador.

A manipulação dos sinais apresentados na forma de equações diferenciais tem uma complexidade matemática inerentemente alta. O sistema controlado em si é expresso por meio da convolução das equações diferenciais do controlador e da planta, e suas soluções temporais são na forma de funções senoidais e exponenciais, que representam a oscilação da resposta $y(t)$ a uma dada excitação $u(t)$ na planta. Para evitar um esforço desnecessariamente alto, é importante realizar a transformação do domínio do tempo para algum outro que facilite a análise matemática do comportamento do sistema. Uma ferramenta adequada para esta tarefa é a Transformada de Laplace, que transfere o domínio do tempo para um domínio alternativo na variável ‘ s ’, o que

torna as funções diferenciais em funções algébricas simples. Operações de diferenciação e integração são substituídas por operações algébricas no plano complexo, e as soluções das equações algébricas em 's' fornecem as soluções transiente e estacionária das equações diferenciais por meio das transformadas inversas de Laplace.

Sabendo que um 'sistema' responde com uma saída $y(t)$ para uma excitação $x(t)$, e levando em conta que este pode ser expresso em formas algébricas simples no domínio de Laplace, define-se a Função de Transferência (FT) como a relação entre a saída de um sistema e sua entrada no domínio da variável 's'. O conceito de Função de Transferência (FT) é importante uma vez que a variável 's' representa o domínio das frequências, e conseqüentemente um dado valor de 's' possui a informação a respeito da amplitude de oscilação do sistema para uma excitação naquela frequência específica. Isso permite uma série de benefícios no tratamento de sistemas de controle:

- É possível saber as frequências em que há máxima amplitude de oscilação no sistema a partir do gráfico de resposta em frequência, que nada mais é do que o valor da FT variando-se o 's' em um intervalo. Estas frequências são identificadas como valores singulares e frequência de ressonância (ou frequência natural);
- É possível definir conceitos importantes para a realimentação em malha fechada, como largura de banda (frequências nas quais o sistema deve operar) e a amplitude dos picos das FTs (maior oscilação transiente da resposta do sistema);
- As FTs permitem avaliar a resposta da planta, controlada ou não, a uma excitação qualquer definida, tão embora não forneça nenhuma relação pertinente à estrutura física do sistema;
- A avaliação de sistemas em série é rapidamente obtida pela multiplicação das FTs, em vez das complicadas integrais de convolução necessárias no domínio do tempo;
- Os pólos e zeros, respectivamente os pontos singulares (quando a resposta tende ao infinito) e pontos nulos, do sistema aparecem explicitamente nas FTs, através das raízes dos polinômios de seu denominador e numerador.

Assim, retomando o conceito de malha de controle e tendo em mãos as FT's da Planta e do controlador, é possível exemplificar uma possível malha de controle para o VASPS segundo o

diagrama de blocos da Figura 4.13. A variável controlada (o Nível) seria então regida de acordo com a Equação (3.4), e a curva da bomba BCS, não linear, de acordo com a Equação (3.1), conforme proposto nos trabalhos de Teixeira *et al.* (2004) e Wang *et al.* (2001).

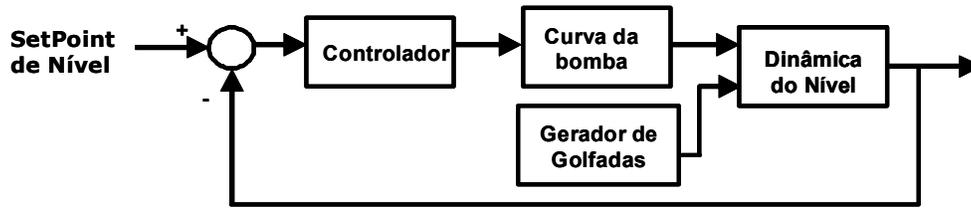


Figura 4.13. Diagrama de blocos com o detalhamento da planta do sistema VASPS.

Ainda importantes em um sistema de controle são os conceitos de parâmetros de desempenho. Antes de explicá-los, vale dizer que os controladores, cuja lógica é desenvolvida para minimizar o erro dentro de um limite de operação, são dispositivos de baixa potência que calculam as modificações necessárias para um dado erro de entrada e amplificam este sinal de saída, $u(t)$, a um nível suficientemente alto para alimentar o atuador. A partir daí, o atuador exerce uma ação sobre a planta que por sua vez responde com o sinal de saída, $y(t)$. Assim, para a avaliação dos parâmetros de desempenho, considere um sinal de resposta qualquer como o apresentado na Figura 4.14.

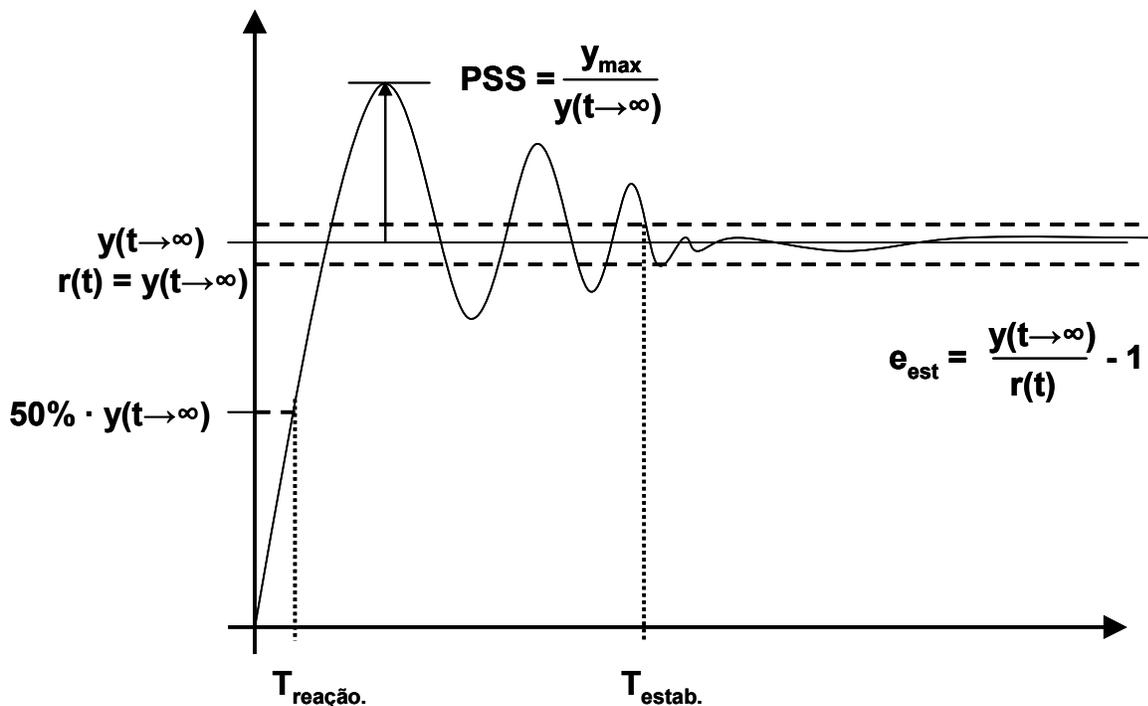


Figura 4.14. Sinal de resposta com o destaque dos parâmetros de desempenho.

Os principais critérios para se avaliar se uma resposta atendeu a um determinado nível de desempenho são expressos em função de características da resposta. Estas características também são usadas na especificação de estratégias de controle. Basicamente, as principais características avaliadas são as seguintes:

- Tempo de reação: tempo necessário para que a resposta atinja o valor de 50% do seu valor estacionário;
- Tempo de estabilização: Tempo necessário para que o valor da resposta após oscilações se encaixe no intervalo de +5% a -5% de seu valor estacionário;
- Percentual de sobresinal (PSS): valor máximo (de pico) atingido pela resposta, em porcentagem relativa ao seu valor estacionário;
- Erro estacionário: divergência em porcentagem entre o valor estacionário da resposta e o valor de referência recebido pelo sistema.

Por fim, os controladores industriais mais comumente utilizados são os PID, assim chamados por computarem as modificações necessárias para a planta de acordo com uma composição dos sinais **Proporcional** ao erro, **Integral** do erro e **Derivada** do erro. Estes controladores possuem *ganhos ajustáveis* em cada um destes três sinais, de forma a permitir o ajuste de características específicas de resposta transiente separadamente e serão apresentados com mais detalhes na próxima seção.

4.2.1 Controle PID

O controle PID se baseia em utilizar o sinal de erro calculado através da realimentação da variável controlada real na entrada do sistema, fechando a malha de controle e comparando-a com o valor de referência que deve seguir. Este erro alimenta o controlador, que integra e deriva este erro, somando estes três sinais após passarem por ganhos individuais, proporcional, integral e derivativo, conforme diagrama esquemático da Figura 4.15.

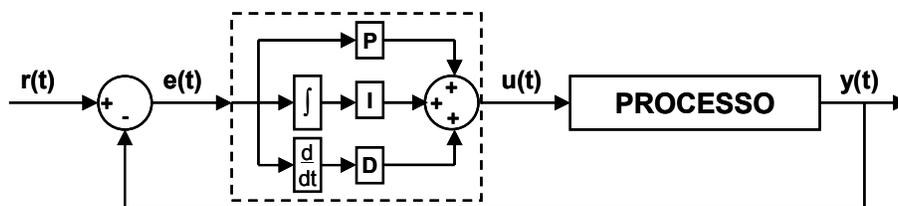


Figura 4.15. Diagrama esquemático de controle PID convencional.

O efeito dos três sinais na composição do sinal de controle $u(t)$ é suficiente para cobrir a maior parte dos problemas de controle, utilizando-se técnicas diferentes para ponderar os ganhos do controlador. Em suma, o ganho proporcional é responsável pelo tempo de resposta do sistema a uma dada entrada, provocando muitas oscilações e sobressinal no caso de este estar muito alto. O ganho integral é responsável por remover o erro estacionário do sistema, causando atrasos na resposta para ganhos altos, e o ganho derivativo remove as oscilações, amortecendo o sistema, mas causando erro estacionário se muito alto. O cálculo do sinal de controle $u(t)$ e sua FT são dados pela Equação (4.8).

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int edt + K_d \cdot \frac{de}{dt} \Rightarrow K(s) = K_p + K_d \cdot s + \frac{K_i}{s} = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (4.8)$$

O correto balanço no valor dos ganhos é chamado se *ajuste* ou *sintonia* do controlador PID, e compreende a tarefa mais difícil na configuração deste tipo de controlador. Há técnicas de projeto de controle PID, como a técnica de Ziegler-Nichols, onde um valor pré-ajustado para os ganhos é sugerido, de forma que o ajuste a ser realizado normalmente é apenas um ajuste fino em torno dos valores encontrados no projeto. No entanto, alguns controladores PID, especialmente aqueles em que se deseja alto desempenho, não apresentam o desempenho ótimo com esta técnica, exigindo um projeto analítico do controlador, realizado com base na FT do sistema e na alocação dos pólos do sistema controlado, conforme apresentado na literatura consagrada, como em Ogata (1996), onde diversos exemplos podem ilustrar o projeto de controlador PID.

Para sistemas de ordem maior é necessário o auxílio de recursos computacionais e softwares especializados, pois o cálculo analítico torna-se muito complexo, tanto para o cômputo do controlador quanto para a identificação do sistema - que compreende descobrir a FT através de técnicas experimentais. Este fator é principal demandante de uma modelagem correta e simplificada de sistemas dinâmicos para controle.

4.2.2 Controle Nebuloso

As técnicas de controle nebuloso fazem uso dos mesmos sinais convencionados para as técnicas de controle tradicional, com a exceção de que seu objetivo não necessariamente é minimizar o erro $e(t)$. O acoplamento do dispositivo de inferência nebulosa, que permite a tomada de decisões em sistemas que utilizam a lógica nebulosa, permite que o controlador trate seus sinais de entrada, ou seja, o sinal de erro, $e(t)$, do sistema, de acordo com sua lógica programada, extraíndo informações que permitem a retirada de conclusões simples sobre o *status*

do processo. Assim, é possível construir um mecanismo que funcione de forma a considerar objetivos mais flexíveis na estratégia de controle.

Os passos a serem seguidos no projeto de controladores nebulosos são basicamente os mesmos da construção de um dispositivo de lógica nebulosa, conforme apresentado anteriormente. Em essência, o controle nebuloso lança mão das variáveis lingüísticas introduzidas pela lógica nebulosa para realizar o controle de sistemas em malha fechada, permitindo que o conhecimento de especialistas seja incorporado ao controlador, melhorando o desempenho de sistemas de comportamento conhecido. Há diversas técnicas de controle nebuloso, em especial algumas utilizando o controle PID. A não ser que seja desenvolvido com o propósito contrário, o controlador nebuloso é não-linear, se adaptando melhor a plantas não-lineares e lidando eficientemente com as incertezas do modelo, caso o controlador tenha sido desenvolvido com eficácia.

A Figura 4.16. apresenta um diagrama de blocos de um sistema controlado por um controlador nebuloso com as entradas *erro* e *derivada do erro*. A integração do controlador inteligente com as entradas convencionais de um controlador PID implica em um conjunto de características peculiares para a construção das variáveis nebulosas e seus conjuntos, dado que o controle é comumente realizado com fechamento de malha e, portanto, lida com a minimização do erro em um processo qualquer.



Figura 4.16. Processo controlador por sistema nebuloso com entradas Erro e Derivada do Erro.

Uma vez que o controle nebuloso é comumente não-linear, o sinal de controle não possui uma função de transferência, de forma que o controlador pode ser projetado para se ajustar à não-linearidade da planta, quando há conhecimento sobre seu comportamento. Esta adequação se dá na forma da Base de Regras de um sistema Nebuloso, substituindo um cômputo tão analítico do sinal de controle quanto o realizado por uma equação. Assim sendo, um sistema com um controlador nebuloso teria regras referenciando o erro e suas derivações como variáveis nebulosas de entrada e o sinal de controle como variável nebulosa de saída. Com a construção de conjuntos nebulosos adequados, poder-se-ia ter uma situação como a ilustrada pela Figura 4.17, onde é apresentada uma possível aplicação da base de regras a uma determinada entrada.

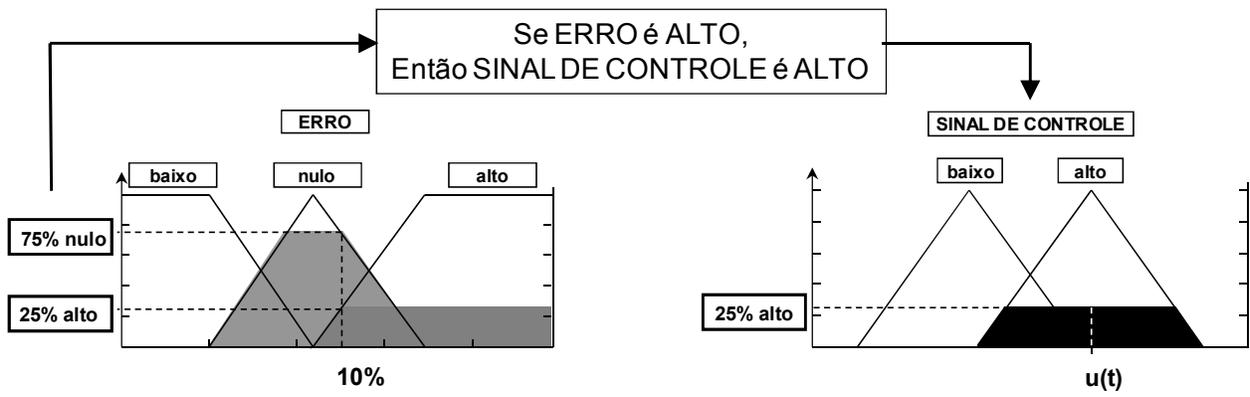


Figura 4.17. Exemplo de aplicação de sistema com controle nebuloso.

Capítulo 5

Metodologia

Este capítulo apresenta a aplicação dos conceitos explorados no Capítulo 4 para a síntese de controladores no contexto do Sistema VASPS, delimitado na modelagem física realizada no Capítulo 3. O desenvolvimento das metodologias de síntese de controladores usa duas estratégias de controle distintas abordadas nas duas seções deste capítulo. A primeira estratégia compreende melhorar o sinal de resposta através de melhorias no mesmo controlador usado em campo, limitando o escopo da metodologia à reformulação da solução existente e melhorando seu desempenho. A segunda estratégia, abordada na seção seguinte, extrapola o uso da tecnologia convencional, lançando mão de uma solução menos convencional para alcançar resultados operacionais mais significativos, trabalhando diretamente a questão da melhor manipulação do atuador, a Bomba BCS, reduzindo o esforço de controle realizado sobre esta.

5.1 Controle voltado ao Desempenho

O controle voltado ao desempenho tem o objetivo de acompanhar o sinal de referência, de forma que a saída do sistema oscile o mínimo possível. Por sua vez, a saída do sistema pode ser qualquer variável física lida através de um sensor – temperatura, pressão, vazão, rotação ou nível. No caso do VASPS, a variável de saída é o nível de líquido no reservatório interno ao separador, chamado anteriormente de ‘piscina’, de forma que mantendo um sinal de referência fixo, mantém-se também este nível o menos variante possível e por conseqüência o sistema permanece em condições operacionais previsíveis.

Esta abordagem leva à possibilidade de análise do sinal de resposta – no caso, a variação do nível – para determinar comportamentos assintóticos da resposta do sistema, ou seja, é possível afirmar sobre seu valor estacionário em regime permanente ou identificar a variação da resposta

em função de uma dada entrada conhecida. Por sua vez, o sinal de controle, ou seja, a frequência de rotação da bomba oscila de forma a corrigir os distúrbios impostos no processo, possuindo uma forma muitas vezes similar à do distúrbio de entrada.

Este tipo de abordagem é necessário quando a trajetória do sinal de saída é importante, ou quando os limites de estabilidade da saída do processo são muito rígidos. Aplicações comuns são no controle de rotação de bombas, com o intuito de mantê-las trabalhando no ponto ótimo operacional. Devido à simplicidade e à facilidade em aplicar-se a lógica a máquinas, este é o uso mais comum de controladores na indústria, tendo apresentado desenvolvimentos bastante complexos desde a concepção do controlador PID. Este mesmo já possui hoje diversas técnicas de projeto que permitam ajustar os ganhos de forma a evitar um regime transiente complicado, com atrasos na resposta ou picos de funcionamento antes da estabilização do sistema.

Aplicando então técnicas de controle nebuloso ao controlador PID clássico, apresentado no Capítulo 4, é possível sintetizar um mecanismo de ajuste dinâmico dos ganhos, modificando-os segundo condições operacionais do sistema. Esta forma de ajuste automático foi inicialmente proposta por Van Nauta Lemke e De-Zhao (1985) para melhorar o desempenho dinâmico do controlador. Muitas técnicas foram desenvolvidas neste sentido, e podem ser encontradas na literatura como ‘controle adaptativo’ (Krstic *et al.*, 1995 e Astrom e Wittenmark, 1994), ‘PID com *gain scheduling*’ (Zhao *et al.*, 1995) ou ‘*self tuning* PID’ (Astrom e Wittenmark, 1973 e Clarke e Gawthrop, 1975).

A aplicação desta tecnologia de auto-ajuste no sistema VASPS é apresentada na próxima seção sob a nomenclatura de *controle híbrido Fuzzy-PID*, uma vez que mescla a técnica clássica de controle PID com conceitos de lógica nebulosa. Outras formas desta mesma combinação podem ser encontradas na literatura.

5.1.1 Controle Híbrido Fuzzy-PID

O modelo adaptado de Van Nauta Lemke e De-Zhao (1985) consiste na supervisão de um sistema de controle PID por um controlador inteligente hierarquicamente superior. Isto tem objetivo de propiciar um aumento do desempenho na resposta possibilitando melhorar a eficiência operacional, bem como permitir a concepção de um controlador não-linear, capaz de seguir um sistema também não-linear. Conceitualmente, ao aplicar o controlador inteligente no nível de supervisão, o controle efetivo do processo permanece sendo o Controlador PID, não

havendo intervenção direta na malha de controle, mas com a diferença que o PID será ajustado dinamicamente de acordo com o *status* do processo monitorado.

Considerando o modelo da planta apresentado no Capítulo 3, foi elaborado um controle PID clássico para que o módulo supervisor pudesse ser aplicado sobre este. Utilizando técnicas comuns de projeto de controladores PID, foi construído o controlador apresentado na Figura 5.1, que possui seus ganhos conforme apresentado na Equação (5.1).

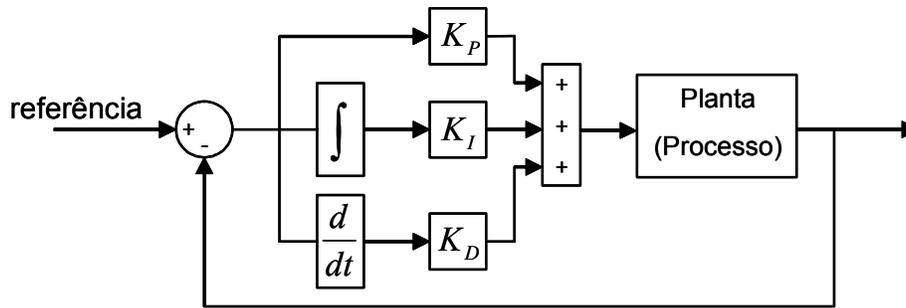


Figura 5.1. Diagrama de Blocos do Controlador PID.

$$\left. \begin{array}{l} K_p = 10 \\ K_i = 0.001 \\ K_d = 100 \end{array} \right\} \rightarrow K(s) = \frac{100s^2 + 10s + 0.001}{s} \quad (5.1)$$

Com estas constantes, pode-se calcular a FT do controlador, conforme apresentado na Equação (5.2), verificando os pólos do controlador, segundo a Equação (5.3).

$$H(s) = \frac{K(s) \cdot P(s)}{1 + K(s) \cdot P(s)} = \frac{(100s^2 + 10s + 0.001) \cdot 3.011}{s^2 + (100s^2 + 10s + 0.001) \cdot 3.011} = \frac{(100s^2 + 10s + 0.001) \cdot 9.9e^{-3}}{s^2 + 9.9e^{-2}s + 9.9e^{-6}} \quad (5.2)$$

$$pólos : [-1, -9.9e^{-2}] \quad (5.3)$$

Assim, o diagrama de blocos para o sistema com o módulo supervisor é apresentado na Figura 5.2, onde a estrutura básica do controlador foi detalhada, e um bloco foi usado para representar o processo.

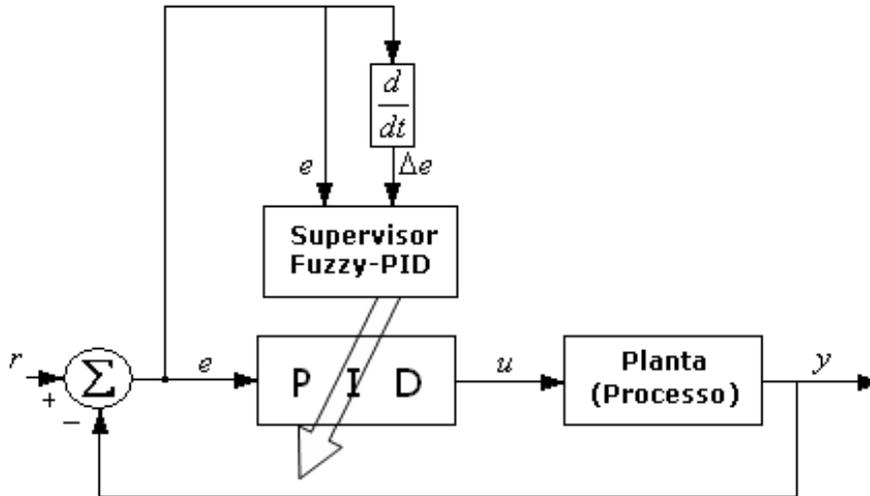


Figura 5.2. Diagrama de blocos do controlador Supervisorio, adaptado de Van Nauta Lemke e De-Zhao (1985).

O controlador inteligente, inserido no bloco de supervisão da Figura 5.2, tem como objetivo reforçar o sinal de controle através do aumento do valor das constantes do PID em uma dada situação de condição operacional definida na parametrização do controlador nebuloso. Esta condição operacional, por ser definida pela Base de Regras do comportamento do controlador nebuloso, ocorre de acordo com a parametrização escolhida pelo projetista. Por exemplo, para um dado processo não-linear, $P(s)$, a saída do sistema, dada pela Equação (5.4), terá comportamento próximo ao linear desejado apenas se o sinal de controle $u(T)$ for também não-linear e compensando este comportamento.

$$y(T) = P(s) \cdot u(T) \quad (5.4)$$

O diagrama do controlador FPID, apresentado na Figura 5.3, é o ponto de partida para a especificação. A notação adotada para os sinais é a seguinte:

- e : erro;
- ie : integral do erro;
- ce : mudança no erro (proveniente do inglês *change in error*);
- x : erro relativo;
- ix : integral relativa do erro;
- cx : mudança relativa do erro.

Além disso, a saída do sistema são variações nas constantes, ΔP , ΔI e ΔD , que são somadas às constantes iniciais do sistema, P_0 , I_0 e D_0 , de forma a compor a constante final que opera no sistema variando conforme o status corrente. Estas saídas do sistema possuem cada uma seus

conjuntos nebulosos, conforme apresentado no Capítulo 4. Esta formulação apresentada anteriormente é encontrada na literatura citada rotulando este sistema nebuloso como sendo do tipo ‘Mamdani’.

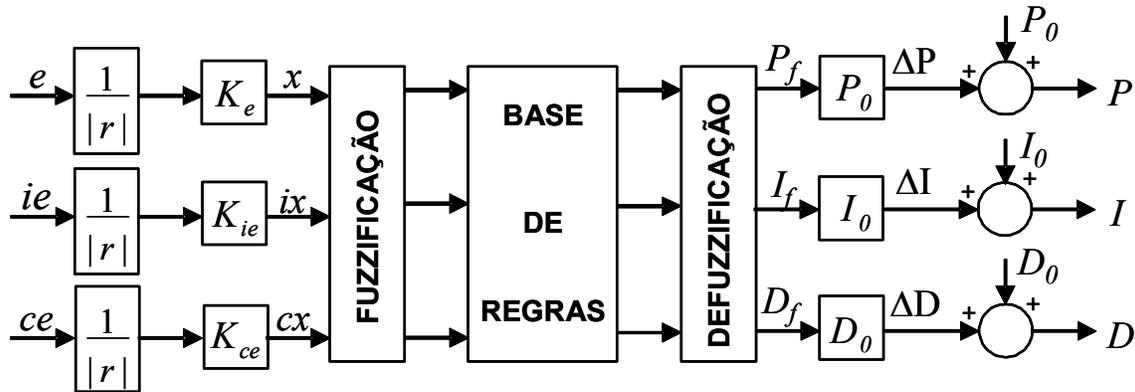


Figura 5.3. Detalhamento do controlador FPID do Modelo Supervisorio.

O controlador integrado e detalhado é apresentado na Figura 5.4, onde é possível notar o supervisor atuando diretamente sobre as constantes do controlador PID, respeitando o conceito de não-interferência direta no sinal de controle.

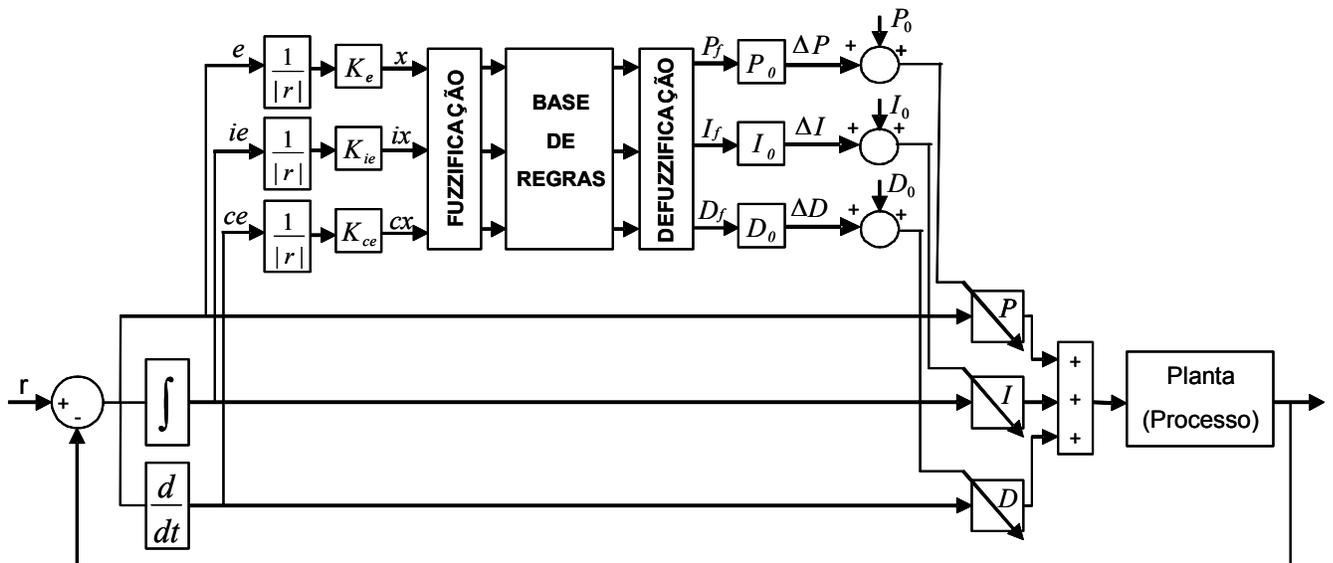


Figura 5.4. Diagrama de blocos do controlador FPID.

Através do diagrama completo da Figura 5.4 é possível identificar o cálculo para as variáveis de entrada, de forma que o erro e , a mudança no erro, ce , e a integral do erro, ie , são dadas respectivamente pelas Equações (5.5), (5.6) e (5.7).

$$e(T) = y(T) - r \quad (5.5)$$

$$ce(T) = \frac{e(T) - e(T-1)}{T} \quad (5.6)$$

$$ie(T) = \sum_1^n e_i(T) \quad (5.7)$$

Da mesma forma, as saídas do supervisor, ou seja, as constantes P , I , e D , são dadas respectivamente pelas Equações (5.8), (5.9) e (5.10), e as entradas normalizadas x , cx e ix , dadas pelas equações (5.11), (5.12) e (5.13).

$$P = P_0 + \Delta P \quad (5.8)$$

$$I = I_0 + \Delta I \quad (5.9)$$

$$D = D_0 + \Delta D \quad (5.10)$$

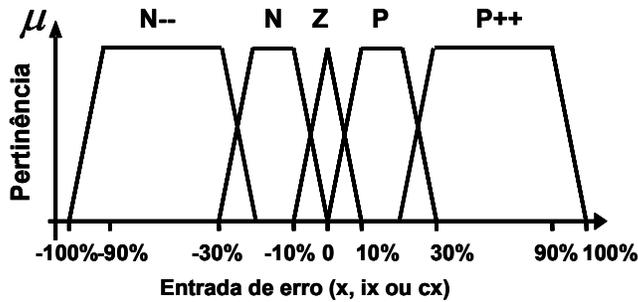
$$x(T) = K_e \cdot \frac{e(T)}{r} \quad (5.11)$$

$$cx(T) = K_{ce} \cdot \frac{ce(T)}{r} \quad (5.12)$$

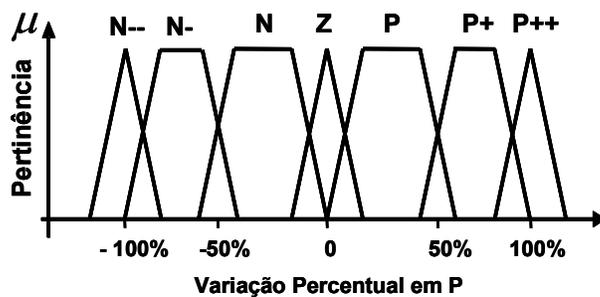
$$ix(T) = K_{ie} \cdot \frac{ie(T)}{r} \quad (5.13)$$

O sinal de controle resultante do modelo tem a mesma equação do controle PID, mas com a diferença de que os termos relativos aos ganhos possuem uma não-linearidade intrínseca, referentes aos termos ΔP , ΔI e ΔD , que podem ser modelados para atuar diferentemente com a variação dos componentes de erro. Estes por sua vez, representados pelas variáveis x , cx e ix , são classificados durante o processo de fuzzificação com uma pertinência dada pelos conjuntos nebulosos. Um exemplo de como a Lógica Nebulosa pode ser aplicada é apresentada na Figura 5.5, para um processo onde a entrada assume valores relativos no intervalo $[-1,1]$ e a saída imprime variações de -100% até $+100\%$ no valor original da constante.

a) Conjuntos Nebulosos de Entrada



b) Conjuntos Nebulosos da Saída P_f



LEGENDA

- N--: Muito Negativo
- N-: Negativo Intermediário
- N: Pouco Negativo
- Z: Zero
- P: Pouco Positivo
- P+: Positivo Intermediário
- P++: Muito Positivo

c) Conjuntos Nebulosos das Saídas D_f e I_f

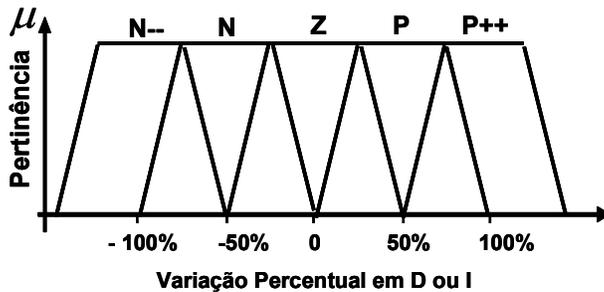


Figura 5.5. Conjuntos nebulosos para o controlador FPID.

Na Figura 5.5 (a), é apresentada a função de pertinência modelada para as três variáveis de entrada, x , ix e cx , de forma que em torno do zero as variáveis assumem valores de pertinência nos conjuntos “Zero” (Z), “Pouco Negativo” (N) e “Pouco Positivo” (P) e, ao passo que vão aumentando ou diminuindo assumem pertinências maiores nestes últimos dois conjuntos até ativarem os conjuntos nebulosos “Muito Negativo” (N--) ou “Muito Positivo” (P++). Com isto, é possível criar regras distintas de acionamento das variáveis de saída para quando a resposta transiente estiver muito longe da estabilização (por exemplo, erro normalizado x “Muito Positivo” (P++) ou “Muito Negativo” (N--), ou uma combinação de erro x “Pouco Positivo” (P) com derivada “Muito Positiva” (P++) ou “Pouco Positiva” (P) e outras regras para alterar os valores das constantes P, I e D quando o sistema estiver perto da estabilização (por exemplo,

quando o erro for “Zero” (Z), ou quando houver uma combinação de erro “Pouco Positivo” (P) com a derivada “Pouco Negativa” (N) ou com a Integral “Zero” (Z).

Já nos itens (b) e (c) da Figura 5.5, são apresentadas as funções de pertinência para as variáveis de saída, que são as variações percentuais impressas às constantes do controlador PID. Neste caso, a construção dos conjuntos nebulosos para a variável de saída ΔP é diferente da construção das outras duas, possuindo o conjunto nebuloso “Zero” (Z) e os conjuntos nebulosos “Muito Positivo” (P++) e “Muito Negativo” (N--) mais estreitos. No caso do primeiro dos conjuntos, isso se faz necessário pois na composição do sinal de controle a contribuição do sinal de erro normalizado x torna-se muito pequena devido à redução do erro na estabilização, de forma que se faz necessário imprimir variações rápidas na constante P para obter-se um sinal de controle mais efetivo. Já na caso dos últimos dois conjuntos citados, isso ocorre pois nas saídas referentes aos ganhos D e I é interessante que haja um reforço maior nestas constantes devido a estas serem os valores ativos mais representativos no período de estabilização, de forma que a grande área dos conjuntos “Muito Negativo” (N--) e “Muito Positivo” (P++) destas variáveis influencia na ponderação dos conjuntos no processo de defuzzificação.

Finalmente, estes conceitos devem estar claros e definidos pela Base de Regras, de forma que percebe-se que a criação dos conjuntos nebulosos e a definição destas regras não são totalmente independentes, sendo construídas uma em função da outra, e ambas de acordo com o comportamento desejado para o controlador. Usualmente, poder-se-ia desejar um comportamento linear da saída, o que facilitaria a modelagem matemática e a avaliação de resultados. No entanto, o objetivo não é simplificar a álgebra do controlador e sua função de transferência, mas sim buscar o melhor resultado que se possa extrair do sistema.

No caso em questão, onde o objetivo é manter o nível da piscina do VASPS o mais próximo possível do valor de referência – um requisito claramente voltado para o desempenho do controlador, mantendo o valor de referência na saída – há algumas adaptações necessárias considerando os equipamentos usados em campo e os critérios de desempenho. O primeiro comportamento desejado diz respeito à atuação do controlador em momentos diferentes do regime transiente (a saber: início de um grande distúrbio *versus* período de estabilização), enquanto que o segundo diz respeito à restrição física de vazão sempre positiva, de forma que as seguintes melhorias podem ser incluídas na Base de Regras frente ao controlador PID puramente matemático:

Caso 1) Reforçar o sinal de controle para pequenos valores de erro a fim de aumentar a taxa de correção próxima à estabilização;

Caso 2) Eliminar contribuições negativas das componentes do erro na composição do sinal de controle, evitando que sejam necessários valores negativos de correção do sistema (que implicariam em saturação do controlador no sistema PID).

No primeiro caso, lembrando-se da composição do sinal de controle dada pela Equação (5.14), é possível reforçar o sinal de controle quando as componentes do erro, $e(t)$, $ie(t)$ e $ce(t)$, assumirem valores de amplitude baixa (entrada igual a ‘Z’, ‘N’ ou ‘P’) devido à estabilização do sinal de resposta, através do aumento das constantes P , I e D .

$$u(t) = P \cdot e(t) + I \cdot ie(t) + D \cdot ce(t) \quad (5.14)$$

No segundo caso, o desempenho é melhorado apenas quando o atuador do sistema tem relevância em apenas um sentido, como por exemplo no VASPS, onde a BCS deve manter um dado nível, atuando apenas com vazão de saída positiva para níveis altos, ou simplesmente não atuando para níveis baixos. Além disso, eliminar contribuições negativas pode vir a ter um impacto significativo quando o sistema sem a correção gera sinais de erro grandes o suficiente para saturar o atuador, atrasando a resposta e piorando o regime transiente. Com isso, para a efetivação de um sinal de controle apenas em um sentido, é realizado um acréscimo de um delta de -100% (saída igual a ‘N--’) quando os sinais de erro forem negativos (entrada igual à ‘N’ ou ‘N--’).

Embora o sistema proposto possua três entradas e três saídas, a Base de Regras é dividida em três matrizes correspondentes a cada variável de saída, de forma simplificar a verificação da saída. Assim, cada uma das saídas será função de apenas duas variáveis de entrada, colocadas na linha e na coluna da matriz.

Para melhor ilustrar a Base de Regras, segue-se a notação da Tabela 5.1, que apresenta um rótulo numérico para cada conjunto nebuloso das variáveis de saída P_f , I_f e D_f . Estes rótulos apresentam também uma casa decimal, utilizada para representar o grau de ativação da regra, e cujo valor é o complemento do número apresentado nesta casa decimal.

Tabela 5.1. Representação dos conjuntos nebulosos para a base de regras.

Significado	Sigla	Pf	Df, If
Muito Negativo	N--	1,0	1,0
Negativo Médio	N-	2,0	-
Pouco Negativo	N	3,0	2,0
Zero	Z	4,0	3,0
Pouco Positivo	P	5,0	4,0
Positivo Médio	P+	6,0	-
Muito Positivo	P++	7,0	5,0

Exemplificando, caso uma célula da matriz que representa a base de regras apresente o valor 4.0, se a variável de saída analisada corresponder à saída P_f , o conjunto nebuloso ativado será o 'Z'. De outra forma, se corresponder às saídas D_f ou I_f , o conjunto ativado será o 'P'. Outro exemplo ocorre para o caso do valor ser 6.3, o que significa que a saída P_f será ativada com 70% de pertinência no 'P+' (6.0) e 30% no 'P++' (7.0).

Com isso, a Base de Regra para os dois casos anteriormente abordados pode ser observada na Tabela 5.2, onde é possível notar que o reforço para a constante P_f é aplicado quando o erro é pequeno, mas diferente de zero, pois quando o erro é pequeno e sua variação é nula, o sinal se estagnou naquele valor, devendo ser reforçado. Já o reforço das constantes I_f e D_f ocorre quando tanto o erro quanto sua integral ou derivada se aproximam do zero, assumindo um valor ainda maior quando exatamente em zero.

Tabela 5.2. Base de regras do controlador supervisor FPID

Pf		Variação do Erro					If		Integral do Erro					Df		Variação do Erro				
		N--	N	Z	P	P++			N--	N	Z	P	P++			N--	N	Z	P	P++
Erro	N--	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	Erro	N--	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	Erro	N--	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	N	4.0	3.0	1.7	3.0	4.0		N	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0		N	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0
	Z	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0		Z	3.0	4.0	5.0	4.0	3.0		Z	3.0	4.0	5.0	4.0	3.0
	P	4.0	5.0	6.3	5.0	4.0		P	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0		P	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0
	P++	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0		P++	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0		P++	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

Na Tabela 5.2 é possível notar que o reforço para a constante P_f é dado quando o erro é pequeno, mas diferente de zero, pois quando o erro é pequeno e sua variação é nula, o sinal se estagnou naquele valor, devendo ser reforçado. Já o reforço das constantes I_f e D_f ocorre quando tanto o erro quanto sua integral ou derivada se aproximam do zero, assumindo um valor ainda maior quando exatamente em zero.

Por sua vez, a Tabela 5.3 apresenta a Base de Regras para um sistema onde não se desejam contribuições negativas no sinal de controle, ou contribuições quaisquer quando o erro do sistema esteja abaixo de zero, indicando que este ainda não atingiu seu status operacional desejado.

Tabela 5.3. Base de regras do controlador supervisor FPID

Pf		Variação do Erro					If		Integral do Erro					Df		Variação do Erro				
		N--	N	Z	P	P++			N--	N	Z	P	P++			N--	N	Z	P	P++
Erro	N--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Erro	N--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Erro	N--	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	N	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		N	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		N	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0		Z	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0		Z	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0
	P	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0		P	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0		P	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0
	P++	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0		P++	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0		P++	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0

Estes modelos para a Base de Regra ilustram dois casos específicos gerados a partir de necessidades provenientes de um sistema. Outras necessidades poderiam ser identificadas a fim de gerar as regras adequadas a tratar com o problema. Por fim, os resultados para o modelo FPID são apresentados no Capítulo 6 e os modelos e resultados para modelos derivados do FPID são apresentados no Apêndice A.

5.2 Controle voltado à Minimização do Esforço

Em face aos problemas onde o componente crítico do sistema é o atuador, normalmente devido ao seu elevado custo – que pode também ser traduzido como baixo tempo médio entre falhas (MTBF) – é desejável que este permaneça com o mínimo de utilização possível, ou com o mínimo de variações em sua condição de trabalho possíveis, permanecendo no ponto ótimo de operação. Isso acontece no sistema VASPS, onde o motor elétrico da BCS é acionado por um inversor que permite maior flexibilidade através do uso de uma gama de rotações diferentes, mas que acarreta em trabalho fora do ponto ótimo.

Visando a redução do esforço ao qual a bomba está submetida, foram desenvolvidos controladores especificamente voltados ao tratamento do sinal de controle, de forma que este permaneça com poucas alterações, e a saída do sistema oscile dentro da faixa de estabilidade prevista para o modelo dinâmico do processo, conforme definido na seção 3.1.2. Assim, o comportamento desejado para o sistema controlado é apresentado na Figura 5.6, e será o objetivo de controle usado no projeto dos controladores.

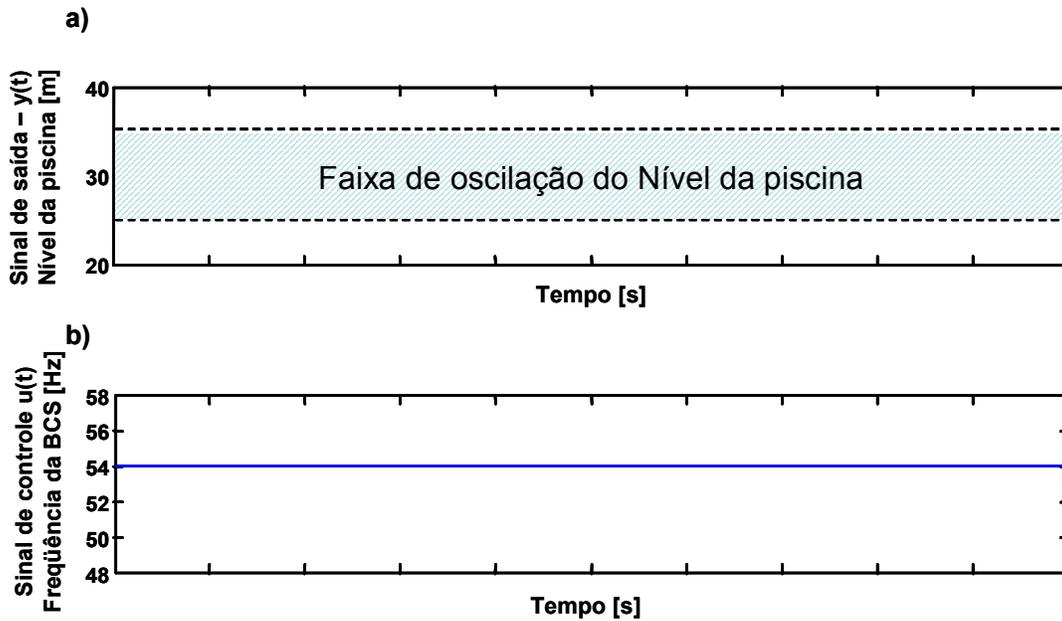


Figura 5.6. Comportamento desejado para o sistema voltado à redução do esforço de controle.

No VASPS a redução do esforço de controle pode prover um menor custo ao processo, uma vez que o atuador é o componente crítico, em detrimento do melhor desempenho possível para o sistema. Este compromisso entre desempenho e esforço de controle pode ser parametrizado de acordo com a faixa de estabilidade do processo físico controlado, respeitando seus limites operacionais e utilizando a resposta do sistema para avaliar parâmetros que indiquem quando a alteração no sinal de controle é realmente necessária. Serão tratados quatro diferentes modelos de controladores inteligentes, que permitem este tipo de inferência.

5.2.1 Monitoramento da Média Móvel

Com o objetivo de avaliar a tendência do comportamento do sinal, este controlador realiza uma média móvel do erro de acordo com uma janela de tempo parametrizada pela variável n , de forma que o erro médio do processo, calculado pela Equação (5.15), faz o papel de ajustar o tempo de reação do sistema à taxa desejada de correção, em função da variação do sinal de saída. Também é possível realizar o cálculo do sinal de média móvel pela ponderação do sinal de erro com um perfil diferente do uniforme, como, por exemplo, com uma média ponderando as leituras mais recentes com maior peso.

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n}^t e(t) \quad (5.15)$$

Assim, em sistemas onde o sinal de controle deve permanecer com o mínimo de variações possível, a alteração do sinal de controle $u(t)$ se dará apenas mediante uma mudança significativa da condição de operação, reduzindo a sensibilidade a oscilações curtas que podem não implicar na necessidade de alteração do sinal de controle. Uma alteração de comportamento será identificada, portanto, com a variação de magnitude da média móvel, que deve possuir baixa sensibilidade a oscilações bruscas, refletindo a tendência real do processo.

Para o conceito de média móvel funcionar no contexto de minimização do esforço de controle, é necessário que este esforço seja constante em torno de pontos de operação do sistema, de forma que a mudança do sinal de controle indique uma correção do sistema para operar em outro ponto. Assim, a leitura de erro médio é utilizada como entrada para um mecanismo de inferência nebulosa, um controlador nebuloso, que é encarregado de dividir os parâmetros de operação do processo em pontos de operação, criando regiões de trabalho onde a média possa oscilar com alguma liberdade. Ademais, faz-se necessária a manutenção da leitura do erro instantâneo, uma vez que este deve ser considerado como única alternativa de correção caso o sistema esteja exposto a oscilações bruscas que possam levar as condições de operação para uma região crítica que necessite de correção imediata. Esta alternativa é uma segurança contra falhas em sistemas de baixa constante de tempo. Assim, o diagrama de blocos para este controlador, aplicado ao sistema VASPS é apresentado na Figura 5.7.

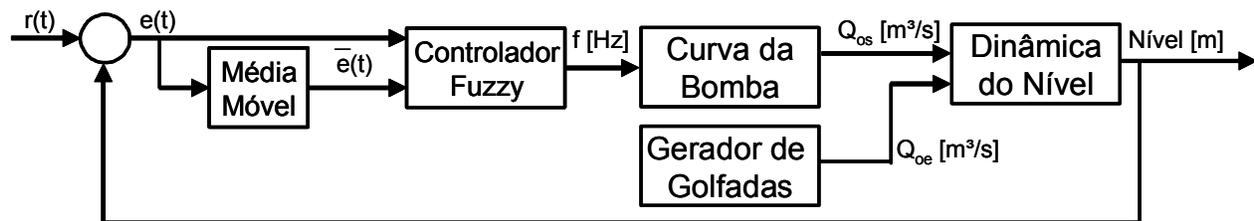


Figura 5.7. Diagrama de blocos para o controlador Média Móvel aplicado ao VASPS.

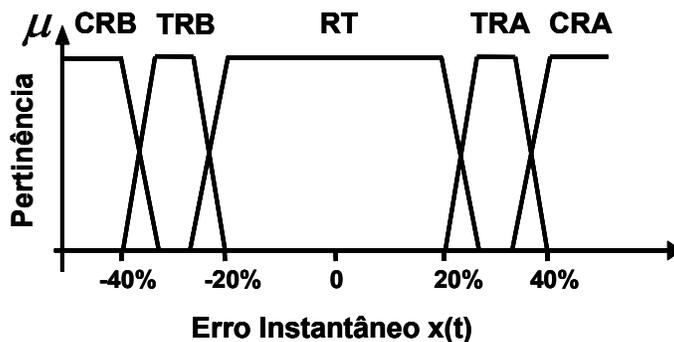
As funções de pertinência do controlador nebuloso devem contemplar a região de trabalho, as regiões críticas de correção próximas aos limites da faixa de trabalho, e regiões de transição entre estas. Além disso, é recomendável que as entradas do mecanismo de inferência nebulosa sejam normalizadas em torno do zero, através do cálculo dado nas Equações (5.16) e (5.17), de forma a facilitar análises de sinal.

$$x(t) = \frac{e(t) - r(t)}{e(t)} \quad (5.16)$$

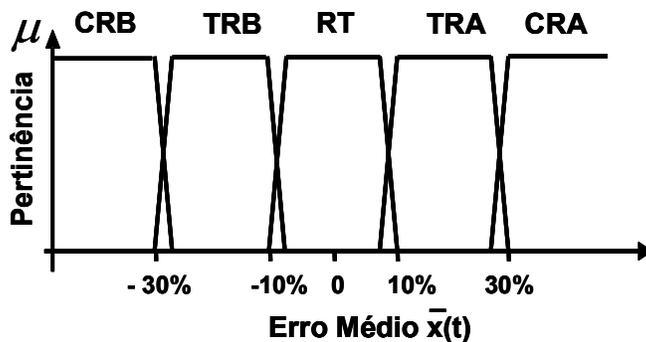
$$\bar{x}(t) = \frac{\bar{e}(t) - r(t)}{\bar{e}(t)} \quad (5.17)$$

De forma a atender a faixa de estabilidade do VASPS proposta no início deste capítulo, será considerado que um erro de 25% em relação à referência de 30 metros (7,5 metros para mais e para menos) é uma margem segura de trabalho, de forma que fora deste intervalo a estabilidade não pode ser garantida. Assim, definindo a zona crítica de atuação a faixa entre o erro de 20% e o de 25%, a região de trabalho para a rotação ótima da bomba se dá na faixa de -10% a +10%. Com estes valores são construídos os conjuntos nebulosos da Figura 5.8, relacionando a rotulação das faixas de erro com os conjuntos nebulosos.

a) Conjuntos Nebulosos da entrada $x(t)$



b) Conjuntos Nebulosos da entrada $\bar{x}(t)$



LEGENDA

CRB: Região Crítica Baixa
TRB: Região de Transição Baixa
RT: Região de Trabalho
TRA: Região de Transição Alta
CRA: Região Crítica Alta

Figura 5.8. Funções de pertinência para o controlador Média Móvel aplicado ao VASPS.

Por fim, a base de regras para este controlador é do tipo Sugeno, usando a formulação do tipo ‘Constante’ para as funções de saída, como apresentado no Capítulo 4, ativando para a saída $u(t)$ um valor de frequência com que o inversor aciona a bomba. O valor final de saída é ponderado segundo o grau de ativação de cada regra ativa, μ_k . Assim, os valores das saídas para correspondente a cada regra são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Base de regras do controlador Monitoramento da Média Móvel.

Rótulo	Sigla	Valor da saída [Hz]	
		Erro Instantâneo	Erro Médio
Região Crítica Baixa	CRB	48	48
Região de Transição Baixa	TRB	50	52
Região de Trabalho	RT	-	54
Região de Transição Alta	TRA	58	56
Região Crítica Alta	CRA	60	60

As regras representadas pela Tabela 5.4 não possuem associação entre as variáveis de entrada, sendo que cada regra ativa um valor de saída a ser computado através da formulação apresentada para regras do tipo Sugeno no Capítulo 4. Assim, este sistema apresenta 9 regras de acionamento da resposta, que ativam, cada uma, um valor constante para a variável de saída, que são então ponderadas pelo grau de ativação do conjunto nebuloso de entrada, μ_k . Considerando todas as regras com peso 1, são 4 regras para o erro instantâneo normalizado (regra 1 – saída 48 Hz, regra 2 – saída 50 Hz, regra 3 – saída 58 Hz e regra 4 – saída 60 Hz) e 5 regras para o erro médio normalizado (regra 5 – saída 48 Hz, regra 6 – saída 52 Hz, etc).

Como exemplo, considere a entrada de erro instantâneo normalizado, $x(t)$, igual a -15%, e a entrada de erro médio normalizado, $\bar{x}(t)$, igual a -9%. A primeira condição ativa o erro instantâneo no conjunto nebuloso RT, não acionando nenhuma regra, enquanto que a segunda condição aciona o erro médio nos conjuntos TRB e RT, acionando as regras 6 e 7. Assim, estas entradas geram as saídas apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Aplicação da Base de Regras usando entradas associativas.

Variável de Entrada	Conjunto ativo	μ_k	Regra	Peso	Variável de saída	Valor acionado	Grau de ativação
<i>Erro instantâneo</i>	RT	$\mu_1=1,0$	-	1	<i>Rotação da Bomba</i>	-	0
<i>Erro médio</i>	TRB	$\mu_2=0,5$	6	1	<i>Rotação da Bomba</i>	52 Hz	0,5
<i>Erro médio</i>	RT	$\mu_3=0,5$	7	1	<i>Rotação da Bomba</i>	54 Hz	0,5

O sinal de controle pode então ser calculado pela ponderação das saídas ativas pelo grau de ativação:

- $f = 52 \cdot \frac{1}{2} + 54 \cdot \frac{1}{2} = 53 \text{ Hz}$

5.2.2 Classificador de Regiões

Com o intuito de uma melhor manipulação da região de trabalho, limitada acima e abaixo, este modelo trata o sinal de entrada com uma função de classificação que retorna uma pertinência relativa à distância entre o limite de estabilidade mais próximo (superior ou inferior) e o valor da referência. Esta abordagem permite uma livre variação do sinal de referência $r(t)$ dentro da região de trabalho do controlador, de forma que as funções de classificação tomam novos coeficientes, que corrigem a distância entre os limites de estabilidade para o valor da nova referência. A Figura 5.9 ilustra a construção das funções de classificação de acordo com a referência, e a correção desta após a variação do *set point* ao longo do processo.

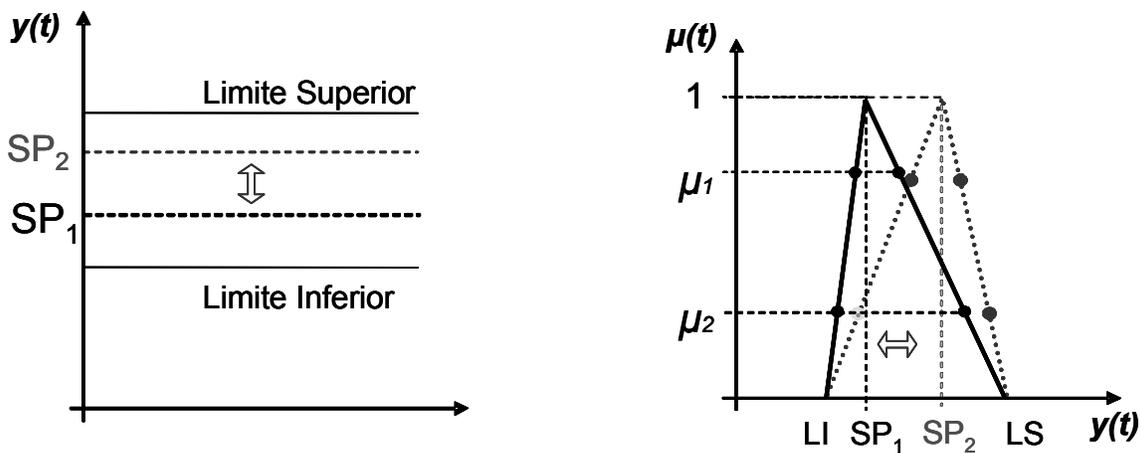


Figura 5.9. Ilustração da função utilizada pelo Classificador.

Este conceito permite a parametrização da região de trabalho, uma vez que a entrada é normalizada no intervalo $[-1,1]$, e a manipulação do valor de *set point*, o que apresenta limitações no modelo Monitoramento da Média Móvel. Com a entrada normalizada, pode-se utilizar a idéia de valor de pertinência para esta, dada pela Equação (5.18), de forma que sua magnitude expresse a proximidade à instabilidade ou à referência. Além disso, a inclinação da função de classificação provê uma rápida transição desta pertinência entre estes dois casos.

$$\mu(t) \begin{cases} \frac{y(t) - LI}{r(t) - LI}, \mu(t) < r(t) \\ \frac{y(t) - LS}{LS - r(t)}, \mu(t) \geq r(t) \end{cases} \quad (5.18)$$

Isso posto, é possível também resolver o problema de minimização das variações no acionamento através da atuação restrita à proximidade da região crítica. Com isso em mente, é

possível utilizar o classificador para monitorar os limites e estabilidade, e utilizar um mecanismo de inferência nebulosa, conforme proposto na Figura 5.10, para calcular a rotação nas proximidades da região crítica, realizando correções mais efetivas.

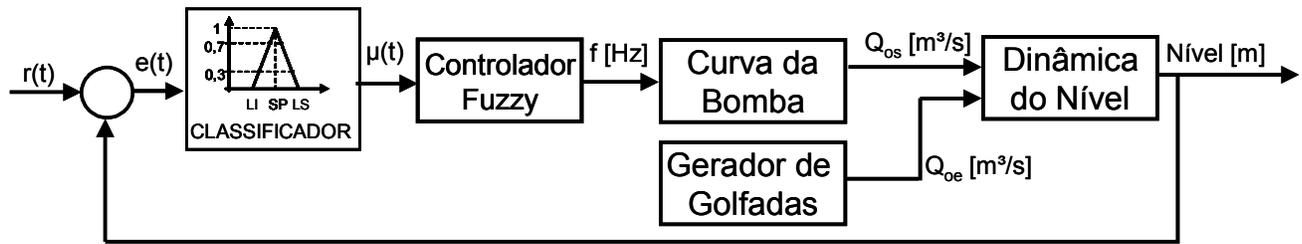


Figura 5.10. Diagrama de blocos para o controlador Classificador de Regiões aplicado ao VASPS.

O sinal de controle fora da região de estabilidade é configurado para o valor crítico factível pelo atuador, de forma a imprimir a maior correção. Ao adentrar a região de estabilidade, acionamentos sucessivos de freqüências paulatinamente menores permitem a transição suave para a rotação ótima até que certa distância do limite de estabilidade seja atingida. Essas sucessões de acionamento servem também para a aproximação da instabilidade.

Para a seleção das rotações na região próxima à instabilidade, uma série de conjuntos nebulosos é inserida nas faixas críticas, conforme apresentado na Figura 5.11. Neste exemplo, os conjuntos são rotulados de acordo com a intensidade alta ou baixa que a pertinência atinge, e o valor da saída pode ser definido para cada conjunto nebuloso, uma vez que também são do tipo Sugeno e com a formulação das funções de saída do tipo ‘Constante’.

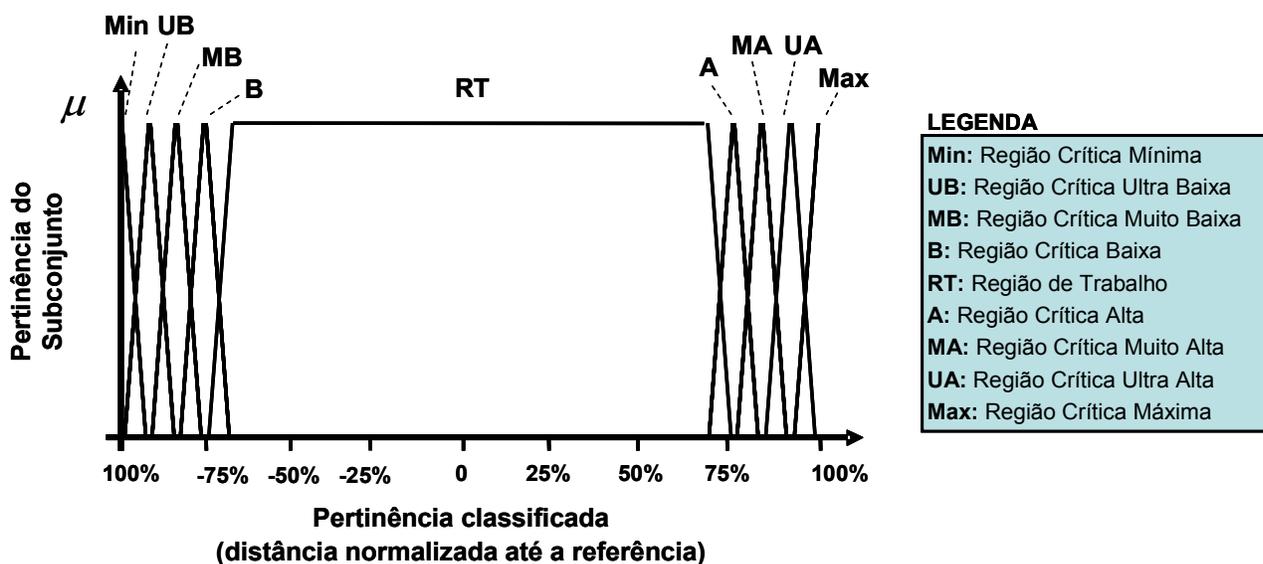


Figura 5.11. Conjuntos nebulosos de entrada para o Classificador de Regiões.

Tomando o limite inferior para o nível, que causaria quebra na bomba, como LI de 20 metros, e o superior, que comprometeria a pressão de separação, como LS de 40 metros, pode-se definir a base de regras pela Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Base de regras do controlador Classificador por Regiões.

Sigla	Rótulo	Valor da saída [Hz]
Pertinência Mínima	Mín	48
Pertinência Ultra Baixa	UB	49
Pertinência Muito Baixa	MB	51
Pertinência Baixa	B	53
Região de Trabalho	RT	54
Pertinência Alta	A	55
Pertinência Muito Alta	MA	57
Pertinência Ultra Alta	UA	59
Pertinência Máxima	Máx	60

A Tabela 5.6 pode ser utilizada da mesma forma que a Tabela 5.4, onde um exemplo é dado. A diferença reside no uso de apenas uma única variável de entrada.

5.2.3 Classificador com Média

Considerando os dois modelos voltados à minimização do esforço de controle apresentados, cabe uma análise quanto às principais características encontradas:

- Tempo de reação;
- Avaliação de tendência;
- Monitoração dos limites de estabilidade;
- Oscilação na transição entre regiões de trabalho;
- Insensibilidade a variações na referência;
- Sensibilidade a oscilações bruscas.

Ambos os modelos apresentados anteriormente apresentam formas de manipulação do tempo de reação do sistema, uma vez que há a avaliação de tendência, seja pela média móvel realizada, que permite concluir sobre incrementos sustentados ou transientes, seja pela classificação da entrada em uma pertinência normalizada que indica a proximidade com a região crítica. No entanto, em algumas simulações que serão apresentadas no Capítulo 6, foram percebidos alguns efeitos colaterais que podem ser relevantes para um dado sistema.

O primeiro deles é a oscilação do sinal de controle entre duas regiões de trabalho, quando um distúrbio no sistema possui uma maior duração, o que pode não apresentar problemas em

campo no caso de a constante de tempo do sistema ser muito alta ou da instrumentação apresentar rampas de aceleração para a mudança do ponto de trabalho do atuador. O segundo, diz respeito ao conceito de regiões de trabalho, que implica em uma menor manipulação do sistema através do sinal de referência. Ora, se o sistema pode variar livremente em torno da referência, é de esperar que este não acompanhe o sinal fielmente. A última consideração se dá em torno de distúrbios de maior amplitude, que afetam o sistema com média móvel devido à leitura da variável instantânea, bem como afetam também o sistema com classificador, fazendo a pertinência variar muito bruscamente. Estas condições, embora esperadas, podem apresentar riscos ao atuador, que deve ser capaz de atuar em seus limites, mas não deve ser exposto a uma mudança brusca de atuação.

Nesse contexto, é proposto um conceito de controlador que mescla ambos os conceitos apresentados anteriormente, de forma a reduzir o efeito de grandes distúrbios através da realização de uma média móvel sobre a pertinência classificada, como também limitar a faixa de estabilidade em regiões de trabalho que permitam acompanhar a ordem de grandeza do sinal de referência, ainda permitindo oscilação, mas em torno de mais pontos. Adicionalmente, uma vez que o controlador proposto é mais refinado, sendo também mais sensível às mudanças bruscas do sinal de controle – mudanças estas que são minimizadas com a estratégia adotada nesta versão – faz-se necessário adicionar um filtro de sinal entre o controlador e o atuador, simulando os efeitos de saturação de sinal, quantização e rampa máxima de acionamento, presentes no CLP industrial. O diagrama de blocos para a malha de controle em questão é apresentado na Figura 5.12.

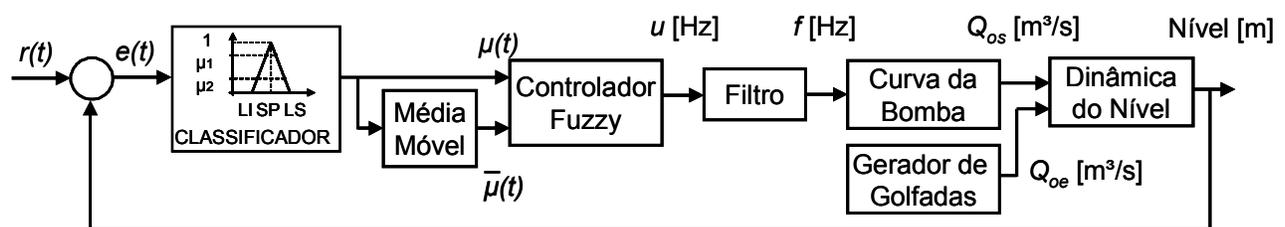
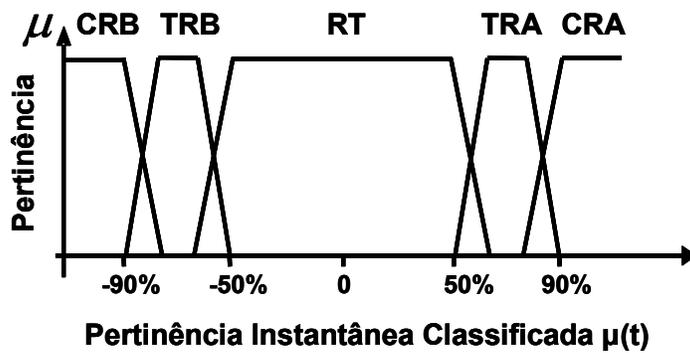


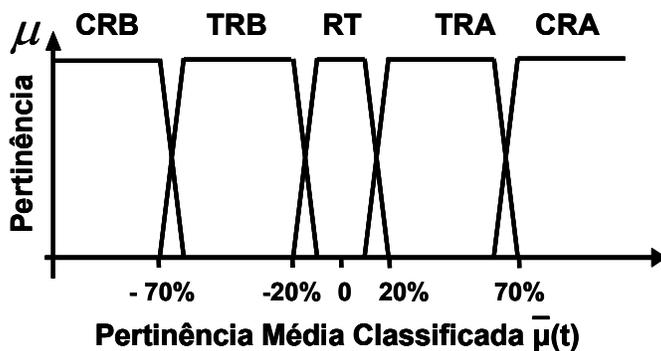
Figura 5.12. Diagrama de blocos para o controlador Classificador com Média.

O controlador nebuloso inserido na malha é o mecanismo que permite a definição de mais regiões de trabalho para o sinal, de forma a permitir certo grau de acompanhamento da referência. No entanto, a leitura da pertinência instantânea ainda é mantida, novamente por segurança. As funções de pertinência são apresentadas na Figura 5.13.

a) Conjuntos Nebulosos da entrada $\mu(t)$



b) Conjuntos Nebulosos da entrada $\bar{\mu}(t)$



LEGENDA

CRB:	Região Crítica Baixa
TRB:	Região de Transição Baixa
RT:	Região de Trabalho
TRA:	Região de Transição Alta
CRA:	Região Crítica Alta

Figura 5.13. Funções de pertinência para o controlador Classificador com Média.

A base de regras para o controlador classificador com média no caso do Sistema VASPS é apresentada na Tabela 5.7. Da mesma forma que os demais, as regras são do tipo Sugeno.

Tabela 5.7. Base de regras do controlador Classificador com Média adaptado ao VASPS.

Rótulo	Sigla	Valor da saída [Hz]	
		Pertinência Instantânea	Pertinência Média
Região Crítica Baixa	CRB	48	48
Região de Transição Baixa	TRB	50	52
Região de Trabalho	RT	-	54
Região de Transição Alta	TRA	58	56
Região Crítica Alta	CRA	60	60

O filtro de sinal inserido na malha tem o objetivo de simular as mínimas variações que são aplicadas ao sinal de controle antes que este seja aplicado aos terminais elétricos da bomba BCS, corrigindo picos de sinal e ruídos. Basicamente, o filtro é constituído de três elementos, ilustrados na Figura 5.14 e aplicados na seqüência a seguir:

1. *Saturador*. Este elemento de segurança impede que o acionamento da bomba fique fora do intervalo estipulado como limites de funcionamento físico, limitando o universo de atuação das frequências do inversor.
2. *Limitador de rampa*. Este dispositivo limita a derivada do sinal de controle a um valor máximo e a um valor mínimo, simulando as rampas de aceleração e desaceleração permitidas no sistema. Este limitador atua na malha de controle elétrico da bomba, que possui uma constante de tempo baixíssima, por vezes da ordem de milissegundos, de forma que as variações neste loop interno da bomba não se fazem perceptíveis no controle de nível. De qualquer forma, acionamentos repentinos na forma de ondas completamente quadradas são evitados.
3. *Quantizador*. O último componente do filtro aplica um segurador de ordem zero, ou filtro ZOH, ao acionamento do sinal de controle na bomba, evitando sua oscilação como sinal contínuo e portanto minimizando a oscilação do sinal nos terminais da bomba. Foram adotados neste projeto degraus de 0,5 Hz, de forma a realizar variações suaves no acionamento.

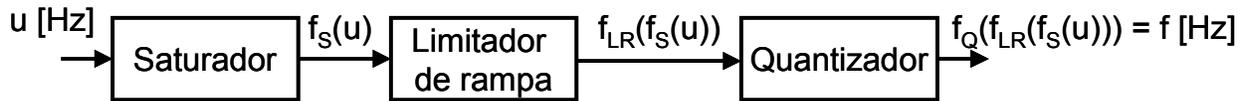


Figura 5.14. Detalhamento do filtro de sinal aplicado entre o controlador e o atuador.

As funções aplicadas ao sinal de controle são dadas pelas Equações (5.19), (5.20) e (5.21).

$$u_S = f_S(u) = \begin{cases} \max(u), & u > u_{\max} \\ u, & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ \min(u), & u < u_{\min} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$u_{LR}(t) = f_{LR}(u_S(t)) = \begin{cases} u_S(t-1) + u'_{\max}, & u_S(t) > u_S(t-1) + u'_{\max} \\ u_S(t), & u_S(t-1) - u'_{\min} \leq u_S(t) \leq u_S(t-1) + u'_{\max} \\ u_S(t-1) - u'_{\min}, & u_S(t) < u_S(t-1) - u'_{\min} \end{cases} \quad (5.20)$$

onde u' é a derivada de $u_S(t)$ no tempo t .

$$u_Q(t) = f_Q(u_{LR}(t)) = \begin{cases} u_{LR}(t-1) + 0.5, & u_{LR}(t) \geq u_{LR}(t-1) + 0.5 \\ u_{LR}(t-1), & u_{LR}(t-1) - 0.5 < u_{LR}(t) < u_{LR}(t-1) + 0.5 \\ u_{LR}(t-1) - 0.5, & u_{LR}(t) \leq u_{LR}(t-1) - 0.5 \end{cases} \quad (5.21)$$

Com este filtro, caso haja qualquer problema com o cômputo do sinal de controle acionando a BCS indevidamente, o sinal mais crítico a ser aplicado à bomba é um sinal com variação de meio em meio hertz, com derivada limitada e valor absoluto limitado por mínimos e máximos, permanecendo dentro do universo desejado.

5.2.4 Histerese com Auto-ajuste

Ainda com as melhorias apresentadas no modelo Classificador com Média, a transição entre conjuntos nebulosos apresenta a dificuldade de se manter na nova região de trabalho até que a correção seja plenamente estabelecida, o que leva a imaginar a aplicação do conceito de histerese para fixar a variação da saída até que o sistema retorne completamente à região de trabalho anterior por efeito do próprio comportamento do processo, e não apenas por correção do controlador. A histerese é inserida logo após o cálculo de pertinência média, de forma que o diagrama de blocos do sistema é dado pela Figura 5.15. Percebe-se que não há o controlador nebuloso na malha, uma vez que a histerese define as regiões de trabalho.

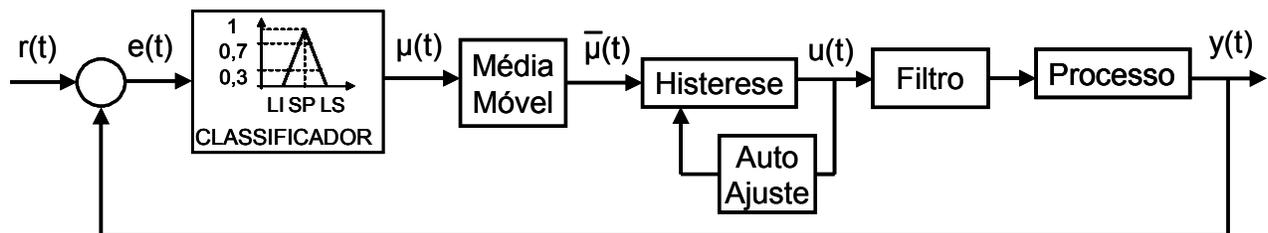


Figura 5.15. Diagrama de blocos do controlador Histerese com Auto-ajuste.

O comportamento da histerese é dado pelas Equações (5.22), (5.23), (5.24), (5.25) e (5.26), de forma que as regiões de trabalho podem ser identificadas na Figura 5.16. Os diferentes intervalos ilustrados na figura correspondem às regiões de trabalho que apresentam um valor constante de saída, fixando o sinal de controle enquanto o sistema permanecer na respectiva faixa de trabalho. A alternância entre as equações apresentadas depende das variações na variável avaliada - a pertinência média - cujo universo de trabalho é normalizado no intervalo $[-1,1]$.

$$u_{PB}(\bar{\mu}) = \begin{cases} \mathbf{u}_{PB}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \geq \mu_2 - \delta_2 \\ u_{PS}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) < \mu_2 - \delta_2 \end{cases} \quad (5.22)$$

$$u_{PS}(\bar{\mu}) = \begin{cases} u_{PB}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \geq \mu_2 \\ \mathbf{u}_{PS}(\bar{\mu}), & \mu_1 - \delta_1 < \bar{\mu}(t) < \mu_2 \\ u_Z(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \leq \mu_1 - \delta_1 \end{cases} \quad (5.23)$$

$$u_Z(\bar{\mu}) = \begin{cases} u_{PS}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \geq \mu_1 \\ \mathbf{u}_Z(\bar{\mu}), & -\mu_1 < \bar{\mu}(t) < \mu_1 \\ u_{NS}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \leq -\mu_1 \end{cases} \quad (5.24)$$

$$u_{NS}(\bar{\mu}) = \begin{cases} u_Z(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \geq -\mu_1 + \delta_1 \\ \mathbf{u}_{NS}(\bar{\mu}), & -\mu_2 < \bar{\mu}(t) < -\mu_1 + \delta_1 \\ u_{NB}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \leq -\mu_2 \end{cases} \quad (5.25)$$

$$u_{NB}(\bar{\mu}) = \begin{cases} \mathbf{u}_{NB}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) < -\mu_2 + \delta_2 \\ u_{NS}(\bar{\mu}), & \bar{\mu}(t) \geq -\mu_2 + \delta_2 \end{cases} \quad (5.26)$$

A associação das funções $u_{NB}(\bar{\mu})$, $u_{NS}(\bar{\mu})$, $u_Z(\bar{\mu})$, $u_{PS}(\bar{\mu})$ e $u_{PB}(\bar{\mu})$ constitui a função aplicada ao sinal de controle para gerar seu valor de saída. Este valor de saída por sua vez é dado pelas constantes \mathbf{u}_{NB} , \mathbf{u}_{NS} , \mathbf{u}_Z , \mathbf{u}_{PS} e \mathbf{u}_{PB} , dependendo do intervalo onde a pertinência média estiver localizada e dependendo também do sinal de derivada de seu valor absoluto, que indica se o valor está se afastando ou se aproximando de zero.

Por sua vez, os valores μ_1 , μ_2 e seus opostos $-\mu_1$ e $-\mu_2$ são os valores de transição entre regiões de trabalho quando a derivada do módulo da pertinência média for positiva. Esta condição é chamada de *histerese de subida*. Por outro lado, caso o módulo da pertinência média estiver decrescendo, ou seja, caso a derivada de seu valor absoluto for negativa, é caracterizada a condição de *histerese de descida*, e neste caso o valor de transição entre as regiões de trabalho é deslocado em direção ao zero de um valor δ , chamado de *intervalo de histerese*. Assim, pode-se concluir que a transição entre regiões de operação na condição de histerese de descida é dada pelos valores $(\mu_1 - \delta_1)$, $(\mu_2 - \delta_2)$ e seus valores opostos $(-\mu_1 + \delta_1)$ e $(-\mu_2 + \delta_2)$. Obviamente, como as pertinências usadas para os conjuntos nebulosos de entrada variam no intervalo $[-1,1]$, o

universo de trabalho da histerese também está compreendido neste intervalo normalizado, podendo ser visualizado na forma de porcentagens. A aplicação dos conceitos aqui apresentados será realizada no Capítulo 6, onde são apresentados os resultados.

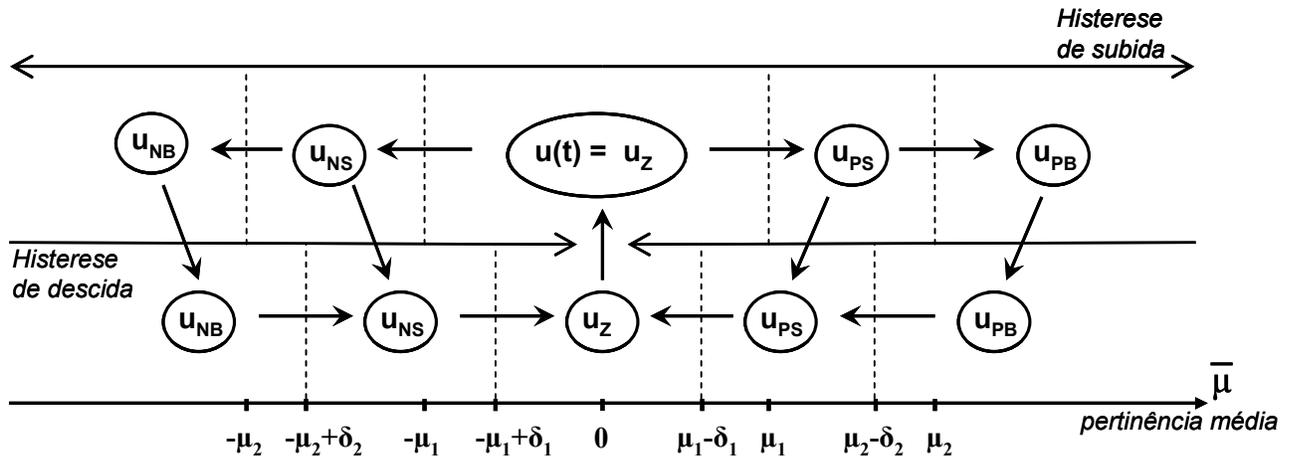


Figura 5.16. Esquemático ilustrativo do comportamento da histerese.

A Figura 5.16 ilustra os conceitos de histerese de subida e de descida, bem como as regiões de trabalho rotuladas através do valor da respectiva constante de saída. Nesta, é possível verificar um curioso efeito da histerese sobre as regiões de trabalho, a saber:

- Quando a região está ativa, o valor de transição para as regiões vizinhas é dado pelo maior delta dentre os valores de transição em seu entorno. Assim, pode-se dizer que o intervalo de trabalho é dado pela *região expandida* no entorno do valor médio da pertinência para aquela região.
- Quando a região não está ativa, para fins de transição de regiões, ela se afasta do zero de um valor igual ao intervalo de histerese. Dessa forma pode-se dizer que o intervalo de trabalho inativo total é dado pela *região retraída* fora do entorno do valor médio da pertinência.

Este efeito nos permite verificar que a soma das regiões de trabalho ativas é maior do que o intervalo de operação total de um valor igual à soma de todos os intervalos de histerese encontrados entre as fronteiras de operação. Esta maior região de trabalho real permite reduzir significativamente os acionamentos do atuador, zelando pela sua vida útil. Dessa forma, a Figura 5.16 ilustra a região expandida no entorno da pertinência média igual a zero. O valor da saída da

histerese $u(t)$, como dado no diagrama de blocos, é dado pela função $u_z(\bar{\mu})$, cujo valor de saída é u_z .

Neste ponto, é interessante retomar uma das considerações desenvolvidas na modelagem física do sistema VASPS – a dinâmica da variação da pressão. Havia sido considerado que o tempo de resposta da variação de pressão de gás era muito maior do que o do sistema de controle de nível, de forma que trabalhando no transiente do controle de nível, este não seria afetado pela dinâmica da pressão. Assim, embora os efeitos da variação da pressão não estejam claros na malha de controle de nível, caso seja avaliado um tempo muito grande de avaliação da dinâmica interna do VASPS, talvez a amplitude de variação da pressão influencie a tal ponto que os valores constantes de saída u_{NB} , u_{NS} , u_z , u_{PS} e u_{PB} não mais estejam adequados às regiões de trabalho definidas para estes. Ou ainda, considerando tempos maiores, a depleção do reservatório pode implicar na alimentação do sistema VASPS com uma pressão de admissão – ou uma vazão de líquido – declinante, causando o mesmo efeito.

Assim, considerando-se o problema de minimização de esforço de controle, e na tentativa de adaptar o controlador a condições dinâmicas de operação do sistema ao longo do tempo, foi desenvolvido um mecanismo de correção do valor do sinal de controle no equilíbrio, u_z , de forma que caso o sistema opere certa proporção de seu tempo fora da região de pertinência média igual a zero, o valor de u_z seja atualizado proporcionalmente. A importância desta correção é ilustrada por observações realizadas em simulação para um sistema dinamicamente variante no tempo, onde a faixa de erro nulo aplicando o sinal de controle $u(t)$ invariante no valor de u_z , gerou atuações que não mantiveram o sistema em equilíbrio, sendo necessária a atuação da faixa de operação vizinha para corrigir o sinal de saída $y(t)$ e retornar a minimizar o erro. Com isso, um diagrama esquemático para este controlador, ilustrando entradas e saídas dos parâmetros de cada bloco, pode ser representado pela Figura 5.17.

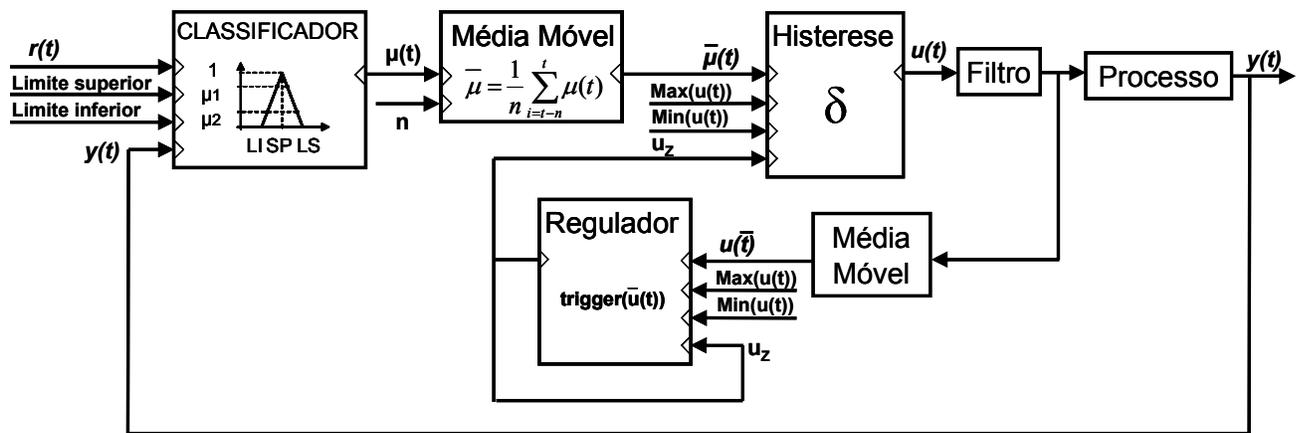


Figura 5.17. Diagrama esquemático do controlador Histerese com Auto-ajuste.

Para realizar o auto-ajuste, o regulador utiliza a média móvel do sinal de controle e a monitora até que esta atinja um valor entre u_z e u_{PS} – por exemplo, 70% da distância entre os patamares – permanecendo ainda mais próximo do valor de equilíbrio, mas já indicando a tendência do sinal de controle se deslocar em direção a uma das extremidades da região de trabalho. Após este valor da média móvel ser atingido, u_z assume este valor, e o sistema passa a ser referenciado a partir daí, sendo este o novo ponto de equilíbrio.

Este controlador engloba todos os conceitos anteriormente propostos e apresenta adicionalmente conceitos de robustez e a histerese. Tendo sido idealizado para aplicações com uma grande constante de tempo, o controlador também apresenta ferramentas que o permite lidar com sistemas mais rápidos, dado o alto grau de informações que este utiliza para definir a política de controle. A formulação do controlador real pode ser também mais ou menos conservadora, uma vez que os parâmetros do sistema permitem definir os limites permitidos para a variável controlada e para a variável manipulada.

O mérito de minimizar o esforço de controle requer, como reforçado no início da discussão, uma flexibilidade operacional dos parâmetros de desempenho. Não obstante, as tentativas de minimizar o erro estacionário foram desenvolvidas de forma a contemplar tanto o sinal de controle, quanto de permitir brechas para que o compromisso com o desempenho fosse deixado para a decisão do projetista, podendo este dar um maior peso ao desempenho.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Solução pelo Desempenho

A aplicação do controle híbrido *Fuzzy*-PID segundo o controlador apresentado na seção 5.1.1 foi simulada para o sistema apresentado e pelas suas equações. Além disso, para fins de comparação, também foi aplicado um controle PID simples, cujos resultados são apresentados nas mesmas figuras dos resultados do controle FPID.

Então, em ambos os sistemas a variável manipulada, $u(t)$, é a frequência com a qual o inversor alimenta a BCS, cuja relação com a vazão de saída do sistema é direta, e a variável controlada, $y(t)$, é o nível da ‘piscina’. A referência, $r(t)$, é fixada no valor de 30 metros.

6.1.1 Fuzzy-PID

Idealmente, o controle FPID do tipo supervisor que é apresentado na seção 5.1.1 representa uma melhoria para o sistema de controle do VASPS, devido a não-intrusão no processo, considerando que já havia um controle PID em campo operando. Diante desse fato, o sistema com supervisor não apresentaria pioras no controle, uma vez que o controlador original seria mantido, sofrendo apenas correções em seus ganhos.

Foram realizadas simulações que levaram em consideração uma partida do sistema com o nível do reservatório em seu valor mínimo de forma a avaliar o desempenho em um caso crítico e com leitura real abaixo da referência. Esta situação permite avaliar a resposta do sistema no enchimento, que é mais crítico que o esvaziamento, uma vez que a bomba deve ser acionada apenas após estar submersa, sendo estritamente necessário um comportamento controlado. A

referência de nível para o sistema foi de 30 metros e as simulações foram realizadas com o sistema supervisor e sem este para efeito de comparação e mensuração da melhoria no desempenho.

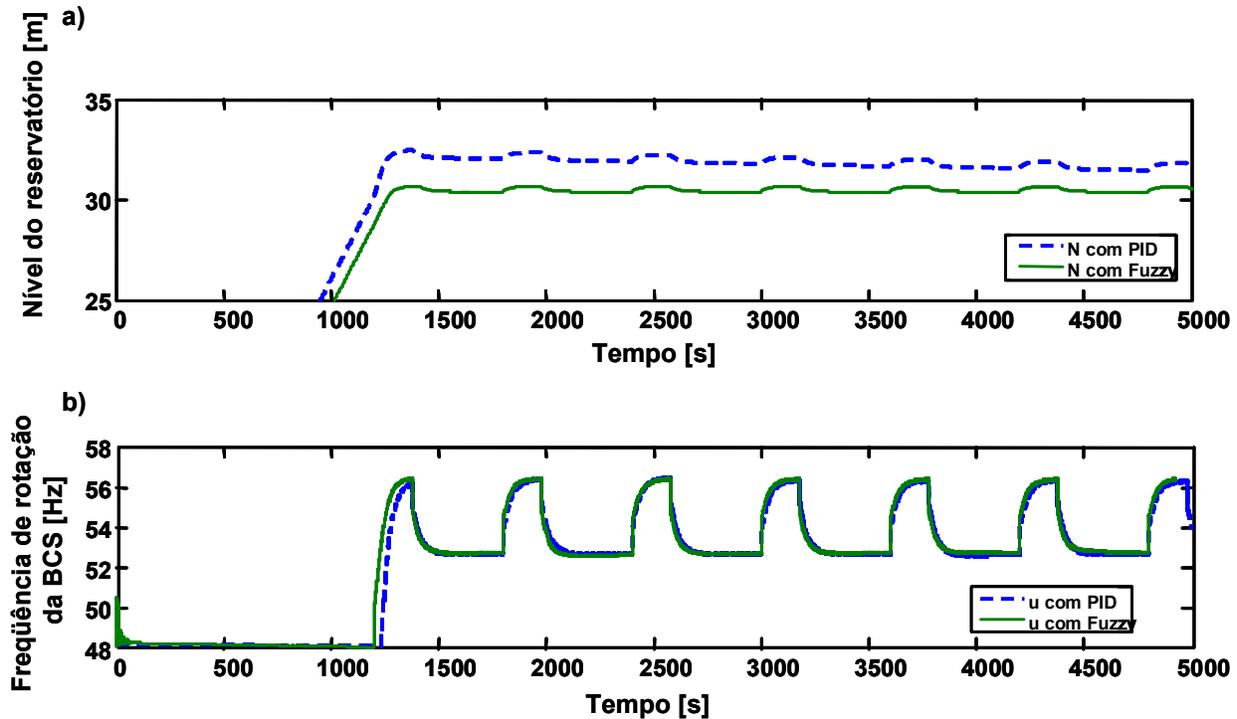


Figura 6.1. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PID e o FPID.

A situação crítica imposta permite a avaliação da resposta em regime transiente e seu estacionamento após este período. Este efeito está reproduzido na Figura 6.1, onde é apresentada a resposta do sistema com o controlador PID contra a resposta com o controlador FPID. Além da resposta do sistema, está sendo avaliado o sinal de controle que gerou a dada resposta.

Conforme apresentado na Figura 6.1, nota-se uma melhoria significativa no sobressinal e no tempo de estabilização do sistema, tão embora o sinal de controle seja muito similar. Considerando que o módulo supervisor aumenta a constante D em torno do zero, é natural que a resposta possua menor sobressinal, dado que o amortecimento foi aumentado. Entretanto, há erro estacionário no sistema, causado pela saturação do efeito integral em valores negativos muito altos. Ambos estes efeitos podem ser observados na Figura 6.2, que apresenta o comportamento das constantes ao longo da simulação, bem como a decomposição do sinal de controle entre as contribuições individuais de cada constante.

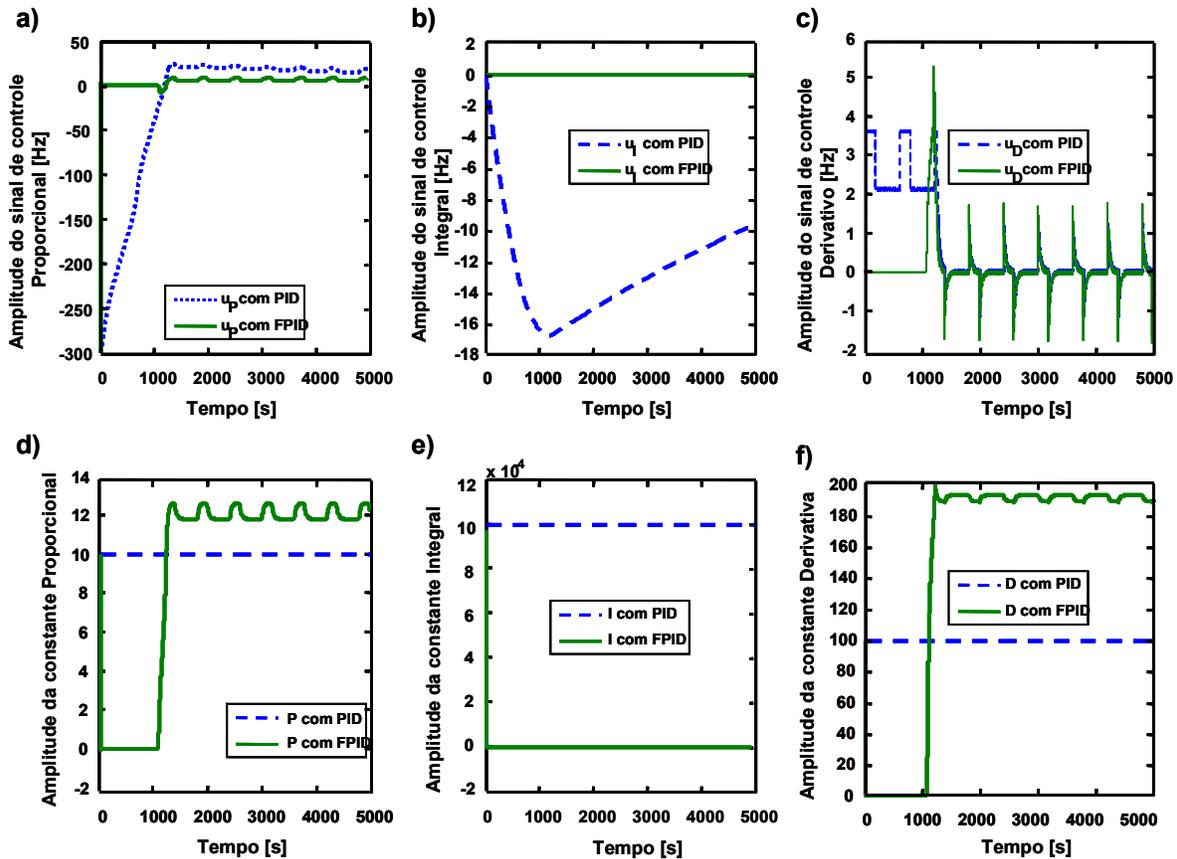


Figura 6.2. Sinal de controle e comportamento das constantes entre o PID e o FPID.

Na Figura 6.2, o sinal de controle apresentado na Figura 6.1b é decomposto em suas componentes proporcional (Figura 6.2a), integral (Figura 6.2b) e derivativa (Figura 6.2c). Estes sinais são as contribuições de cada ganho na composição do sinal de controle total, verificando a saturação de sinal causada pelo efeito integral. Além disso, é apresentado nos gráficos inferiores o comportamento ao qual as constantes foram submetidas. Como exemplo, nota-se o reforço aplicado ao sinal derivativo na Figura 6.2c próximo à região onde o Nível cruzou com a referência, indicando erro pequeno. Comparando com a Figura 6.2f, há a indicação de que o reforço foi causado pelo aumento no valor da constante K_D , com uma variação positiva de 90%, saindo de 100 e indo para 190, obtendo-se um sinal de controle mais expressivo, mesmo com o sinal cx , a variação relativa do erro, inalterado em relação ao controle PID.

Embora o sinal de controle proporcional apresentado na Figura 6.2a seja menor no sistema com supervisor, isso se deve ao fato de que o erro no sistema final é menor, conforme observado na Figura 6.1a. Ainda assim, há um aumento no valor da constante K_P apresentada na Figura 6.2d, reforçando a ação. Dessa forma, observa-se uma melhoria geral na resposta causada por diversas ações pontuais combinadas. Além disso, o sinal de controle foi praticamente

mantido, de forma que a energia de controle e a variação imposta ao atuador são as mesmas, viabilizando um projeto sobre um controlador que atendia o requisito de energia de controle. O desempenho obtido, que era o objeto de estudo do trabalho, foi alcançado sem perda de qualidade no sinal de controle e sem perda de estabilidade. Para os resultados dos modelos derivados do FPID, consultar o Apêndice A.

6.2 Soluções pelo Esforço de Controle

Nesta seção, as variáveis controlada e manipulada continuam sendo as mesmas, dado o mesmo processo a controlar. Entretanto, o objetivo de controle é formulado com o intuito de minimizar alterações no sinal de controle de forma que o sistema permaneça com um sinal de controle $u(t)$ próximo do constante, e a saída, $y(t)$, oscilante. A saída, no entanto, representada pelo nível de líquido no VASPS, deve permanecer dentro da faixa estipulada para projeto, de forma que seria interessante conceber um sistema que evite muitas oscilações. Estas oscilações, por sua vez, são geradas pelo distúrbio proporcionado pelo gerador de golfadas e, nos projetos para minimização do esforço de controle, ao passo que bons resultados são adquiridos para o sinal de controle, o gerador de golfadas é substituído por um mais agressivo, que vá dificultar o controle, conforme apresentado anteriormente.

O VASPS em campo é um sistema com alta constante de tempo, conforme experimentado em seus projetos iniciais, de forma que variações no nível de líquido não sofrem oscilações tão bruscas quanto às simuladas para a validação dos controladores deste estudo. No entanto, utilizar um gerador de golfadas agressivo reforça o projeto computacional para futuras experimentações com o sistema.

6.2.1 Monitoramento da Média Móvel

Com o controlador adaptado para o VASPS, foram realizadas simulações para testar o conceito proposto neste modelo, usando o primeiro gerador de golfadas. Os parâmetros manipulados nas simulações foram o nível inicial do reservatório e o número de pontos usado para o cálculo da média móvel, doravante referenciado por n . O nível inicial do reservatório seguiu a referência (30 metros) no primeiro conjunto de simulações, e foi variado para 60 metros posteriormente, ou seja, com o anular do VASPS completamente cheio. Este nível inicial é usado para as partidas do sistema com óleo diesel antes de abrir a entrada de fluido multifásico, e permite avaliar a resposta do sistema no regime transiente para uma condição de erro inicial muito grande. A média móvel por sua vez, assumiu os valores de 500, 2000 e 5000 pontos a uma

taxa de amostragem de 0,1 segundos, cobrindo assim uma janela de tempo 10 vezes menor que o número de pontos.

Os resultados totalizaram seis simulações, cujas curvas são apresentadas separadamente em duas figuras. A Figura 6.3 apresenta a resposta para o nível inicial de 30 metros, com o nível nos gráficos superiores e o sinal de controle nos gráficos inferiores, tendo sido ordenados da esquerda para a direita os casos de n igual a 500, 2000 e 5000 pontos. O mesmo padrão foi adotado na Figura 6.4, que apresenta os resultados para o nível inicial de 60 metros.

As curvas permitem verificar o efeito de n . Quanto menor, mais próximo o nível médio está do instantâneo e, portanto, maiores são as variações no sinal de saída, uma vez que os picos estão refletidos no nível médio. Do contrário, quanto maior, mais lenta e gradual é a reação do controlador, o que permite picos mais distantes da referência. Em ambas as simulações, nota-se este comportamento de forma que para o valor intermediário de n , de 2000, não há picos destacados na resposta, como ocorre com o valor de 500 pontos, bem como há um comportamento mais descendente e ascendente do sinal de controle, ao invés de uma resposta retardada em relação à instantânea, como ocorre com o valor de 5000 pontos.

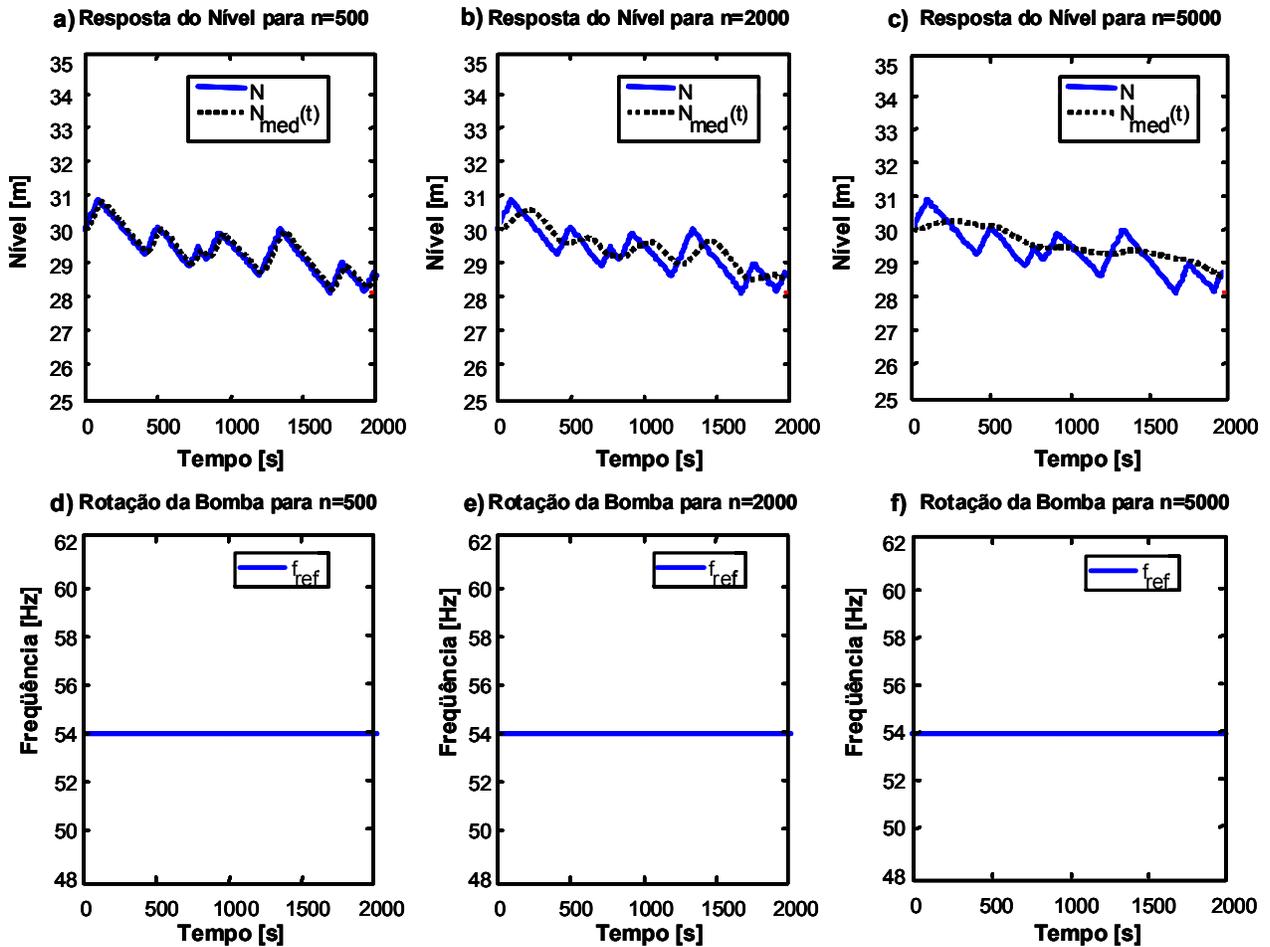


Figura 6.3. Curvas de resposta para o controlador Média Móvel, com nível inicial em 30 metros.

Pelas simulações percebe-se que o sinal de controle se comportou conforme esperado, apresentando poucas oscilações quando estabilizado. No entanto, a simulação realizada para 2000 segundos permitiu avaliar correções sobre o nível apenas no caso de nível inicial igual a 60 metros, com a média móvel usando 5000 pontos, caso no qual há oscilações devido à transição entre conjuntos nebulosos. Dessa forma já é possível notar qual será o efeito de um distúrbio prolongado tentando desestabilizar o sistema – erro estacionário pela duração do distúrbio e oscilações do sinal de controle na fronteira entra a faixa de estabilidade e a faixa de transição.

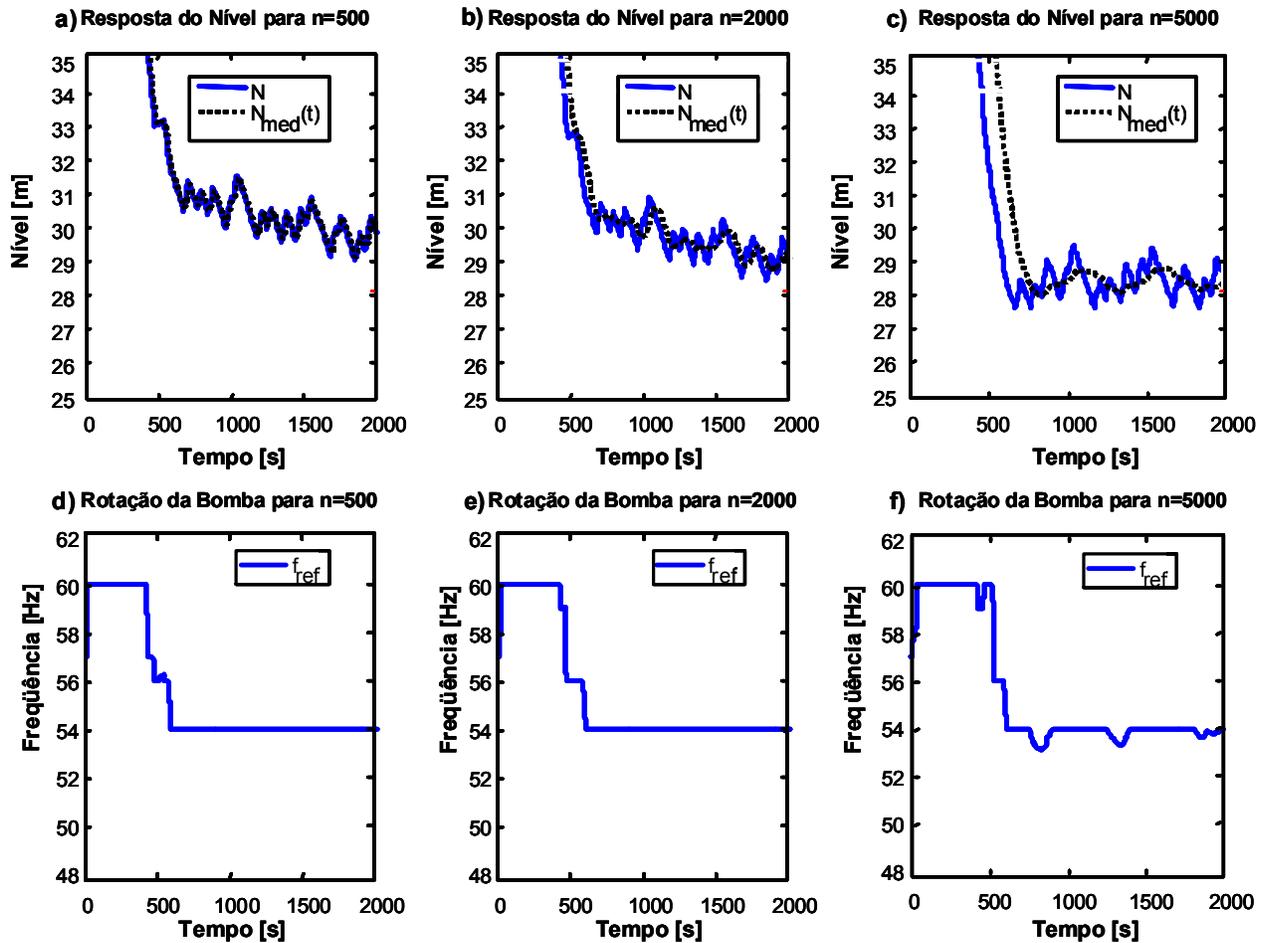


Figura 6.4. Curvas de resposta para o controlador Média Móvel, com nível inicial em 60 metros.

Finalmente, é possível afirmar que este controlador deve ser aplicado apenas a sistemas onde o sinal de referência não sofre muitas variações, ou quando for possível projetar a faixa de trabalho do controlador, considerando uma variação limitada na referência, de tal forma que a situação crítica continue dentro dos limites de estabilidade do sistema. Essas condições devem ser respeitadas como fatores determinantes da garantia de estabilidade do sistema. Essa formulação também é possível para o sistema VASPS.

6.2.2 Classificador por Regiões

Este controlador foi realizado com o intuito de robustez máxima, uma vez que monitora a faixa de estabilidade e possui uma grande região de rotação constante no centro da faixa de pertinência. Dessa forma, foram tomadas medidas para checar tal característica. A primeira foi utilizar um sinal de referência variável para todas as simulações, avaliando se é possível perturbar a estabilidade do sinal de controle. Além disso, as constantes LI e LS foram simuladas para os valores de 20 e 40 metros, apresentadas nos gráficos à esquerda, e depois variadas para os valores

24 e 38 metros, apresentadas nos gráficos à direita, de forma a avaliar o efeito causado por um controle mais rígido no processo.

A Figura 6.5 apresenta a simulação para o nível inicial de 30 metros. Este nível inicial representa a continuidade da operação do sistema para qualquer instante de tempo, sendo o valor operacional ideal do nível. É necessário verificar também como o sistema reage na transição, tendo sido realizadas as mesmas simulações para o nível inicial de 60 metros, conforme a Figura 6.6.

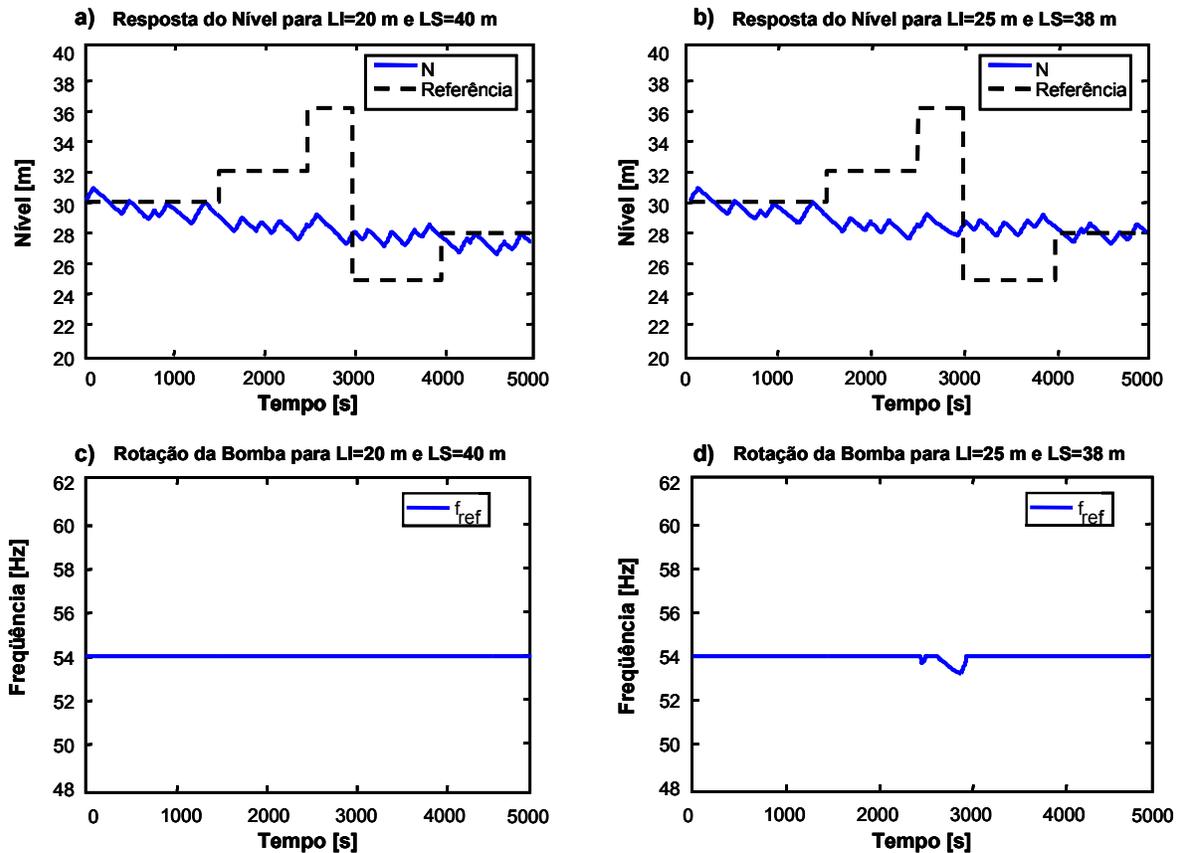


Figura 6.5. Resposta para o Classificador por Regiões para o nível inicial de 30 metros.

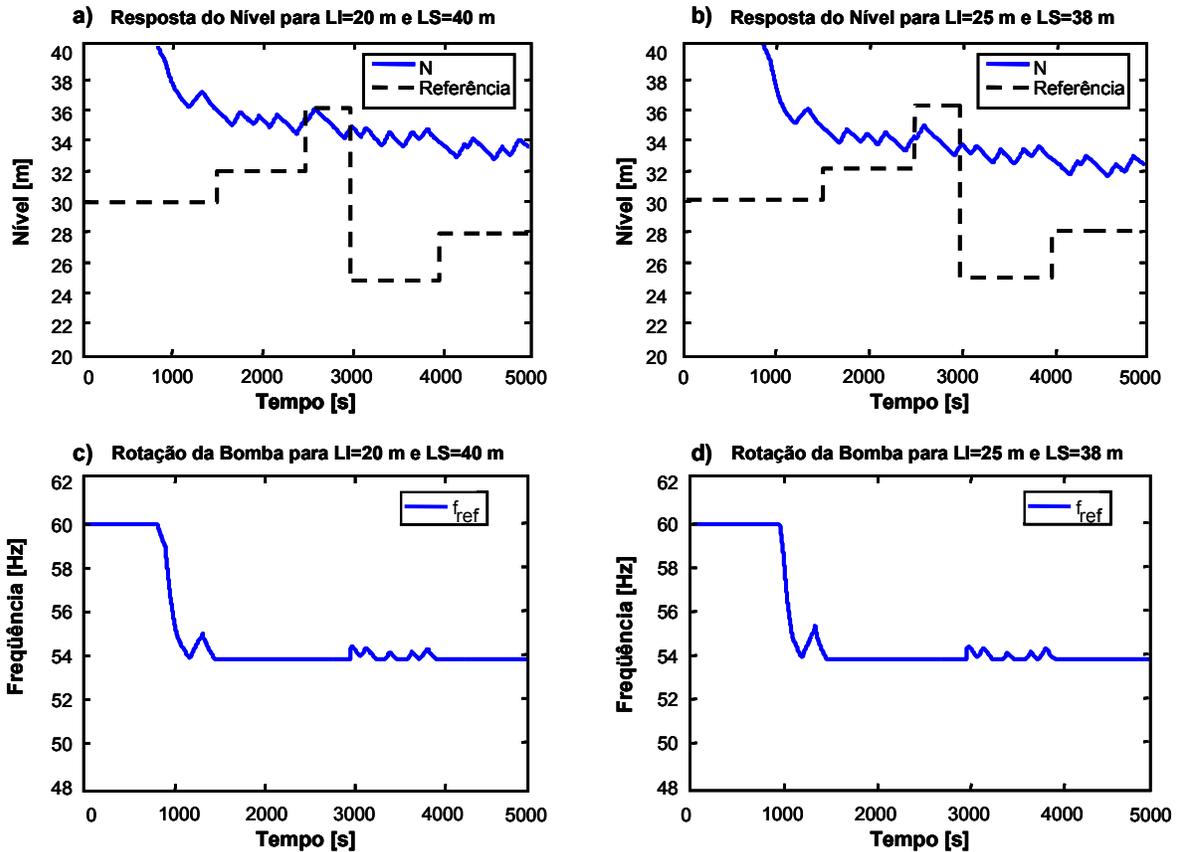


Figura 6.6. Resposta para o Classificador por Regiões para o nível inicial de 60 metros.

Conforme esperado, o controlador mostrou-se bastante robusto e teve a transição mais suave apresentada até agora. No entanto, o efeito colateral foi bastante prejudicial – o nível não acompanha nenhuma das variações da referência, pois não há ajuste na região de projeto, uma vez que na base de regras o valor do acionamento da bomba para todo o intervalo da região de estabilidade é único. Isso explica as oscilações, que ocorrem porque o nível se estabiliza próximo à região de transição, assim que adentra a região de estabilidade, não minimizando o erro.

6.2.3 Classificador com Média

Este controlador apresentou um resultado bastante satisfatório, conforme apontado pelas simulações para níveis iniciais de 30 metros e 60 metros de altura, com o sinal de referência mantido constante, conforme a Figura 6.7, e para sinal de referência variável, conforme a Figura 6.8.

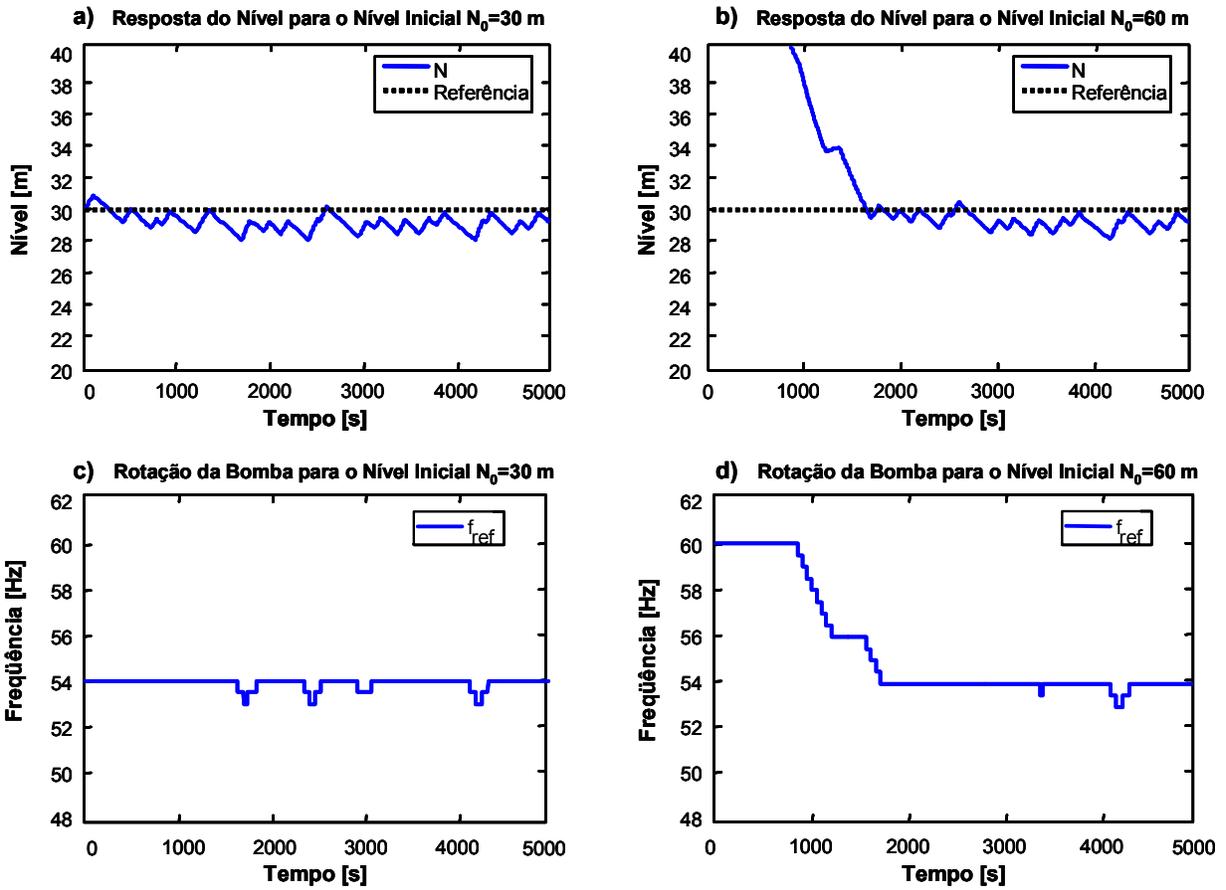


Figura 6.7. Resposta e Sinal de Controle para controlador Classificador com Média, com referência constante.

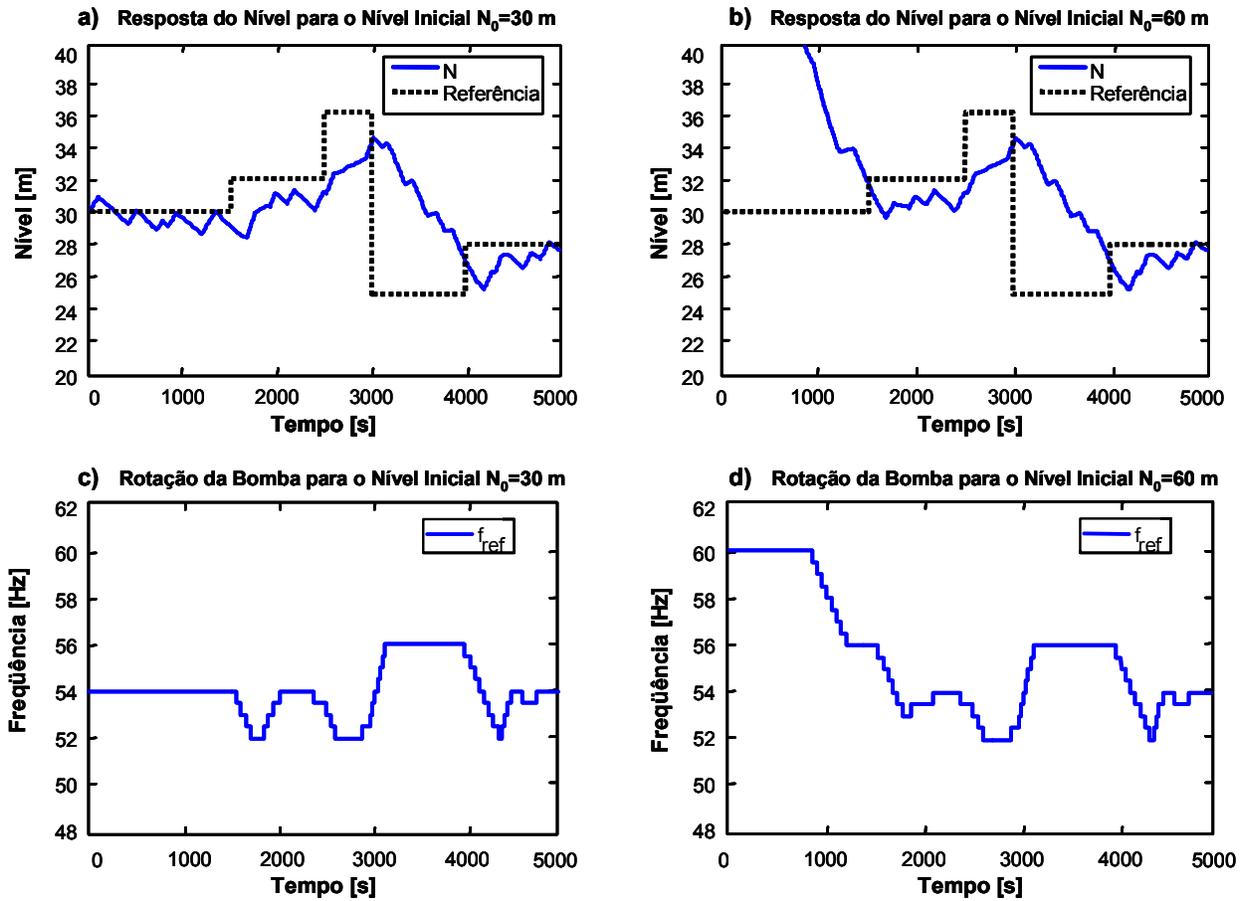


Figura 6.8. Resposta e Sinal de Controle para controlador Classificador com Média, com referência variável.

É possível notar nestas simulações que há algumas poucas oscilações curtas ao longo da operação do sistema, tão embora estas se apresentem bem menos frequentes que nos modelos de controlador anterior. Além disso, percebe-se que o sinal acompanha as alterações do *set point* permitindo uma melhoria significativa de desempenho em relação aos outros modelos. Assim, devido ao bom resultado que este controlador apresentou usando o gerador de golfadas com frequência de golfadas aleatória, foi realizado um novo teste, ainda com *set point* variável para um gerador de golfadas com amplitude de golfadas aleatórias, de acordo com a Figura 6.9.

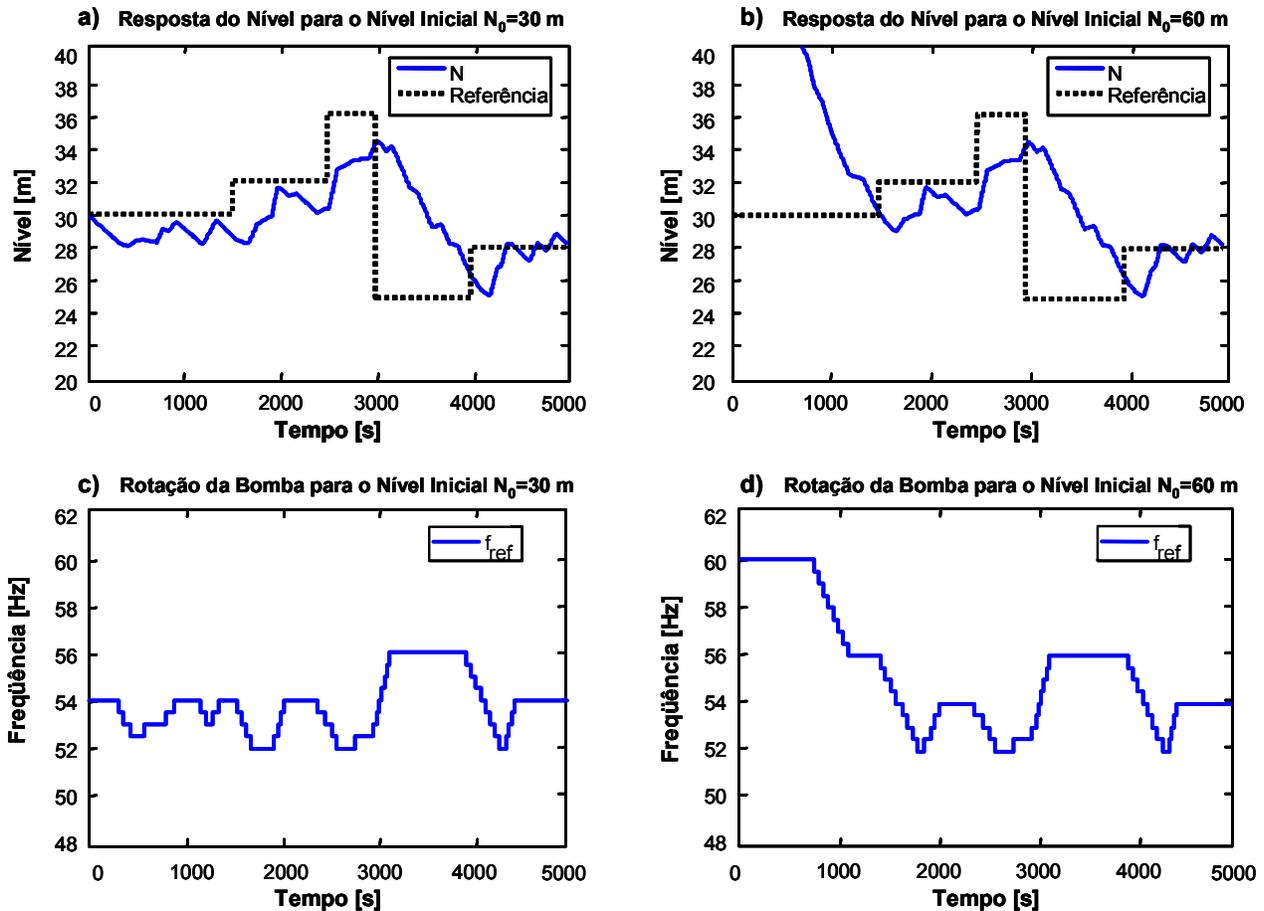


Figura 6.9. Resposta e Sinal de Controle para controlador Classificador com Média, com o último gerador de golfadas, de frequência e amplitude variáveis.

Pela figura, nota-se que mesmo com um gerador de golfadas agressivo, tanto o desempenho quanto a manipulação do sinal de controle são mantidos, provendo o processo com um resultado conforme o desejado – o sinal de controle corrigiu o sinal de saída (nível da piscina) em uma faixa bastante próxima de variação com picos mais largos e suaves do que os obtidos com os outros modelos.

6.2.4 Histerese com Auto-ajuste

Uma vez que este controlador abrange ambos os conceitos introduzidos para os outros dois, possuindo um classificador na entrada e o cômputo da média móvel, é necessário realizar simulações para todo o conjunto de parâmetros. No entanto serão feitas duas análises separadamente – uma para o controlador em si e sua dinâmica junto ao processo, e outra para a avaliação do efeito do mecanismo de auto-ajuste. Para conseguir uma simulação apenas avaliando o controlador, sem o mecanismo de auto-ajuste, basta manter a entrada do gerador de golfadas do sistema como vinha sendo mantida até então, pois o mecanismo de auto-ajuste

apenas tem efeito após o sistema sofrer mudanças dinâmicas, como proposto em seu projeto no Capítulo 5. No caso do VASPS, essa mudança dinâmica seria a depleção do reservatório de óleo, com o decaimento da pressão na formação. Já para a simulação apenas do mecanismo de auto-ajuste, pode-se simular uma vazão de entrada decaindo e manter os parâmetros do controlador constantes, de forma a avaliar as correções impostas às frequências de acionamento, u_Z , u_{PS} e u_{NS} .

6.2.4.1 Avaliação do Controlador

Para a avaliação do controlador, foram realizadas inicialmente simulações variando apenas o nível inicial e o sinal de referência, a fim de avaliar o transiente. Os demais parâmetros, como as fronteiras entre regiões de trabalho, μ_1 e μ_2 , a janela de histerese, δ , o valor da saída em cada região, u_{NB} , u_{NS} , u_Z , u_{PS} e u_{PB} , os limites de estabilidade do sistema, LI e LS , e o número de pontos utilizados na Média Móvel, n , foram mantidos constantes nas simulações iniciais. A Figura 6.10 apresenta um esquemático para estas configurações, com os valores de μ_1 igual a 0,35 e μ_2 igual a 0,75, δ igual a 0,1, u_Z valendo 54 Hz, u_{PS} valendo 56 Hz, u_{NS} em 52 Hz, u_{PB} em 60 Hz e u_{NB} em 48 Hz. Por fim, n foi configurado para 2000 pontos, a taxa de amostragem para 0,1 segundo, LI em 20 metros e LS em 40 metros.

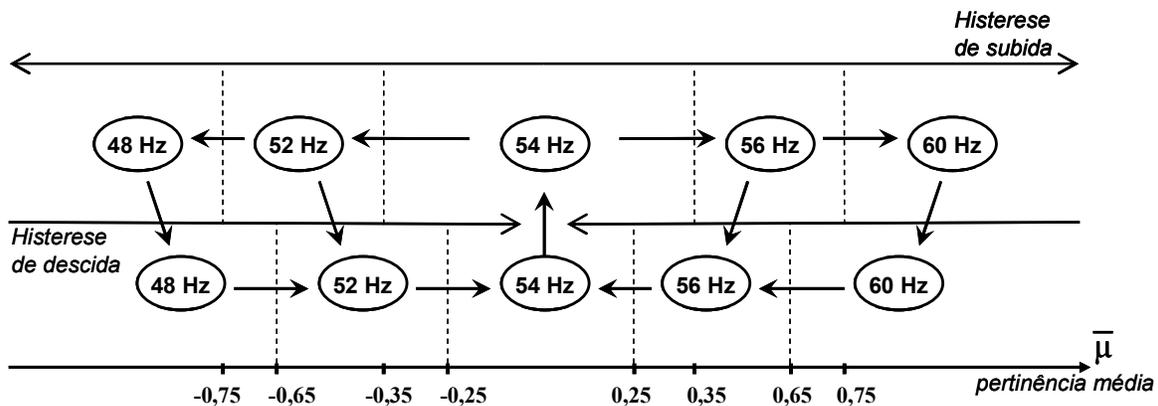


Figura 6.10. Esquemático da histerese adaptado para o caso VASPS.

Foram realizadas quatro simulações com estes parâmetros. Para este controlador, que é conceitualmente mais robusto que os anteriores, foi utilizado o último gerador de golfadas apresentado, com amplitude e frequência das golfadas de líquido variáveis. O nível inicial assumiu o valor de 30 metros nos gráficos à esquerda, e o valor de 60 metros nos gráficos à direita. A referência foi mantida constante (30 metros) na Figura 6.11, e foi variada no segundo conjunto de simulações conforme o sinal pontilhado apresentado na Figura 6.12.

Este modelo apresentou, pelas simulações, um melhor sinal de controle, sem oscilações curtas e freqüentes, bem como um erro estacionário condicionalmente proporcional. No entanto, o grau de compromisso entre qualidade do sinal de controle e desempenho, pode ser manipulado pelos parâmetros que foram mantidos constantes nestas simulações, como pode ser visto no Apêndice B, onde são apresentadas simulações exaustivas para todos os parâmetros. Além disso, o controlador foi submetido a bruscas variações da referência, não apresentando oscilações indevidas no sinal de controle, e acompanhando a referência dentro de uma faixa de proximidade.

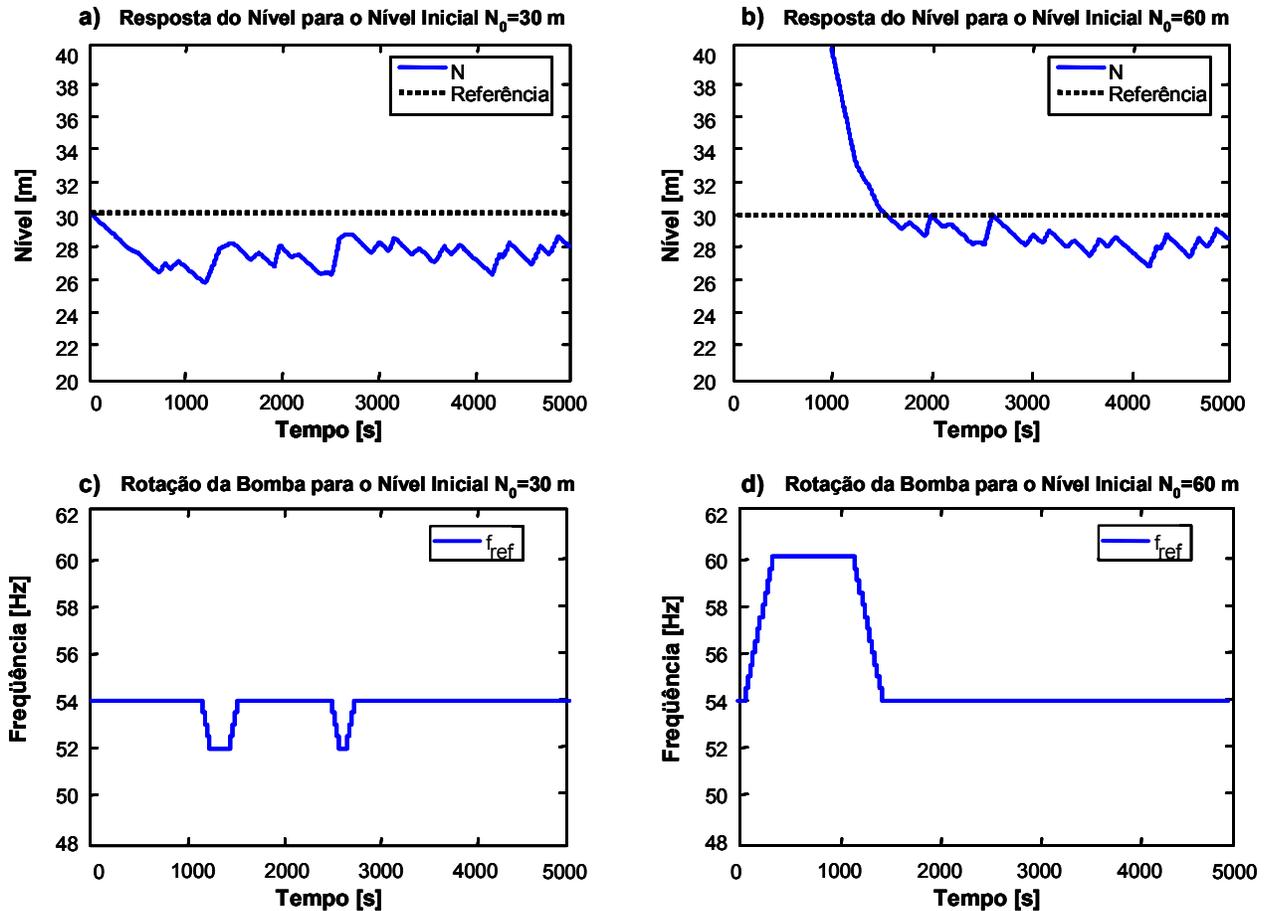


Figura 6.11. Resposta para o controlador Histerese com Auto-ajuste, com referência constante.

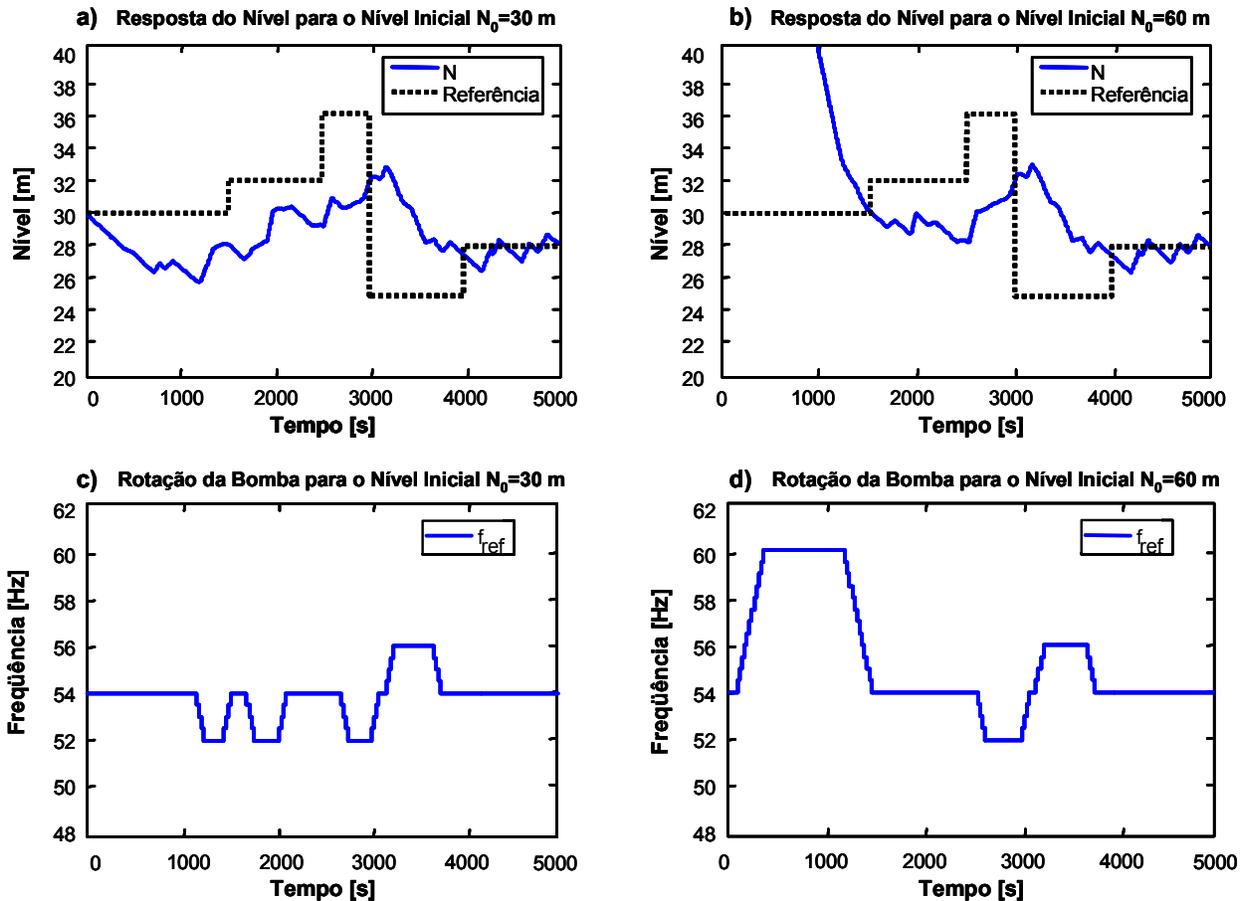


Figura 6.12. Resposta para o controlador Histerese com Auto-ajuste, com referência variável.

As variações da amplitude do sinal de saída, a rotação da bomba, para esta resposta parecem ser excedentes ao desejado para o VASPS, mas isso ocorre devido à quantidade de variações na referência no curto período de tempo. Caso o operador venha a fazê-lo em campo, o sistema obedecerá, pois está sendo projetado para isso. A recomendação, no entanto, é que caso se deseje a vida útil mais longa possível para a BCS, menores devem ser as variações na referência.

O sistema apresentou uma transição de estados suave ao sair do patamar de nível inicial de 60 metros. A transição foi tão paulatina quanto a variação do nível permitiu. Embora este controlador apresente uma qualidade visível no sinal de controle, as simulações iniciais apresentaram um desempenho que ainda deixa a desejar no tempo de resposta e no erro estacionário, tão embora os resultados se apresentem muito próximo do desejado para o VASPS. As oscilações obviamente não permitem um controle de nível exemplar, mas o controle de rotação, que é o foco deste modelo, apresenta-se adequado para as simulações de longa duração que foram tomadas a partir de então.

O Apêndice B apresenta um conjunto de experimentos computacionais realizados sobre o controlador Histerese com Auto-ajuste para o teste do controlador adaptado ao VASPS, ainda sem testar o auto-ajuste. Estas simulações visam encontrar a configuração ideal para os parâmetros, bem como seu efeito na dinâmica do sistema. O apêndice conclui com propostas para experimentação real de uma implementação dos conceitos desenvolvidos e propostos neste trabalho. Para fins de referência, a Tabela 6.1 apresenta os grupos de experimentos desenvolvidos computacionalmente.

Tabela 6.1. Planejamento dos experimentos computacionais para verificação da relação entre parâmetros, sinal de controle e resposta do sistema.

Simulação	Ordem	Variáveis						
		N_0	SP	n	$\delta_1 - \delta_2$	$\mu_1 - \mu_2$	$[u_{NB} \ u_{NS} \ u_Z \ u_{PS} \ u_{PB}]$	rsl/fsl
A	11	30	30	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%
	12	30	30	4000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%
	21	30	var	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%
	22	30	var	4000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%
B	1	60	var	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 56 54 52 48]	2%
	2	60	var	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55.5 54 52.5 48]	2%
	3	60	var	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	2%
C	1	60	30	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%
	2	60	30	2000	15% - 15%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%
	3	60	30	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 56 54 52 48]	2%
1	1	30	30	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 55 54 53 48]	5%
	2	30	30	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	5%
	3	30	30	6000	40% - 30%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	10%
2	1	30	30	4000	20% - 20%	40% - 80%	[60 56 54 52 48]	5%
	2	30	30	4000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	5%
3	1	30	30	6000	40% - 30%	40% - 80%	[60 55.5 54 52.5 48]	10%
	2	30	30	6000	40% - 30%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	10%

Ademais, as curvas conclusivas do melhor desempenho encontrado são apresentadas na Figura 6.13, onde se pode notar a melhoria em relação às simulações iniciais. É importante notar que o tempo de simulação destas curvas são estendidos em relação às simulações anteriores, de forma a realizar uma avaliação mais rigorosa, e que os parâmetros para esta simulação são dados na Tabela 6.1 para a simulação 3, ordem 2.

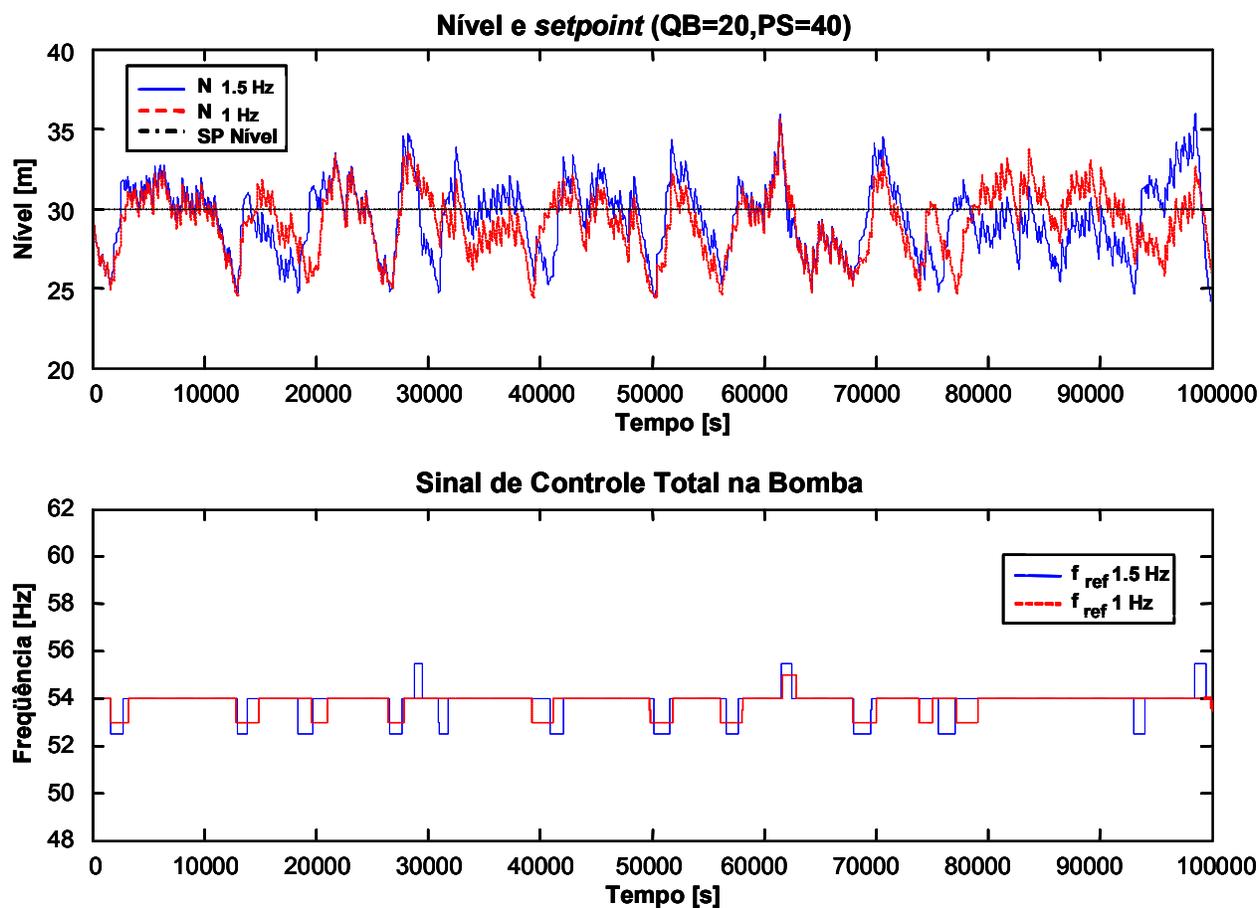


Figura 6.13. Simulação 3, teste de u_z , apresentando as curvas 3.1 e 3.2.

É possível notar que após uma avaliação mais profunda do controlador, é possível concluir sobre o sistema a ponto de configurá-lo para alguns poucos acionamentos por dia, de forma que mesmo sob as condições mais severas de trabalho, caso o sistema permaneça dentro do escopo de atuação da bomba, é possível corrigir os distúrbios e trabalhar com acionamentos mais demorados e suaves.

6.2.4.2 Avaliação do Auto-ajuste

É possível notar pela Figura 6.13 que talvez houvesse uma rotação constante para a zona de trabalho próxima ao erro nulo, que permitisse, idealmente, o equilíbrio para um distúrbio conhecido e controlado, dada pela média ponderada das rotações ativadas pelos tempos de atuação decorridos. Essa rotação proporcionaria uma vazão de saída que correspondesse ao balanço de massa do sistema. Sabe-se, no entanto, que a vazão recebida pelo VASPS advinda do(s) poço(s) se altera conforme as golfadas evoluem, de forma que o sistema está sendo sempre perturbado, e é impossível manter um equilíbrio perfeito com uma vazão de saída constante.

Conceitualmente, entretanto, é desejado que a vazão de saída no equilíbrio seja o mais próxima possível da média das oscilações da vazão de entrada, de forma a minimizar as alterações no sinal de controle. Assim, considerando que a rotação de saída é ativada em patamares constantes e que oscilam em torno da vazão ideal de saída, é possível computar a média móvel do sinal de controle ativado, da mesma forma que é feito na entrada com a pertinência classificada, e compará-lo com os patamares de saída parametrizados, encontrando a distância que a média móvel está de cada um deles. No sistema VASPS, esta distância foi configurada como sendo uma ponderação de 90% do valor do valor de equilíbrio, \mathbf{u}_Z , e 10 % do valor da faixa subsequente, \mathbf{u}_{NS} ou \mathbf{u}_{PS} , de forma que o valor de \mathbf{u}_Z é dado pela Equação (6.1).

$$\mathbf{u}_Z \begin{cases} \mathbf{u}_Z, & \text{se } (0,90 \cdot \mathbf{u}_Z - 0,10 \cdot \mathbf{u}_{NS}) < \frac{1}{n} \sum_{t=n}^t u(t) < (0,90 \cdot \mathbf{u}_Z + 0,10 \cdot \mathbf{u}_{PS}) \\ 0,90 \cdot \mathbf{u}_Z + 0,10 \cdot \mathbf{u}_{PS}, & \text{se } \frac{1}{n} \sum_{t=n}^t u(t) \geq (0,90 \cdot \mathbf{u}_Z + 0,10 \cdot \mathbf{u}_{PS}) \\ 0,90 \cdot \mathbf{u}_Z - 0,10 \cdot \mathbf{u}_{NS}, & \text{se } \frac{1}{n} \sum_{t=n}^t u(t) \leq (0,90 \cdot \mathbf{u}_Z - 0,10 \cdot \mathbf{u}_{NS}) \end{cases} \quad (6.1)$$

A arbitragem sobre estes pesos advém das conclusões experimentais que apontaram para a necessidade de mudanças suaves no valor da rotação de equilíbrio, pois quando esta está deslocada do centro da faixa de operação do sinal de controle, mudanças maiores tornam-se muito bruscas no sentido onde há maior margem de variação do nível, a região distante da crítica. Ainda, quando o sistema busca novo patamar de equilíbrio devido a mudanças bruscas no sistema, alterações de maior magnitude no patamar de equilíbrio provaram que o retorno do sistema à condição de erro nulo tem dificuldades em corrigir o valor de \mathbf{u}_Z devido à necessidade de uma média de ativações muito alta – ou muito baixa – no sentido oposto do acionamento, o que dificilmente ocorre quando o sistema retorna de um ponto de operação crítico.

Por simplicidade computacional, o valor de saída do sinal de controle na faixa de transição, \mathbf{u}_{NS} ou \mathbf{u}_{PS} , é parametrizado pelo valor da saída nos outros intervalos, \mathbf{u}_Z e \mathbf{u}_{NB} ou \mathbf{u}_{PB} , de forma que ao se alterar o valor de \mathbf{u}_Z , automaticamente todos os outros patamares para o sinal de controle também sejam corrigidos, de tal forma que o cômputo dos valores de \mathbf{u}_{NS} ou \mathbf{u}_{PS} são dados pelas Equações (6.2) e (6.3). É interessante notar que um acionamento para \mathbf{u}_{NS} ou \mathbf{u}_{PS} mais distante que a avaliação da média móvel do sinal de controle proporciona às faixas de correção um poder significativo de atuação, permitindo variações na média móvel condizentes com os pesos de 90% e 10% propostos.

$$\mathbf{u}_{NS} = \frac{(2 \cdot \mathbf{u}_Z + \cdot \mathbf{u}_{NB})}{3} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{u}_{PS} = \frac{(2 \cdot \mathbf{u}_Z + \cdot \mathbf{u}_{PB})}{3} \quad (6.3)$$

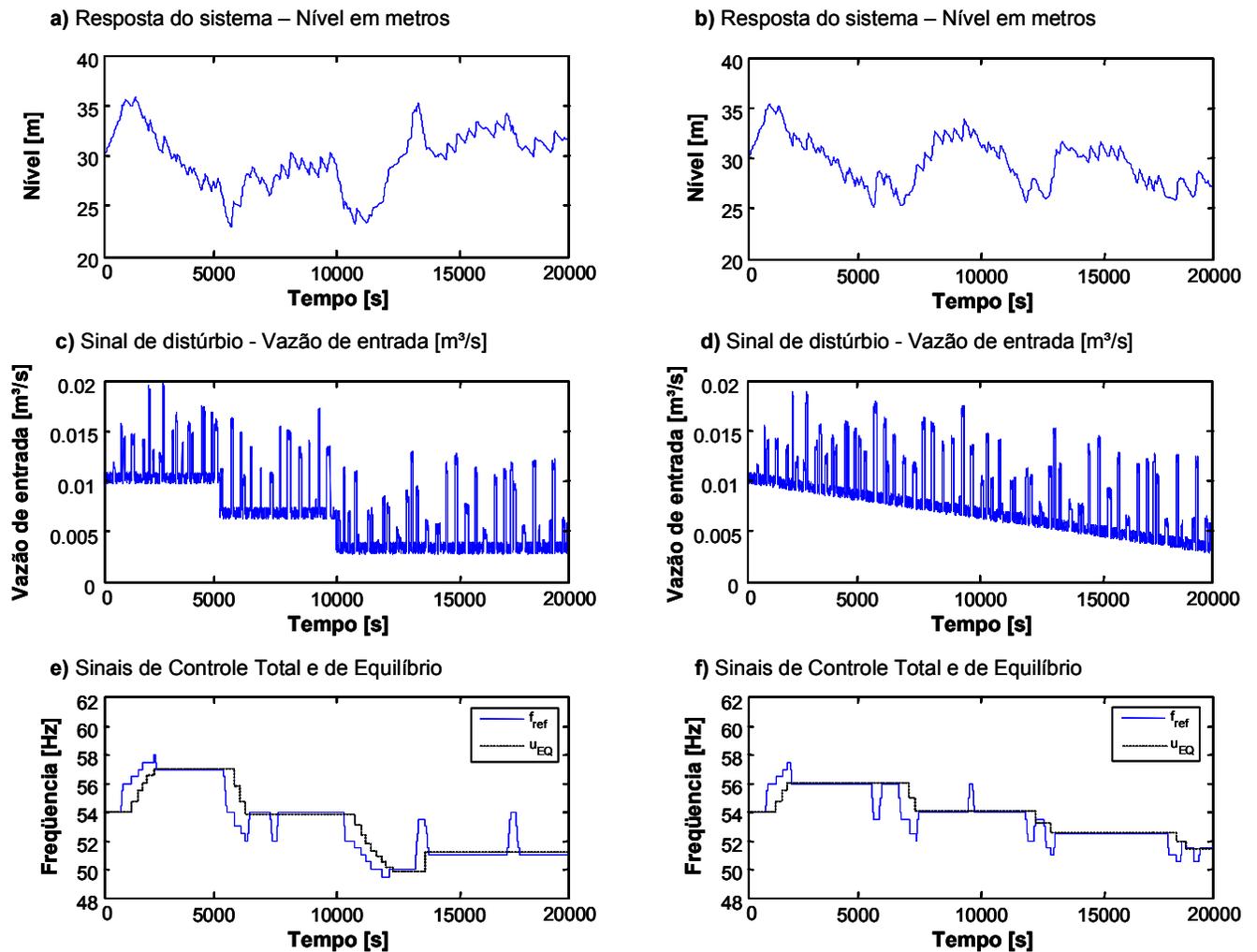


Figura 6.14. Curvas para as simulações de teste do mecanismo de auto-ajuste.

Finalmente, para realizar as simulações, também é importante ponderar sobre o valor do número de pontos usado na média móvel do sinal de controle. Diferentemente do n utilizado na pertinência de entrada, não se deseja que o este parâmetro para o sinal de controle seja muito grande, pois o tempo de reação que o sinal de controle deve possuir sobre o sistema deve ser muito menor, ou seja, sua alteração deve ser mais rápida, que o tempo de reação da resposta, uma vez que é o sinal de controle que propicia uma condição de trabalho estável. Assim, utilizando

inicialmente um n para o sinal de controle no valor de 2000 pontos em vez dos 4000 pontos propostos para o sistema conforme o Apêndice B, foram realizadas as simulações cujos resultados foram apresentados na Figura 6.14.

As curvas apresentam a resposta do nível, o sinal de controle e o valor de u_z para duas condições simuladas, com valores da vazão de entrada do gerador de golfadas, o distúrbio, dadas pelos gráficos c) e d). A primeira condição simula uma transição descontínua de grande amplitude no sistema, como, por exemplo, se um segundo poço ou *manifold* tivesse de ser interrompido bruscamente. Há duas transições de forma a melhor avaliar o transiente. A segunda condição representa um declínio linear na magnitude da vazão, representando uma queda linear de pressão no poço. Essa queda seria muito mais suave em campo, uma vez que a simulação possui uma duração de 20000 segundos, o que corresponde a um período de cinco horas e meia de trabalho.

Em ambas as simulações é possível notar pelo valor de u_z três patamares de trabalho que foram buscados pelo mecanismo de auto-ajuste, bem como o seu transiente, bastante evidente e representado pelas mudanças em degrau, que também foram refletidas no sinal de controle. É interessante notar que embora houvesse ativações das faixas de transição, em momento algum o sistema apresentou instabilidade na alteração de patamares, apresentando o comportamento desejado.

6.2.5 Avaliação de resultados

Uma síntese das dificuldades e vantagens de cada modelo desenvolvido segundo a estratégia de minimização do esforço de controle é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Comparação dos controladores voltados à minimização do esforço.

MODELO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Monitoramento da Média Móvel	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo do Nível Médio; • Ajuste do sinal de controle com Lógica Nebulosa; • Regiões de Trabalho definidas pelos Conjuntos Nebulosos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplas regiões de estabilidade para o sinal de controle; • Transição suave da condição crítica para a estável. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sinal de controle oscilatório entre as os patamares de saída; • Estacionamento do sinal de controle entre as regiões de trabalho; • Variações limitadas do <i>setpoint</i>; • Limitação na escolha do sinal de controle.
Classificador de Regiões	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste do sinal de controle com Lógica Nebulosa; • Definição de limites móveis de estabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>setpoint</i> variável; • Sinal de controle mais sensível a alterações; • Permite estreitar a faixa de estabilidade; • Intervalo contínuo para a seleção do sinal de controle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Insensibilidade a variações no <i>setpoint</i>; • Sinal de controle oscilatório entre os patamares de saída; • Limitação na escolha do sinal de controle.
Classificador por Regiões com Média	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo da Média; • Classificação da entrada relativamente ao <i>setpoint</i>; • Definição de limites móveis de estabilidade; • Ajuste do sinal de controle com Lógica Nebulosa • Regiões de Trabalho definidas pelos Conjuntos Nebulosos; • Parametrizável; • Relação clara entre parâmetros e requisitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sinal de controle mais sensível a alterações; • <i>setpoint</i> variável; • Sinal de controle estável próximo ao <i>setpoint</i>; • Permite estreitar a faixa de estabilidade; • Amplas regiões de estabilidade para o sinal de controle; • Transição suave da condição crítica para a estável. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sinal de controle oscilatório entre as os patamares de saída; • Estacionamento do sinal de controle entre as regiões de trabalho; • Limitação na escolha do sinal de controle.
Classificador por Regiões com Média e Histerese	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo da Média; • Classificação da entrada relativamente ao <i>setpoint</i>; • Definição de limites móveis de estabilidade; • Regiões de Trabalho definidas pela Histerese; • Parametrizável; • Relação clara entre parâmetros e requisitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sinal de controle mais sensível a alterações; • <i>setpoint</i> variável; • Sinal de controle estável próximo ao <i>setpoint</i>; • Permite estreitar a faixa de estabilidade; • Amplas regiões de estabilidade para o sinal de controle; • Transição suave da condição crítica para a estável. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitação na escolha do sinal de controle.

Na Tabela 6.2 pode-se notar a evolução do trabalho partindo de dois conceitos distintos de controlador, representados pelos dois primeiros modelos. Embora ambos utilizem a Lógica

Nebulosa como ferramenta, a diferença na estratégia de controle propiciou resultados distintos. Enquanto no primeiro modelo, Média Móvel, a estabilização é suave e as regiões de trabalho são mais amplas, mas a variação do *setpoint* é limitada, no segundo modelo, o Classificador de Regiões, há uma maior flexibilidade na seleção do sinal de controle e o controle é mais rígido devido às regiões de estabilidade menores o que acarreta no detrimento da qualidade da resposta. Ainda assim, ambos apresentaram limitação na escolha do sinal de controle e dificuldades no tratamento da variação do *setpoint*.

Mais adiante, as outras duas estratégias de controle, composições destes dois conceitos, permitiram corrigir as dificuldades complementares dos controladores, como a parametrização dos conjuntos nebulosos através do classificador, minimizando as dificuldades com a oscilação entre regiões de trabalho, e como a conjugação do estreitamento da faixa de estabilidade com o alargamento da faixa de trabalho do sinal de controle, que permite minimizar as alterações no acionamento da bomba. Ainda, para este último aspecto, o uso da histerese no lugar dos conjuntos nebulosos reforçou o resultado obtido anteriormente, e a aplicação do mecanismo de auto-ajuste das constantes de saída permitiu a adequação do controlador à dinâmica de longo prazo do VASPS, garantindo a longa vida útil do controlador, evitando necessidades de reprogramação.

Finalmente, uma desvantagem presente em todos os modelos apresentados na tabela é a limitação na escolha do sinal de controle. Isto ocorre como consequência da opção de preservação do atuador, sendo parte do conceito da estratégia adotada, um detrimento do desempenho em função da estabilidade operacional. Este resultado era esperado e o retorno adquirido ao se abrir mão desta característica do sistema apareceu claramente no sinal de controle adotado.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho buscou-se abordar o problema de controle do VASPS com estratégias de controle diferentes das tradicionais, focando nos requisitos do sistema e da bomba BCS, e não se restringindo às tecnologias clássicas presentes no controlador industrial. O primeiro ganho desta abordagem pôde ser notado na seção 6.1.1, mais detalhada no Apêndice A, que apresentou que o uso de uma técnica de controle mais adequada é possível se melhorar o sinal de controle sem a perda do desempenho do sinal de resposta, e também sem a interferência direta no controlador usado em campo. A estratégia apresentada propicia adicionalmente outro efeito positivo, que é o constante monitoramento da operação do sistema através da linguagem intuitiva aplicada à sua operação manual, funcionando como uma redundância e conseqüentemente provendo maior segurança para o operador e robustez para o sistema.

Ao passo que se foi permitido interferir na tecnologia presente no sistema, foram então estudados novos conceitos e novos modelos de controladores, em diferentes níveis de exigência para o sistema, de forma que as técnicas de controle inteligente aplicadas se mostraram adequadas para o tratamento de sistemas contínuos e proveram maior facilidade na tomada de decisão automática. Uma síntese das dificuldades e vantagens de cada modelo desenvolvido segundo a estratégia de minimização do esforço de controle é apresentada na Tabela 6.2. Com isso, inúmeros ganhos foram encontrados:

- **Melhoria de desempenho operacional:** A adoção de uma estratégia adequada permitiu o balanceamento do compromisso desempenho *versus* esforço de controle, com a proposição de controladores que visam reduzir o custo da operação em alto mar através da redução no número de intervenções submarinas causada pelo

aumento da vida útil da bomba BCS. Isso provou ser possível a melhoria do desempenho operacional no uso do BCS, criticado em Devegowda e Scott (2003);

- **Flexibilidade do controlador:** O gerenciamento do compromisso desempenho *versus* esforço de controle permite alternar entre diversas condições de operação do sistema, comprovando a flexibilidade da tecnologia de controle inteligente. Isso também mostrou que a suavização do sinal de controle implica na geração de picos na resposta e vice-versa;
- **Interface intuitiva:** O uso da Lógica Nebulosa permite acompanhar o processo da mesma forma que se faz quando em campo, ao ler as curvas de operação do sistema. Esta característica é mais evidente nas subseções da seção 6.2 do que na seção 6.1.1, e permite a reformulação do sistema supervisorio para que este tenha uma interface mais amigável para com o usuário;
- **Concepção de um Simulador:** A coesão da lógica aplicada no sistema, com o monitoramento de diversas variáveis-chave e com o uso de um gerador de golfadas mais agressivo que o sinal obtido em campo permite a simulação da operação de forma intuitiva, o que pode ser usado no treinamento e desenvolvimento de pessoas, inclusive com a possibilidade de treinamento de situações emergenciais, que só pode evitar complicações em situações de risco, dada a dificuldade de se encontrar, capacitar e manter mão-de-obra adequada para o ambiente de exploração em águas profundas;
- **Aumento do entendimento geral sobre o sistema:** O conhecimento da dinâmica física do VASPS propiciado pelas curvas de resposta permite, em longo prazo, a maior adequação das tecnologias e com menor tempo despendido com experimentação em campo, dada a existência do simulador. Pode-se citar como conhecimento adquirido sobre o sistema sua alta constante de tempo de resposta – algo desconhecido antes da primeira operação e evidente nos resultados obtidos –, os limites de oscilação da resposta do sistema e as tendências geradas pelos sinais de erro e média do erro – que antes do tratamento com o Classificador ou com os Conjuntos Nebulosos, eram variáveis sem uma correlação muito clara e cuja conclusão sobre seu impacto no sistema não era tão intuitiva;

- **Ajuste automático:** A contribuição gerada pela elaboração do mecanismo independente de auto-ajuste do controlador é uma ferramenta de automação, que pode ser aplicada a outros conceitos de controlador, adequando o funcionamento do equipamento à conhecida dinâmica de decaimento de vazão de produção e de pressão de poços. Esta ferramenta reduz a necessidade da reprogramação periódica dos equipamentos.

Como propostas para trabalhos futuros usando os conceitos desenvolvidos neste trabalho sugerem-se as seguintes atividades:

- A Tabela 6.1 apresenta uma série de configurações possíveis para o modelo do último controlador desenvolvido, o Classificador por Regiões com Média e Histerese, e pode ser usada como guia para a experimentação em laboratório. Um trabalho de aplicação é o próximo passo para a validação do desenvolvimento obtido neste trabalho;
- O modelo físico do VASPS proposto neste trabalho supõe algumas considerações realizadas no Capítulo 3 que podem ser estudadas mais a fundo a fim de obter um modelo mais refinado. Este trabalho poderia inclusive minimizar os desvios a serem encontrados em um estudo experimental e poderia se dar nas seguintes frentes de trabalho:
 - Curva da Bomba: poderia ser estudado o efeito de variação da curva de carga do sistema ocasionada pela variação de velocidade (vazão) do fluido;
 - Dinâmica do Nível: considerar os efeitos da pressão na variação do nível ou estudar a viabilidade de se trabalhar com o vaso pressurizado, mapeando a relação entre as variáveis;
 - Controle de pressão e temperatura: adaptar os controladores obtidos para a realização de malhas de controle adicional no sistema, propondo a utilização de atuadores adequados para cada situação, como por exemplo o uso de uma válvula *choke* para controle da pressão do gás;
 - Cruzamento de variáveis: realizar um estudo fenomenológico para encontrar a interrelação das variáveis volume, pressão e temperatura, possivelmente incluindo os efeitos na bomba, como sua vibração;

- Os controladores propostos neste trabalho podem também ser aplicados a outros processos contínuos. Estudos com grandes potenciais de otimização de sistemas podem se seguir na adaptação dos controladores para controle de pressão, temperatura e vazão em outros tipos de separadores ou em transporte em gasodutos. Também poderia ser estudado o controle de outro tipo de atuado, com outros métodos de elevação artificial, como o BCP;
- Para a área de controle inteligente, há estudos possíveis na integração de maior capacidade de inferência, conclusão e decisão nos controladores, como por exemplo utilização de redes neurais para aprendizado do processo e previsão de condições futuras baseadas na leitura dos distúrbios de entrada em campo. É possível imaginar que com o conhecimento do escoamento, sua sensorização pode permitir um ajuste do controlador para uma condição prevista em futuro próximo, não necessitando correções por realimentação, que esperam haver um erro real para corrigi-lo.
- Outras técnicas de controle também podem ser empregadas, como o controle distribuído que permita a integração de sistemas trabalhando concorrentemente, de forma a gerenciar, por exemplo, as entradas advindas da produção na plataforma. Este controle distribuído pode lançar mão da técnica de agentes inteligentes.

Referências Bibliográficas

- Aström, K. J., Wittenmark, B. *On Self Tuning Regulators*. Automatica, 1973.
- Aström, K. J., Wittenmark, B. *Adaptive Control*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1994.
- Babůska, R. *Fuzzy modeling for control*. Publication Boston. Kluwer, 1998.
- Boullart, L., Krijgsman, A. J., Vingerhoeds, A. *Application of Artificial Intelligence in process control*. Pergamon Press.Ltd, Headington Hill Hall, Oxford, 1992. ISBN 0 08 042017 6.
- Campos, M. C. M., Loureiro, P., Filho, A. B. *Novas estratégias de controle para a plataforma P-55*. Rio Oil & Gás Expo and Conference, 2006, Rio de Janeiro, 11-14 Setembro, IBP1910_06.
- Clarke, D. W., Gawthrop, P. J. *Self-tuning controller*. Proc. IEE, 1975.
- de Melo, A. V., Mendes, J. R. P., Serapião, A. B. S. *Controle inteligente para o separador VASPS*. 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Campinas, 2007, 21-24 Outubro, 2.3.0078-2.
- de Melo, A. V., Mendes, J. R. P., Serapião, A. B. S., Guilherme, I. R., Estevam, V. *Controle supervisorio inteligente para o separador submarino VASPS*. IV Congresso Rio Automação, 2007, Rio de Janeiro, 9-10 Maio, IBP568_07.
- de Melo, A. V., Mendes, J. R. P., Serapião, A. B. S., Estevam, V. *Fuzzy tuned PID control for the VASPS subsea separator*. 6th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications, 2007, São José do Rio Preto., 22–25 Maio.
- do Vale, O. R., Garcia, J. E., Villa, M. *VASPS installation and operation at Campos Basin*. Offshore Technology Conference, OTC 14003, Houston, Texas, Maio de 2002.
- Devegowda, D., Scott, S. L. *An Assessment of Subsea Production Systems*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2003, Denver, Colorado, 5–8 Outubro, SPE 84045.
- Estevam, V. *Uma Análise Fenomenológica da Operação de Bomba Centrífuga com Escoamento Bifásico*. Tese de Doutorado, FEM/IG, Unicamp, Março de 2002.

- França, F. A., Rosa, E. S., Bannwart, A. C., Moura, L. F., Alhanati, F. J. *Hydrodynamic studies on a cyclonic separator*. Offshore Technology Conference, OTC 8059, Houston, Texas, Maio de 1996.
- Griffith, P., Wallis, G. B. *Two-Phase Slug Flow*. 1965. Transactions ASME. J. Heat Transfer, 83, 307.
- Jager, R. *Fuzzy logic in control*. Ph.D. Thesis, Technich University Delft, ISBN 90-9008318-9, Dutsh, 1995.
- Jager, R., Verbruggen, H. B., Brujin, P. M., Krijgsman, A. J. *Real-time Fuzzy expert control*. International Conference on Control 1991. pp 966-970, vol 2.
- Jantzen, J. *Tuning of Fuzzy PID controllers*. Technical Report n°. 98-H 871, Technical University of Denmark, Department of Automation, Lyngby, DENMARK, 1998.
- Krstic, M., Kokotovic, P. V., Kanellakopoulos, I. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1995.
- Ogata, K. *Engenharia de controle moderno*. Publication Upper Saddle River. Prentice-Hall, 1996.
- Passino, K. M., Yurkovich, S. *Fuzzy control*. ISBN 0-201-18074-X. Publication Menlo Park, California. Addison Wesley Longman, Inc., 1998.
- Peixoto, G. A., Ribeiro, G. A. S., Barros, P. R. A., Meira, M. A., Barbosa, T. M. *VASPS Prototype in Marimba Field — Workover and Restart*. 2005 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, 20–23 Junho, SPE 95039.
- Riid, A. *Transparent Fuzzy Systems: modeling and control*. Ph.D. Thesis on Informatics and system engineering, Tallinn Technical University, Estonia, 2002.
- Santos, M., Dormido, S., de la Cruz, J. M. *Fuzzy-PID Controllers vs. Fuzzy-PI Controllers*. Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996. Volume 3, pp 1598-1604.
- Santos, M., Dormido, S., de la Cruz, J. M., de Madrid, A. P. *Between Fuzzy-PID and PID-Conventional Controllers: a Good Choice*. Proceedings of the 1996 Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society-NAFIPS, pp. 123-127. Berkeley, IEEE, 1996.

- Shoham, O., Kouba, G. E. *State of the art cylindrical-cyclone compact-separator technology*. SPE Distinguished Author Series. 1998. SPE 39600.
- Skogestad, S., Postlethwaite, I. *Multivariable Feedback Control*. Publication Baffins Lane. John Wiley & Sons, 1996.
- Storkaas, E., Skogestad, S. *Cascade Control of Unstable Systems with Application to Stabilization of Slug Flow*. Apresentado no IFAC-Symposium Adchem 2003, Hong Kong, Janeiro de 2004.
- Storkaas, E., Skogestad, S., Godhavn, J.-M. *A low-dimensional dynamic model of severe slugging for control design and analysis*. Apresentado no Multiphase 2003, San Remo, Itália, 11-13 Junho.
- Takagi, T., Sugeno, M. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985.
- Tanaka, K., Sugeno, M. *Stability analysis and design of fuzzy control systems*. Fuzzy Sets and Systems, 1992.
- Teixeira, A. F., Mendes, J. R. P., Serapião, A. B. S., Guilherme, I. R. *Controle inteligente para o sistema de separação e bombeamento submarino – VASPS*. Rio Oil & Gás Expo and Conference 2006, IBP1802_06.
- Teixeira, A. F., Mendes, J. R. P., Estevam, V., Guilherme, I. R., Morooka, C. K., Rigo, J. R. *Um controlador Fuzzy para o sistema de separação e bombeamento submarino – VASPS*. Rio Oil & Gás Expo and Conference 2004, IBP11804.
- Tzafestas, S., Papanikolopoulos, N. *Incremental Fuzzy expert PID control*. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 37(5):365–371, Outubro de 1990.
- Van Nauta Lemke, H. R., De-Zhao, W. *Fuzzy PID supervisor*. Proceedings of the 24th IEEE Conference on Decision and Control, Fort Lauderdale, Florida, USA, 1985.
- Wang, S., Mohan, R. S., Shoham, O., Kouba, G. E. *Dynamic Simulation and Control-System Design for Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Separators*. SPE 71308, SPE Journal, 2001.
- Wang, L.-X. *Adaptive Fuzzy systems and control: design and stability analysis*. Publication Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1994.
- White, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. Editora McGraw Hill, 4ª Edição, 2002.

Zhao, Z., Tomizuka, M., Isaka, S. *Fuzzy gain scheduling of PID controllers*. IEEE transactions on systems, man. and cybernetics, vol 23., n°. 5, Setembro/Outubro de 1995.

Apêndice A

Dados de Projeto para o Modelo Supervisório

1.3 PD

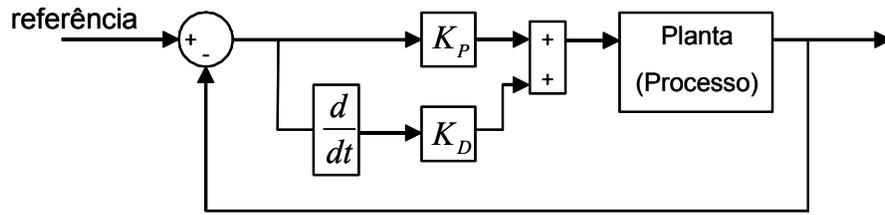


Figura A.3. Diagrama de Blocos do Controlador PD.

$$\left. \begin{array}{l} K_p = 10 \\ K_d = 300 \end{array} \right\} \rightarrow K(s) = 300s + 10$$

$$H(s) = \frac{K(s) \cdot P(s)}{1 + K(s) \cdot P(s)} = \frac{(300s + 10) \cdot 3.011}{s + (300s + 10) \cdot 3.011} = \frac{(10s + 0.001) \cdot 3.33e^{-3}}{s + 3.33e^{-2}}$$

$$\text{pólo} : -3.33e^{-2}$$

2 PROJETO DOS CONTROLADORES INTELIGENTES

2.1 CONTROLE FPID

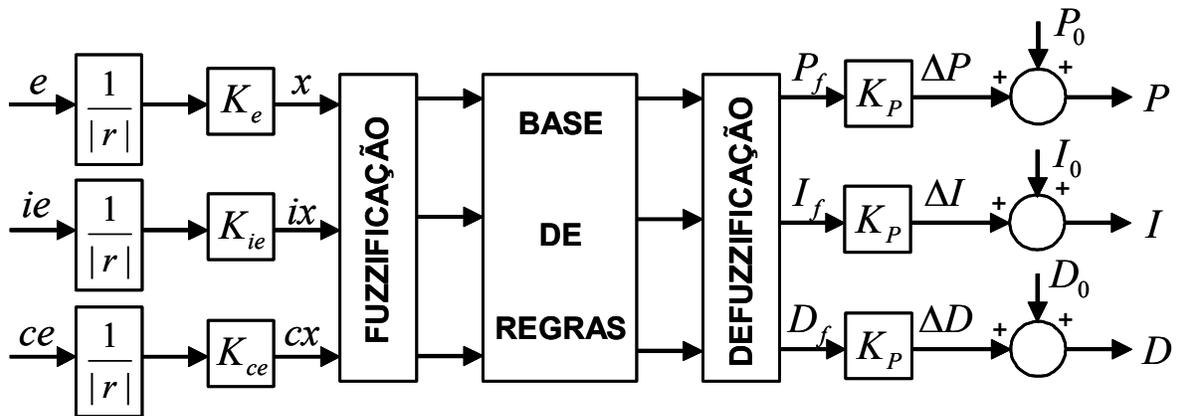


Figura A.4. Diagrama de blocos do controlador FPID.

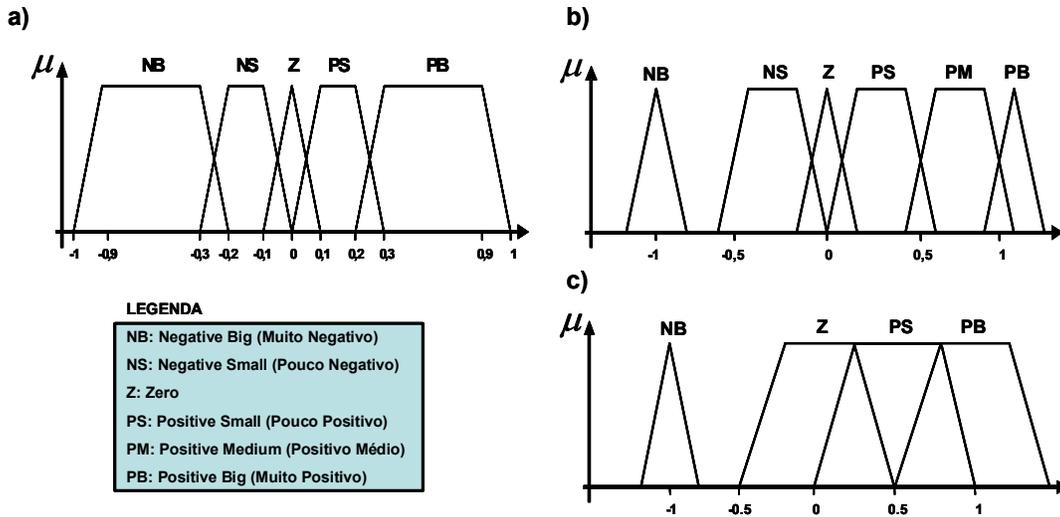


Figura A.5. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPID. a) Variáveis de entrada (x , ix , cx). b) Variação da constante K_P , ΔP . c) Variação das constantes K_I e K_D , ΔI e ΔD .

Tabela A.1. Base de regras do controlador supervisor FPID

Pf		Variação do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	PS	4.0	5.0	6.3	5.0	4.0
	PB	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

If		Integral do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	1.0	1.0	5.0	4.0	3.0
	PS	1.0	1.0	4.0	3.0	3.0
	PB	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0

Df		Variação do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	1.0	1.0	5.0	4.0	3.0
	PS	1.0	1.0	4.0	3.0	3.0
	PB	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0

2.2 CONTROLE FPI

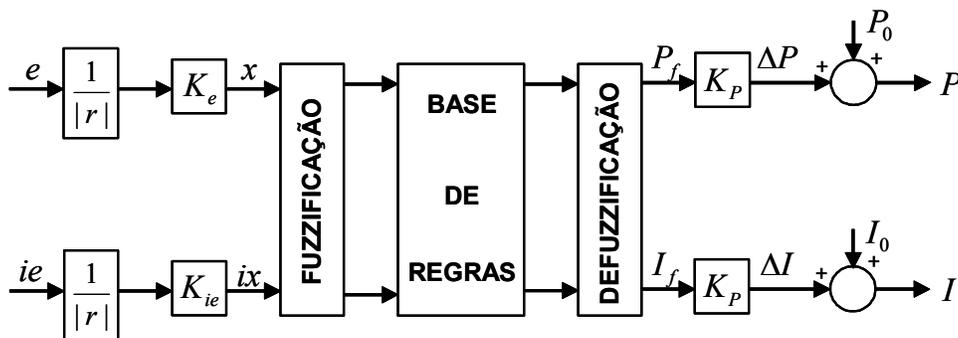


Figura A.6. Diagrama de blocos do controlador FPI.

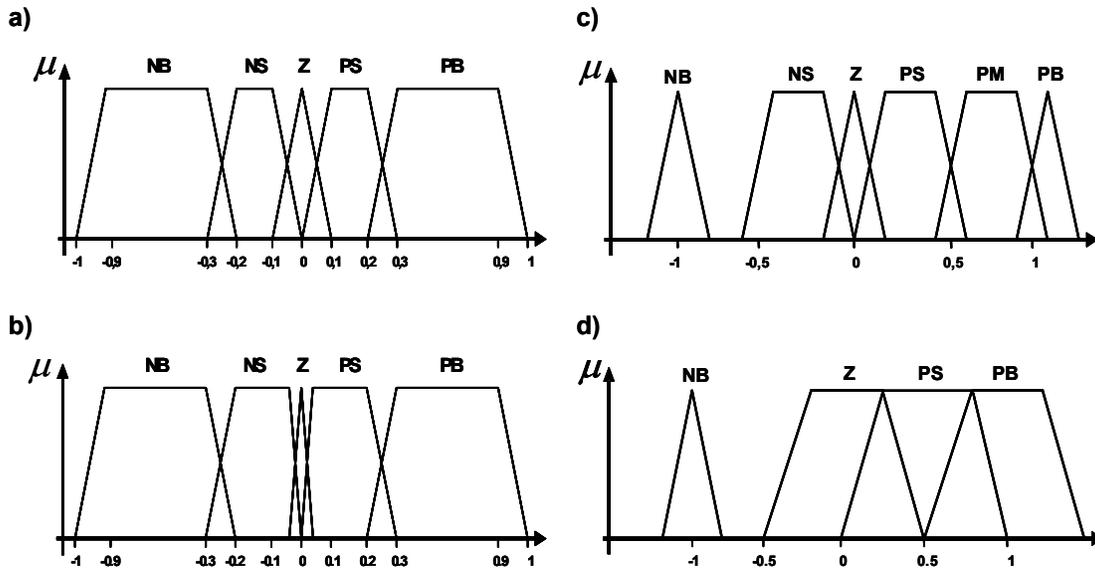


Figura A.7. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPI. a) Erro relativo, x . b) Integral relativa do erro, ix . c) Variação da constante K_P , ΔP . d) Variação da constante K_I , ΔI .

Tabela A.2. Base de regras do controlador supervisor FPI

Pf		Integral do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	PS	7.0	6.5	5.5	5.0	4.0
	PB	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

If		Integral do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	1.0	1.0	5.0	4.0	3.0
	PS	1.0	1.0	4.0	3.0	3.0
	PB	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0

2.3 CONTROLE FPI COM DERIVADA

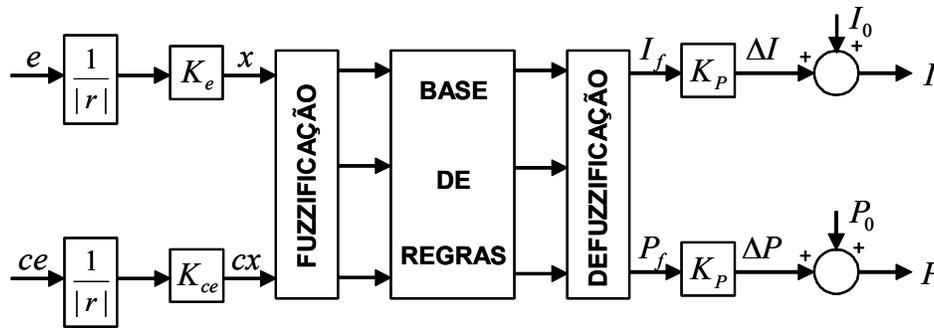


Figura A.8. Diagrama de blocos do controlador FPI com derivada.

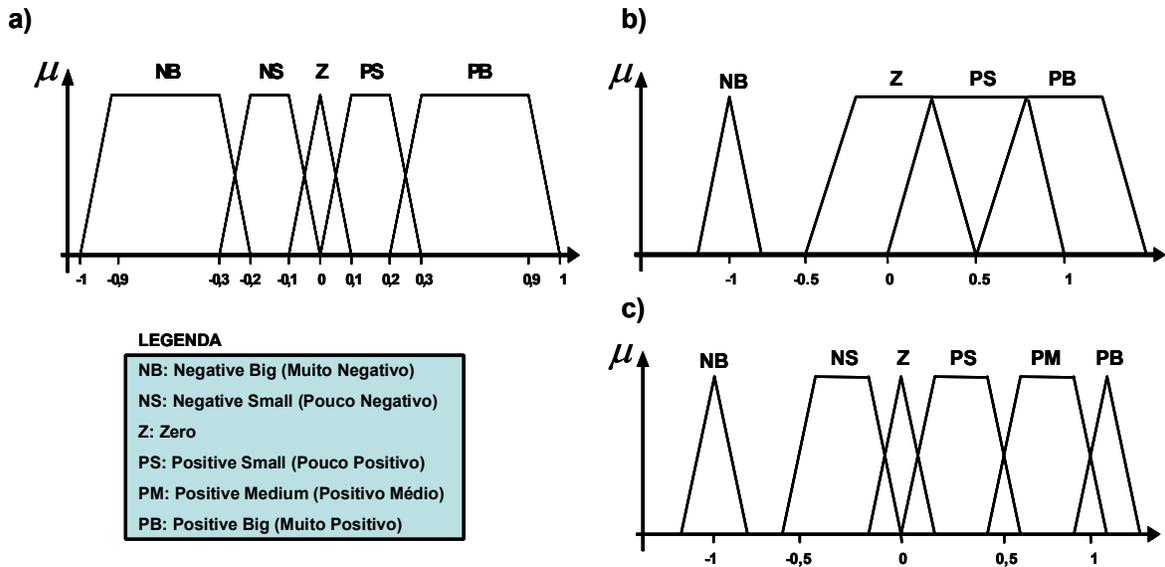


Figura A.9. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPID. a) Variáveis de entrada (x , ix , cx). b) Variação da constante K_P , ΔP . c) Variação da constante K_I , ΔI .

Tabela A.3. Base de regras do controlador supervisor FPI com derivada

Pf		Variação do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0
	PS	1.0	1.0	5.0	4.0	3.0
	PB	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0

If		Variação do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	PS	7.0	6.5	5.5	5.0	4.0
	PB	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

2.4 CONTROLE FPD

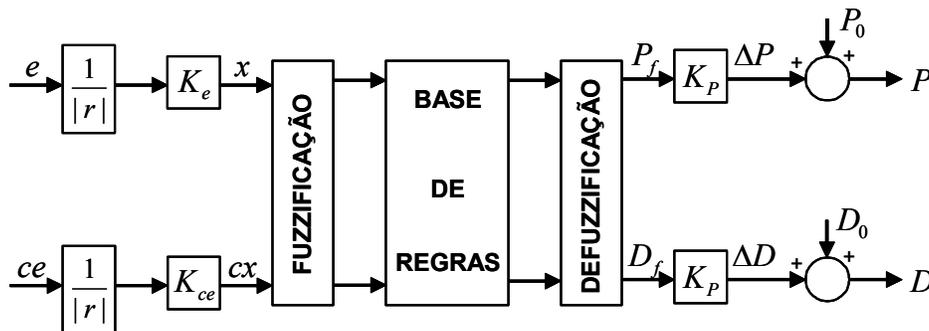


Figura A.10. Diagrama de blocos do controlador FPD.

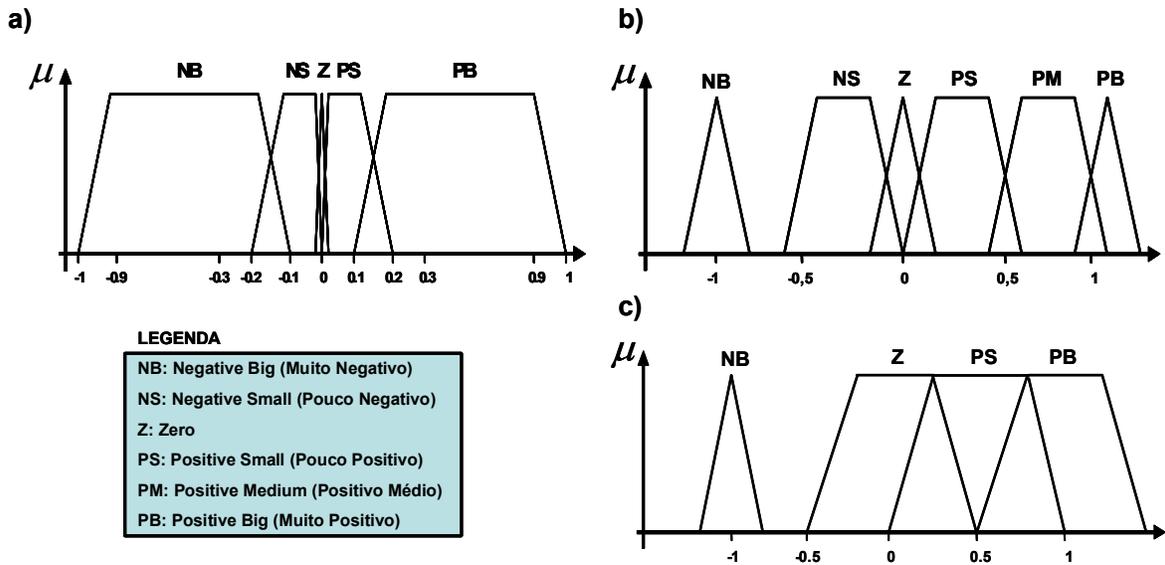


Figura A.11. Conjuntos Nebulosos para o controlador FPD. a) Variáveis de entrada (x , ix , cx). b) Variação da constante K_P , ΔP . c) Variação da constante K_D , ΔD .

Tabela A.4. Base de regras do controlador supervisor FPD

Pf		Variação do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	PS	7.0	7.0	7.0	5.0	4.0
	PB	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Df		Variação do Erro				
		NB	NS	Z	PS	PB
Erro	NB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	NS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Z	1.0	1.0	5.0	4.0	3.0
	PS	1.0	1.0	4.0	3.0	3.0
	PB	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0

3 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

As simulações levaram em consideração uma partida do sistema com o nível do reservatório em seu valor mínimo de forma a avaliar o desempenho em um caso crítico e com leitura real abaixo da referência. Esta situação permite avaliar a resposta do sistema no enchimento, que é mais crítico que o esvaziamento, uma vez que a bomba deve ser acionada apenas após estar submersa, sendo estritamente necessário um comportamento controlado. A referência de nível para o sistema foi de 30 metros e as simulações foram realizadas com o sistema supervisor e sem este para efeito de comparação e mensuração da melhoria no desempenho.

A situação crítica imposta permite a avaliação da resposta em regime transiente e seu estacionamento após este período. Este efeito está reproduzido na Figura A.12, onde é apresentada a resposta do sistema com o controlador PID puro contra a resposta com o

controlador FPID. Além da resposta do sistema, está sendo avaliado o sinal de controle que gerou a dada resposta.

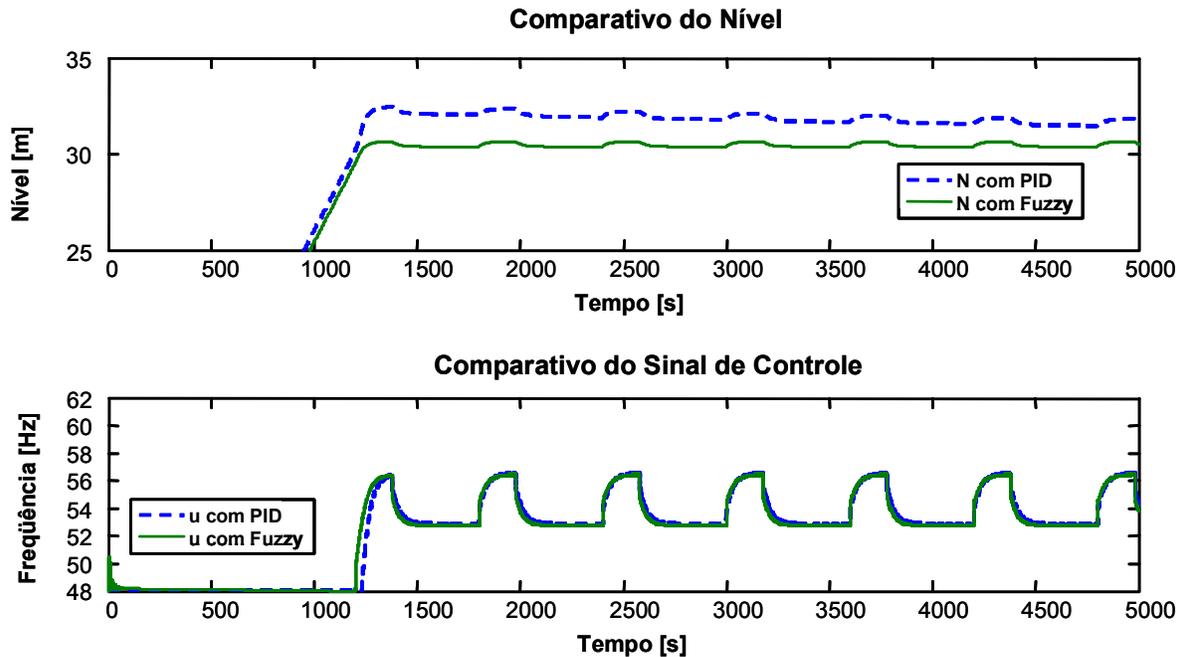


Figura A.12. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PID e o FPID.

Conforme apresentado na Figura A.12, nota-se uma melhoria significativa no sobressinal e no tempo de estabilização do sistema, tão embora o sinal de controle seja muito similar. Considerando que o supervisor *Fuzzy* aumenta a constante D em torno do zero, é natural que a resposta possua menor sobressinal, dado que o amortecimento foi aumentado. Entretanto, há erro estacionário no sistema, causado pela saturação do efeito integral em valores negativos muito altos. Ambos estes efeitos podem ser observados na Figura A.13, que apresenta o comportamento das constantes ao longo da simulação, bem como a decomposição do sinal de controle entre as contribuições individuais de cada constante.

Através da análise da Figura A.13, é possível afirmar que no sistema com controle PID, o sinal integral foi saturado na saída do controlador, gerando o atraso na resposta em acompanhar o *setpoint*, e conseqüentemente os piores requisitos de desempenho. No sistema FPID, a constante I foi anulada, não contribuindo negativamente para o desempenho, uma evidência de melhoria no sistema.

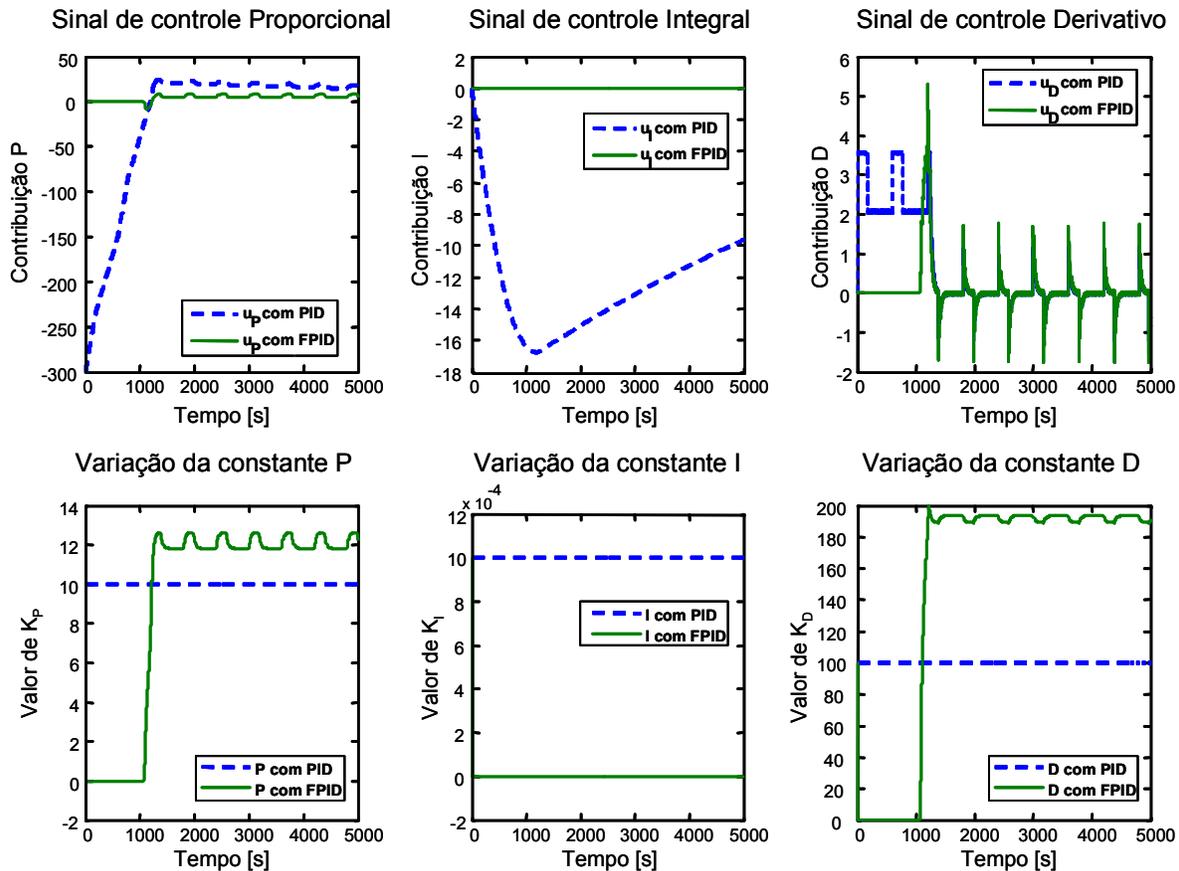


Figura A.13. Sinal de controle e comportamento das constantes entre o PID e o FPID.

Para as variações no controle PID, foram realizadas também simulações, que apresentaram um comportamento das constantes e sua composição no sinal de controle muito parecidas com as do controle PID completo. O desempenho, no entanto, mostrou-se diferente no caso do controle PD e do PI com derivada, que não possuem a entrada integral. E embora essa característica tenha imprimido uma diferença de sobresinal menor e pouco perceptível no caso do controle PD, o sinal de controle apresentado foi bastante parecido. Tais efeitos são observados na Figura A.14, que apresenta a resposta comparativa entre PD e FPD.

Neste caso do controle FPD, os conjuntos nebulosos tiveram de ser refinados muito mais que o dos outros arranjos, de forma a proporcionar uma resposta com desempenho mais significativo. Além disso, houve um reforço de sinal na base de regras, que permitiu o sistema agir um pouco antes e ter uma leve melhoria de desempenho. É possível, no entanto, utilizar a mesma abordagem para os outros supervisores, refinando as bases e melhorando o controle, pois essa metodologia é comumente aplicada em lógica *Fuzzy*.

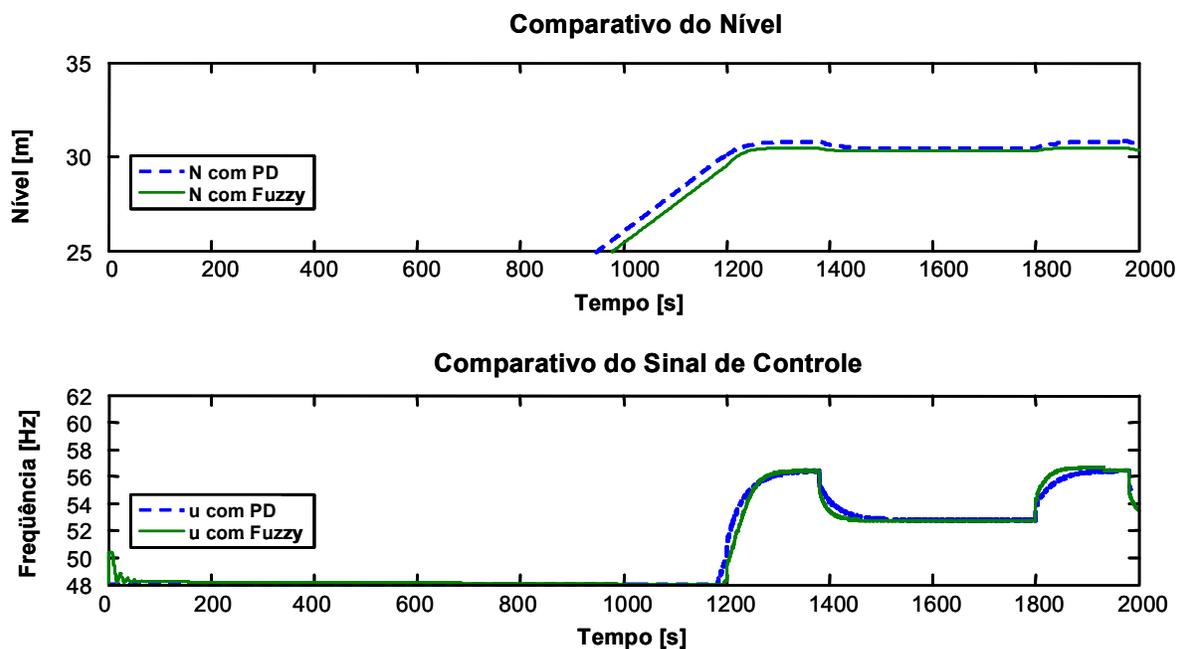


Figura A.14. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PD e o FPD.

Já no caso do controle PI com derivada a diferença foi bastante expressiva. Esta configuração apresentou um desempenho completamente diferente das outras, parecendo ser a mais adequada, uma vez que não apresentou sobresinal e que suavizou a resposta do sistema. A resposta apresentou ainda uma atuação preditiva sobre o nível, antes que este atingisse o valor de referência. No entanto, o supervisor aumentou o tempo de estabilização, como é visível na Figura A.15. Isso pode ser resolvido com o refinamento dos conjuntos nebulosos, conforme realizado para o controle FPD.

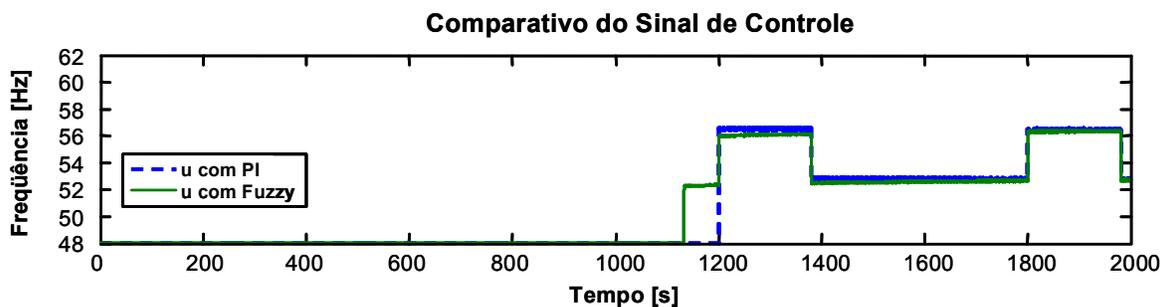
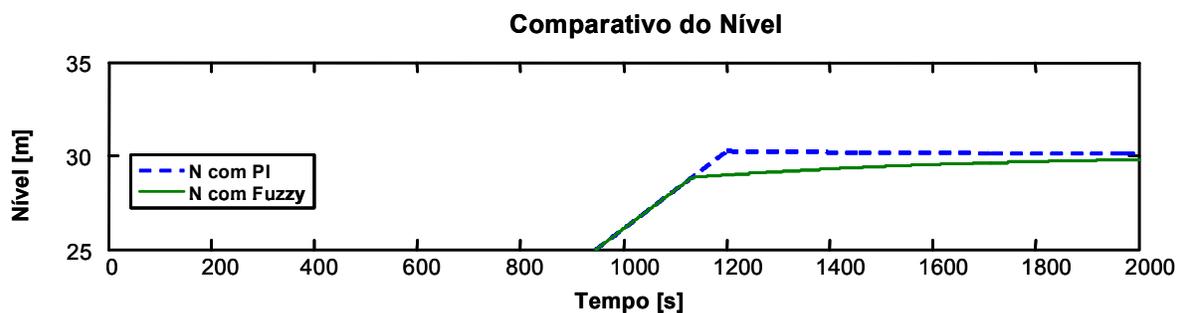


Figura A.15. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PI com derivada e o FPI com derivada.

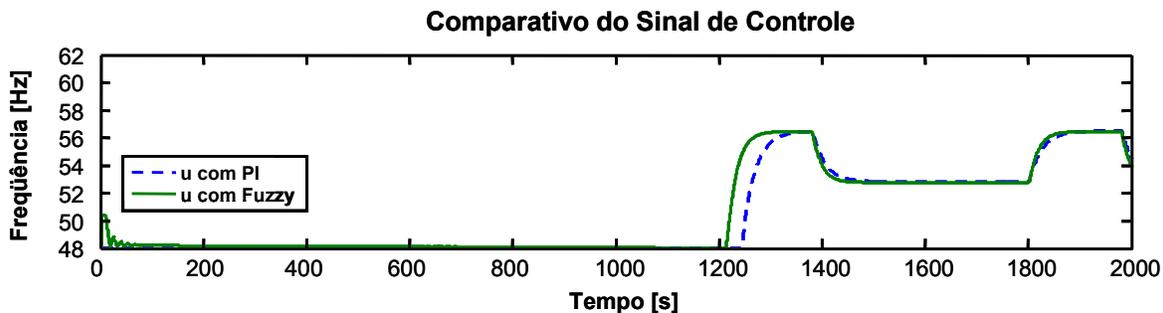
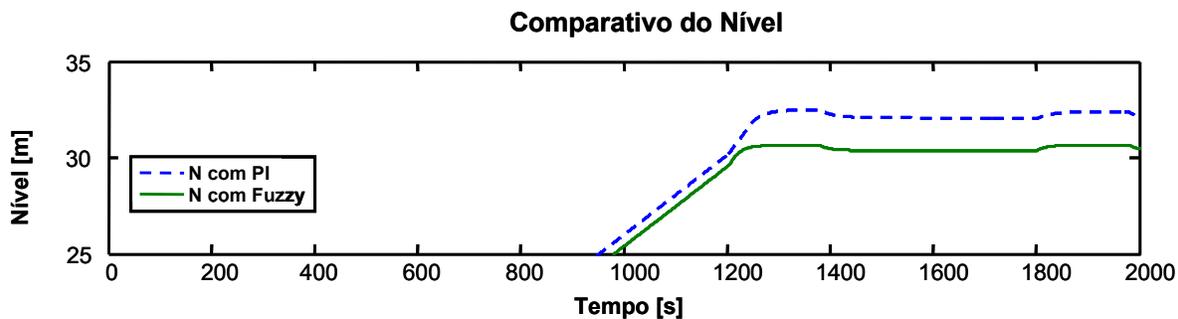


Figura A.16. Comparativo da resposta e do sinal de controle entre o PI e o FPI.

Apêndice B

Simulação de experimentos para o controlador
Histerese com Auto-ajuste

O controlador Histerese com Auto-ajuste, selecionado para validação experimental, passou por uma série de simulações computacionais de forma a verificar suas condições limite. Idealmente, as simulações deveriam ser testadas para $t \rightarrow \infty$, e então o sinal de controle deveria ser reduzido o máximo possível. Dada a impossibilidade, é necessário ao menos verificar a resposta para tempos de simulação muito grandes. Além disso, é essencial considerar que o modelo atual do Gerador de Golfadas está super-reforçado para representar o pior caso de golfadas durante todo o tempo de simulação, o que nos permite creditar maior confiabilidade ao modelo simulado. Assim, aliando a condição de tempo de simulação estendido ao Gerador de Golfadas em situação crítica, é possível se ter a idéia visual de seu comportamento conforme apresentado na Figura B.1, o que permite entender que as golfadas simuladas no projeto são muito mais constantes e repentinas do que em um caso real.

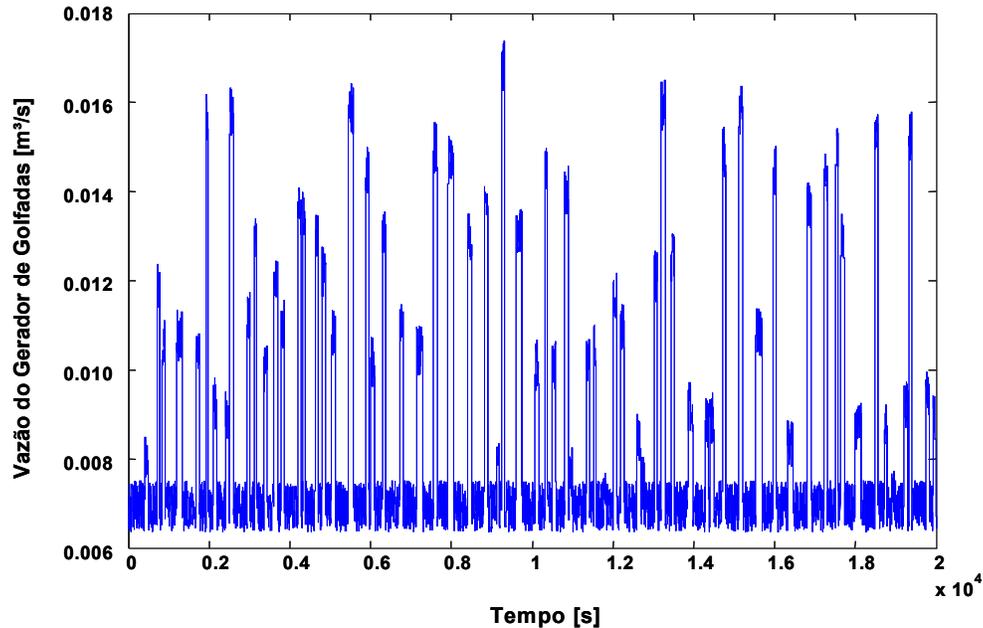


Figura B.1. Sinal do Gerador de Golfadas para o tempo de 20000 segundos.

Com isso, diversos experimentos foram planejados com o intuito de estabelecer a relação que os parâmetros operacionais têm com a qualidade do sinal de controle e o desempenho do sistema em termos de faixa de variação do Nível. Os parâmetros avaliados se restringiram àqueles que têm maior influência nesta relação, e podem ser observados com seus valores em negrito para cada simulação na Tabela B.1, que apresenta também os valores utilizados para todas as outras variáveis. Ademais, as simulações A, B e C foram simuladas no período de 20.000 segundos, enquanto que a 1, a 2 e a 3 foram feitas com o tempo estendido de 100.000

segundos, mantendo constantes todos as variáveis cujos valores permanecem clareados em cinza na Tabela B.1.

Tabela B.1. Planejamento dos experimentos computacionais para verificação da relação entre parâmetros, sinal de controle e resposta do sistema.

Simulação	Ordem	Variáveis							
		N_0	SP	n	h_2	h_1	$[u_{NB} u_{NS} u_z u_{PS} u_{PB}]$	rsl/fsl	
A	11	30	30	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%	
	12	30	30	4000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%	
	21	30	var	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%	
	22	30	var	4000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%	
B	1	60	var	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 56 54 52 48]	2%	
	2	60	var	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55.5 54 52.5 48]	2%	
	3	60	var	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	2%	
C	1	60	30	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%	
	2	60	30	2000	15% - 15%	35% - 75%	[60 56 54 52 48]	2%	
	3	60	30	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 56 54 52 48]	2%	
1	1	30	30	2000	10% - 10%	35% - 75%	[60 55 54 53 48]	5%	
	2	30	30	2000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	5%	
	3	30	30	6000	40% - 30%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	10%	
2	1	30	30	4000	20% - 20%	40% - 80%	[60 56 54 52 48]	5%	
	2	30	30	4000	20% - 20%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	5%	
3	1	30	30	6000	40% - 30%	40% - 80%	[60 55.5 54 52.5 48]	10%	
	2	30	30	6000	40% - 30%	40% - 80%	[60 55 54 53 48]	10%	

Os símbolos apresentados na Tabela B.1 têm seu significado e valores utilizados para simulação apresentados na Tabela B.2, que explica as abreviações utilizadas para cada parâmetro.

A transição entre regiões de operação e a janela de histerese são dadas pelos parâmetros μ_1 , μ_2 , δ_1 e δ_2 , conforme apresentado no Capítulo 5, onde a histerese é modelada. Na Tabela B.2, os grupos de valores variantes são agrupados sob os parâmetros μ e δ , respectivamente.

Tabela B.2. Explicação dos parâmetros de simulação.

Abreviação	Valores	Significado
N_0	30 60	Nível inicial
SP	fixo (30) variável (var)	<i>Setpoint</i>
n	2000 4000 6000	Número de pontos usados no cálculo da média da pertinência de saída do classificador
δ	10%-10% 20%-20% 15% - 15% 40%-30%	Janelas de histerese. Corresponde aos valores δ_1 e δ_2
μ	35%-75% 40%-80%	Pertinências de transição entre regiões. Corresponde aos valores μ_1 e μ_2 .
f	[60 56 54 52 48] [60 55.5 54 52.5 48] [60 55 54 53 48]	Conjunto de patamares da rotação da bomba. Corresponde a $[u_{NB} u_{NS} u_Z u_{PS} u_{PB}]$
rsl/fsl	2% 5% 10%	Rampa de aceleração/desaceleração (<i>rising/falling slew rate</i>)

1 SIMULAÇÃO A

Conforme apresentado na Tabela B.1, a simulação A testou os efeitos de n na resposta do sistema, variando-a de 2000 para 4000 pontos enquanto as outras variáveis se mantiveram constantes. As quatro simulações foram agrupadas em dois conjuntos, onde o primeiro, apresentado na Figura B.2, foi realizado com o *setpoint* constante em 30 metros, e o segundo, na Figura B.3, foi realizado com o sinal de referência variando conforme apresentado. Em cada uma das duas figuras, há duas curvas, referentes às simulações com n em 2000 e n em 4000.

A influência do parâmetro n no sinal de controle é clara: quanto maior o número de pontos utilizados para computar o valor da pertinência média, mais lenta é sua modificação com os picos de pertinência instantânea, e portanto mais tempo o patamar de velocidade da bomba será mantido, e menor a quantidade de transições de velocidade. Dessa forma, espera-se poder maximizar o valor de n para simulações reais, sendo limitado apenas pela constante de tempo do sistema, pois um valor muito alto de n pode atrasar uma resposta necessária de correção de nível. Este efeito de atraso da resposta e conseqüente menor tempo de reação também é perceptível, embora mais suavemente, na Figura B.2 e na Figura B.3.

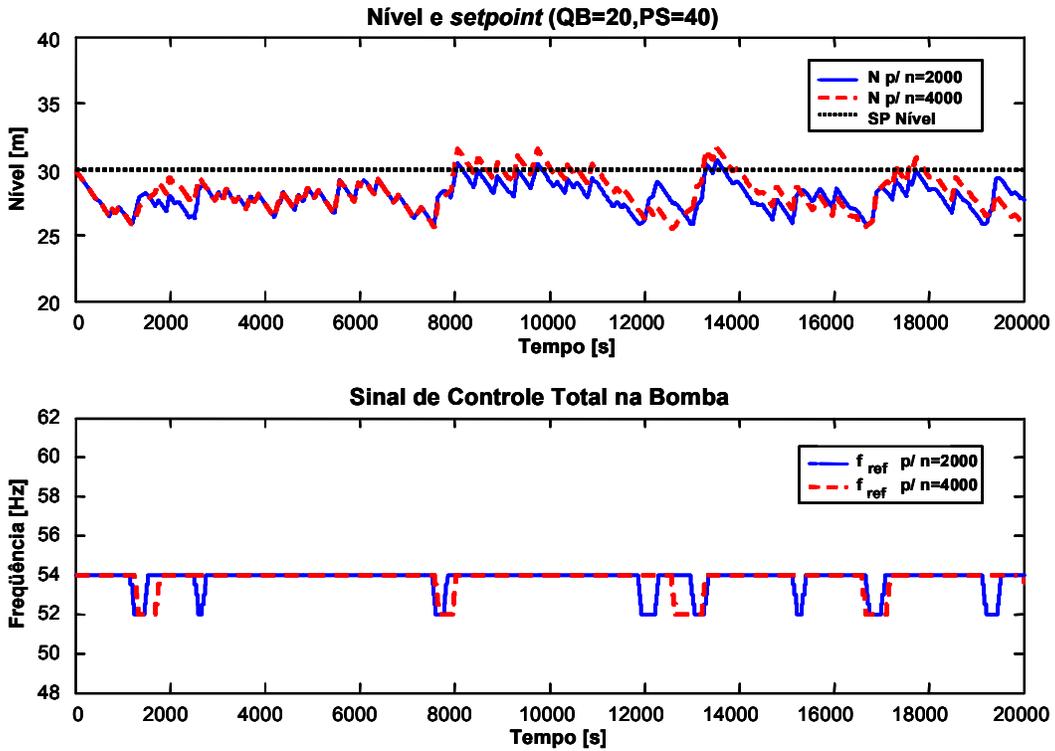


Figura B.2. Simulação A, teste de n , apresentando as curvas A11 e A12.

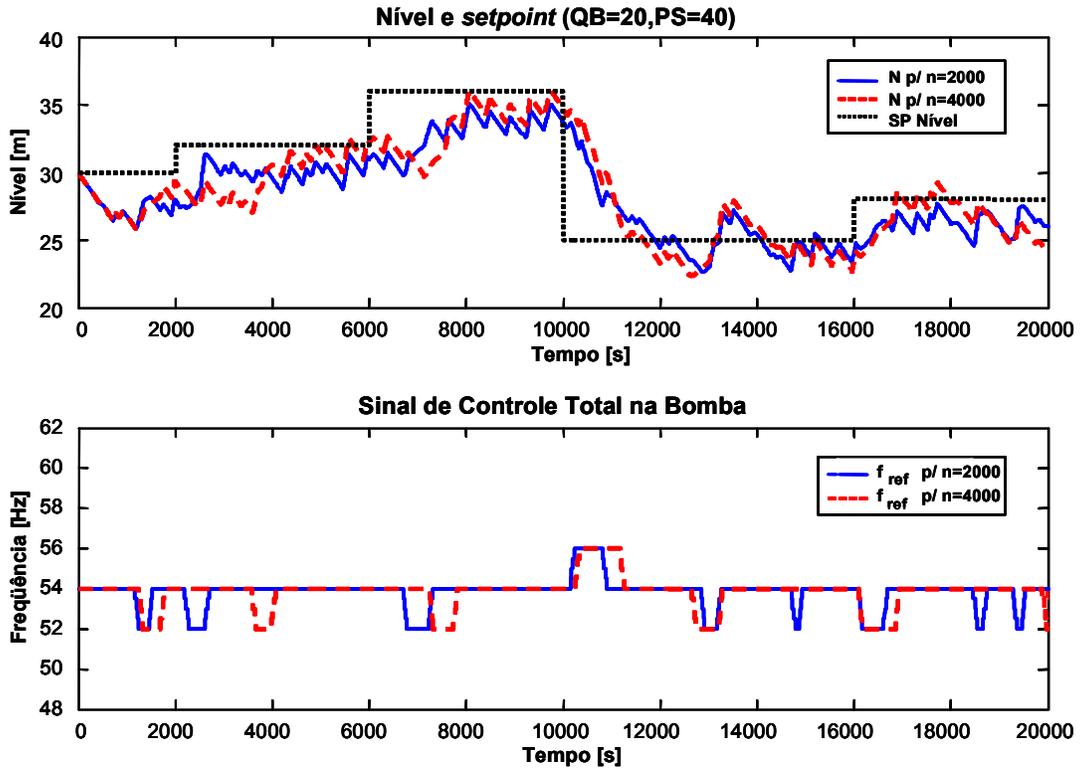


Figura B.3. Simulação A, teste de n , apresentando as curvas A21 e A22.

Com o tempo de amostragem de 0,1 segundo, o valor de 4000 pontos usa os últimos 400 segundos para realizar a média da pertinência. No sistema real, espera-se que a configuração de n seja tão maior quanto o histórico de variação do Nível permita concluir sobre o nível corrente e tão pequeno quanto seja suficiente para um tempo de reação efetivo.

2 SIMULAÇÃO B

A influência dos patamares de velocidade também é bastante relevante. As três simulações realizadas apresentaram variação no valor da velocidade alta e baixa para todos os outros parâmetros constantes, e foram plotadas juntas na Figura B.4. Nesta figura, a legenda faz referência à diferença de magnitude entre a velocidade intermediária e a alta ou baixa, de forma que, por exemplo, a curva B1 indexada na Tabela B.1 como tendo os patamares [60 56 54 52 48], é apresentada na Figura B.4 como 2 Hz, já que entre os patamares 56 e 54 Hz há 2 Hz de diferença.

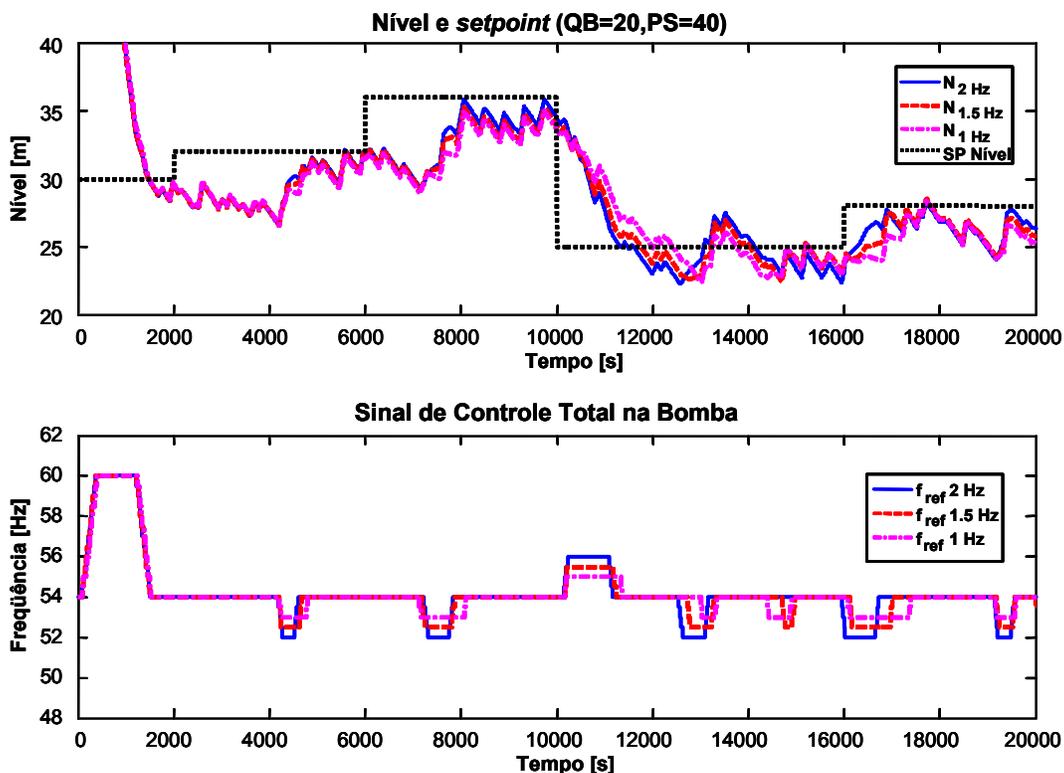


Figura B.4. Simulação B, teste de f , apresentando as curvas B1, B2 e B3.

A divisão entre os patamares de velocidade no sinal de controle é clara, já que as amplitudes são diferentes. No entanto, o parâmetro f não influencia no sinal de Nível, uma vez que a energia de controle é a mesma nos três casos, já que as áreas compensam sua diferença de

magnitude com períodos diferentes, implicando em melhor sinal de controle para variações menores da velocidade de acionamento da bomba. Curiosamente, a quantidade de acionamentos do patamar é a mesma para os três casos, o que é lógico uma vez que o sinal de resposta do sistema é o mesmo.

3 SIMULAÇÃO C

A última das simulações para o período de 20.000 segundos é o teste dos valores e das janelas de histerese, genericamente agrupados e chamados de parâmetro h . O valor apresentado na legenda para cada curva, de 10%, 15% e 20% para as simulações C1, C2 e C3 respectivamente, representa a janela de histerese δ .

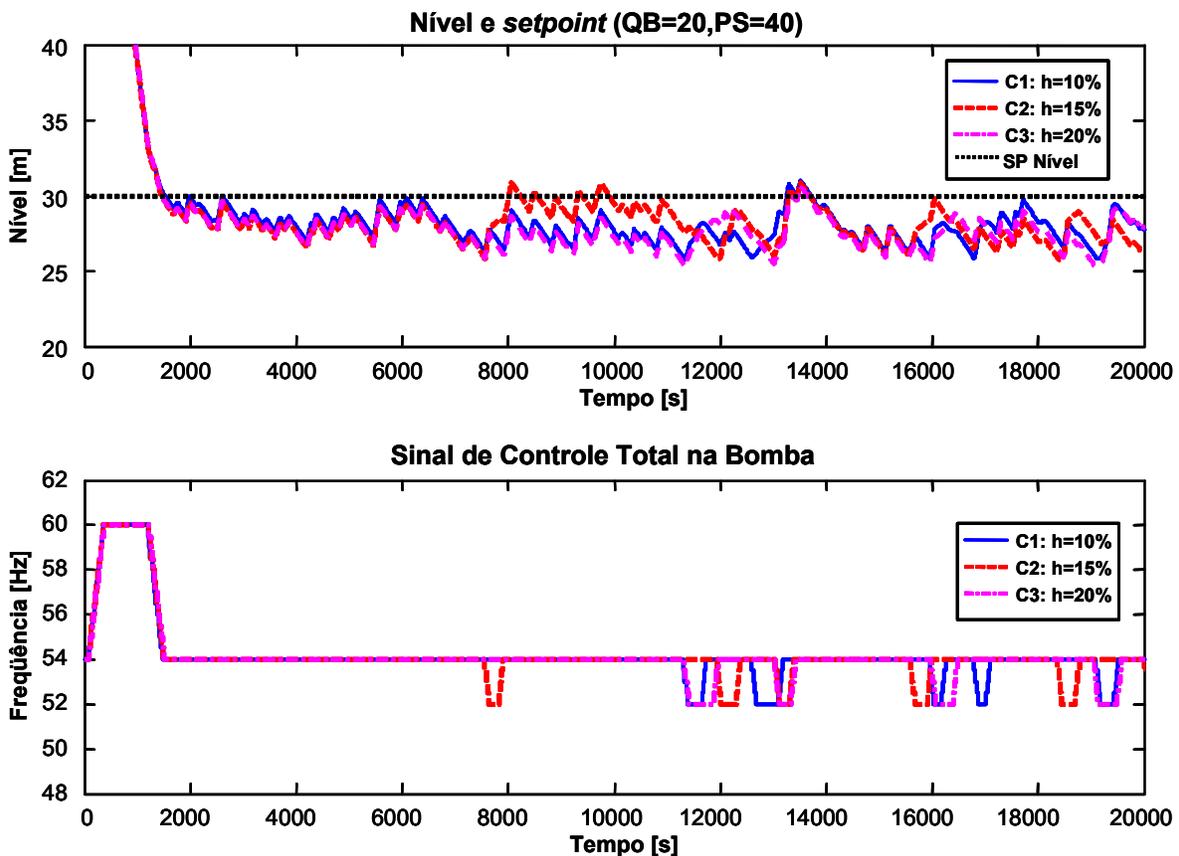


Figura B.5. Simulação C, teste de h , apresentando as curvas C1, C2 e C3.

Curiosamente, a variação isolada do parâmetro h – ou seja, dos parâmetros μ e δ – não causou modificações muito perceptíveis nem no sinal de controle tanto quanto na resposta do Nível. Podem-se notar os sinais caminhando muito próximos, e a quantidade de acionamentos do sinal de controle, igual – ou muito parecido – para os três. Isso pode se dever ao fato de que ao acionar um patamar de velocidade diferente, a variação imposta na resposta seja muito sensível,

fazendo-o retornar muito rápido para a faixa de trabalho desejada. Assim sendo, é interessante que maiores faixas de histerese sejam testadas, aliadas também a efeitos causados por outras variáveis que retardem o processo de retorno do nível à faixa desejada, como os dois efeitos observados anteriormente. Assim sendo, este teste foi efetuado com maior cuidado na Simulação 1, onde pôde-se verificar uma correlação mais clara entre o parâmetro h e a qualidade do sinal de controle.

4 SIMULAÇÃO 1

As simulações com o tempo estendido para 100.000 segundos permitem extrapolar a dimensão tomada nas avaliações anteriores, de 5.000 e 20.000 segundos, pois permitem se ter uma idéia do funcionamento da bomba ao longo de mais de um dia inteiro. Essa perspectiva permite entender a importância da minimização das pequenas alterações de patamar em quantidade e em duração, e qual a influência destas no processo de utilização da BCS. Para se ter uma idéia desta diferença, pode-se analisar a Figura B.6, que apresenta a simulação 1.1, cujos parâmetros são muito parecidos com os da simulação A11, apresentada na Figura B.2 com $n=2000$. A diferença está na rampa de aceleração, que passa de 2% para 5%, e no parâmetro f , com patamares em 55 Hz e 53 Hz em vez de 56 Hz e 52 Hz, o que provoca um aumento na duração dos patamares e uma manutenção de sua quantidade, conforme concluído na simulação B.

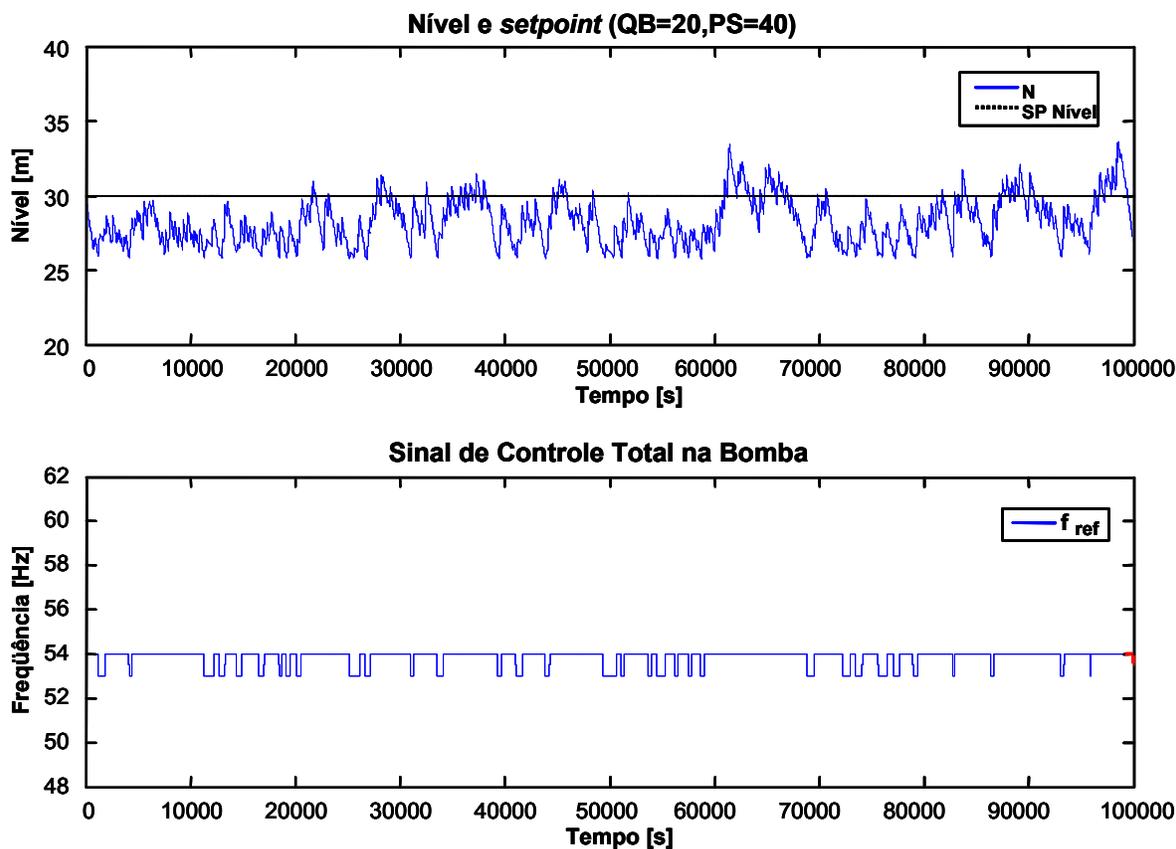


Figura B.6. Simulação 1, teste de h , apresentando a curva 1.1.

Para o período de 20.000 segundos, os oito acionamentos de patamar baixo de velocidade refletem em algo em torno de 40 acionamentos para o tempo de 100.000 segundos, o que representa 40 modificações na rotação da BCS a cada dia de operação. Como o objetivo do controlador é reduzir a quantidade e aumentar a duração desses acionamentos, identifica-se aqui um grande potencial de melhoria através da manipulação das variáveis de configuração.

Dando andamento à simulação 1, foram tomadas três medidas para evidenciar a relação do parâmetro de teste – a histerese – com as saídas desejadas – o sinal de controle e o comportamento do nível. A primeira foi a extensão do tempo de simulação, o que, como já discutido, permite avaliar melhor a qualidade do sinal de controle. A segunda foi a utilização de um valor mais radical para a janela de histerese, o que é possível notar pela Tabela B.1, que apresenta as janelas de 10%, 20% e 40% para as simulações 1.1, 1.2 e 1.3 respectivamente. Esta configuração é condizente com a conclusão tomada na Simulação C. Finalmente, a última medida foi a redução da variação dos patamares de velocidade, que passaram de [60 56 54 52 48] na simulação C para [60 55 54 53 48] nesta simulação, de forma a permitir que a variação de

pertinência seja menor após acionar outra velocidade na bomba, e daí uma transição mais lenta para as três simulações realizadas.

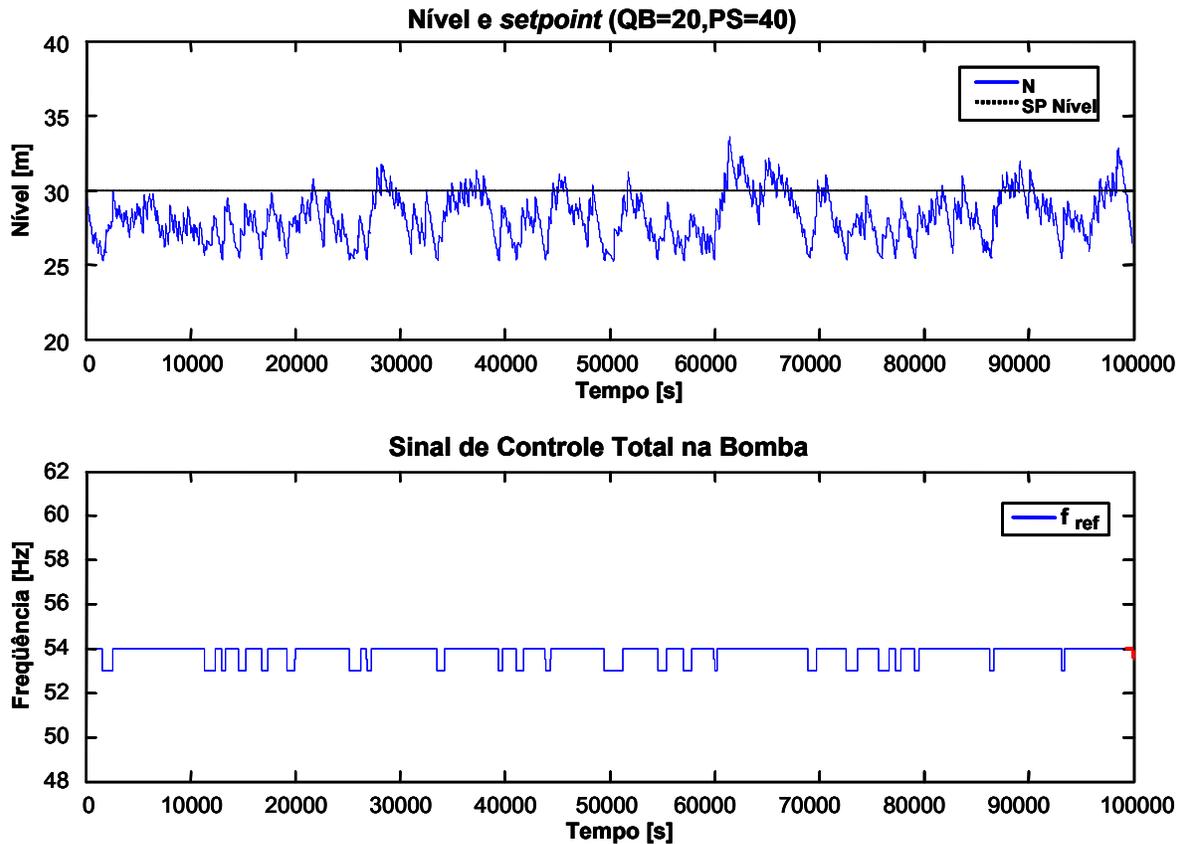


Figura B.7. Simulação 1, teste de h , apresentando a curva 1.2.

A Figura B.7 apresenta a simulação para a curva 1.2, onde foi utilizada a janela de 20% para a histerese. Diferentemente do ocorrido na outra bateria de testes, aqui já é perceptível que ao aumentar a janela de histerese, a quantidade de disparos da rotação é reduzida, pois para pertinência retornar ao valor anterior toma-se mais tempo. Ainda assim, haveria por volta de 30 mudanças diárias na BCS.

A apresentação das três curvas em gráficos separados mostrou-se necessária nesta simulação por efeito dos pequenos períodos de permanência dos patamares no sinal de controle. Além disso, com as curvas separadas, é possível tomar as comparações com as outras simulações de forma mais clara. Dessa forma, a última das curvas é apresentada na Figura B.8, onde os parâmetros de simulação foram alterados para valores críticos. A intenção desta era poder calibrar o controlador para uma das melhores condições operacionais possíveis, de forma a continuar a análise do sinal de controle que está em curso durante a simulação 1.

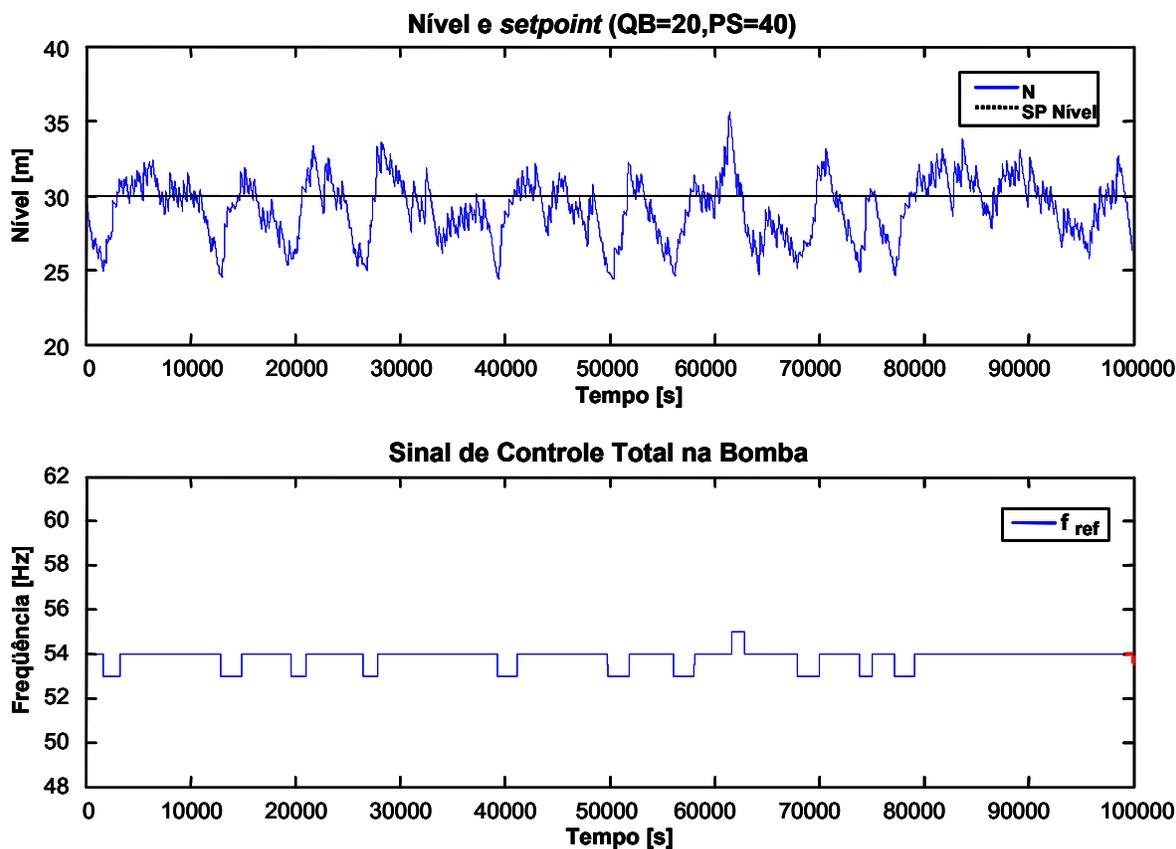


Figura B.8. Simulação 1, teste de h , apresentando a curva 1.3.

Conforme a Tabela B.1, além da alteração em f , mantida constante frente às curvas 1.1 e 1.2, mas mais estreita em relação às outras simulações, o valor de n de 6000 pontos para a curva 1.3, provê uma redução na quantidade de transições e um aumento na duração de cada patamar de velocidade. Finalmente, uma janela de 40% para as velocidades alta e baixa, e um de 30% para as rotações críticas, permite configurar o sinal de controle para o resultado apresentado na Figura B.8.

Com o limiar de transição de velocidade configurado para pertinência 0 quando da redução da amplitude da pertinência média, o nível oscilou muito mais do que o apresentado para os outros casos, apresentando um efeito direto da manipulação da histerese – quanto maior a janela, mais oscilatório estará a variação do nível. Esse efeito é positivo dado que deseja-se que ele varie dentro da faixa onde se é possível controlar, ficando o máximo possível dentro desta região de variação.

Da mesma forma, esta variação se refletiu na qualidade do sinal de controle, uma vez que a oscilação do nível era no sentido oposto do anterior à alteração do patamar, resultando num total de por volta de 10 transições de velocidade para um dia inteiro de trabalho da bomba, ou seja,

uma média de uma alteração a cada 2 horas e meia de trabalho. Percebe-se, por conseguinte, a necessidade de se fixar janelas grandes para a histerese, que permitam manipular as oscilações da variação da média no sentido desejado.

5 SIMULAÇÃO 2

A simulação 2 testa a influência do parâmetro f utilizando uma janela de histerese maior, de 20%, e um n também maior, de 4000 pontos. Como a relação de f já foi testada na simulação B, e consolidada através da comparação da simulação 1 com a C, já se sabe a conclusão a tirar. A diferença é que é possível analisar como os outros parâmetros se relacionam com os patamares de velocidade.

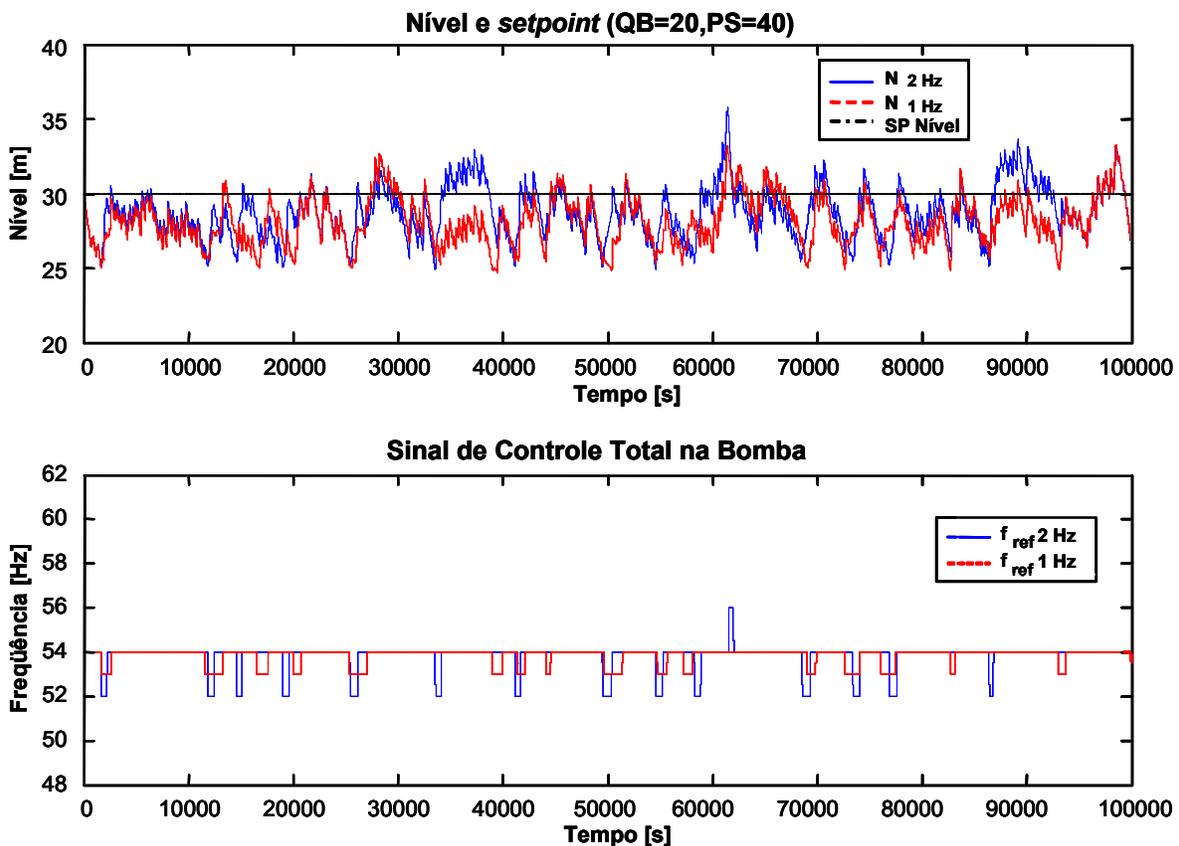


Figura B.9. Simulação 2, teste de f , apresentando as curvas 2.1 e 2.2.

A Figura B.9 apresenta as curvas 2.1 e 2.2, referenciadas pela legenda como 2 hz e 1 Hz, para o período de 100.000 segundos. Novamente, os valores 2 Hz e 1 Hz representam a diferença entre o patamar de velocidade central e o adjacente.

Conforme esperado, nota-se que com a variação do parâmetro f , quanto menor é a diferença entre patamares, maior é a permanência do sinal no patamar, tão embora o número de disparos

seja igual, pois a energia de controle é a mesma. No entanto, comparando a Figura B.9 com a Figura B.4 da simulação B, pode-se perceber que houve um número muito menor de transições por efeito de valor de 4000 pontos para o n . Da mesma forma, ao comparar a curva 2.1 da Figura B.9 (linha contínua), com a curva A12 da Figura B.2 (linha tracejada), para as quais a única diferença além do tempo de simulação é a histerese, verifica-se que a janela maior, de 20% em vez de 10%, não apresentou mudança na qualidade do sinal de controle, conforme concluído na simulação 1, onde percebe-se que apenas uma janela maior têm influência significativa na simulação.

6 SIMULAÇÃO 3

Finalmente, utilizando o valor crítico da histerese – a janela de 40% conforme a Tabela B.1 – e usando $n=6000$, foi testada a influência de uma leve alteração, de 1,5 Hz para 1 Hz, no parâmetro f , compondo as curvas 3.1 e 3.2 na Figura B.10.

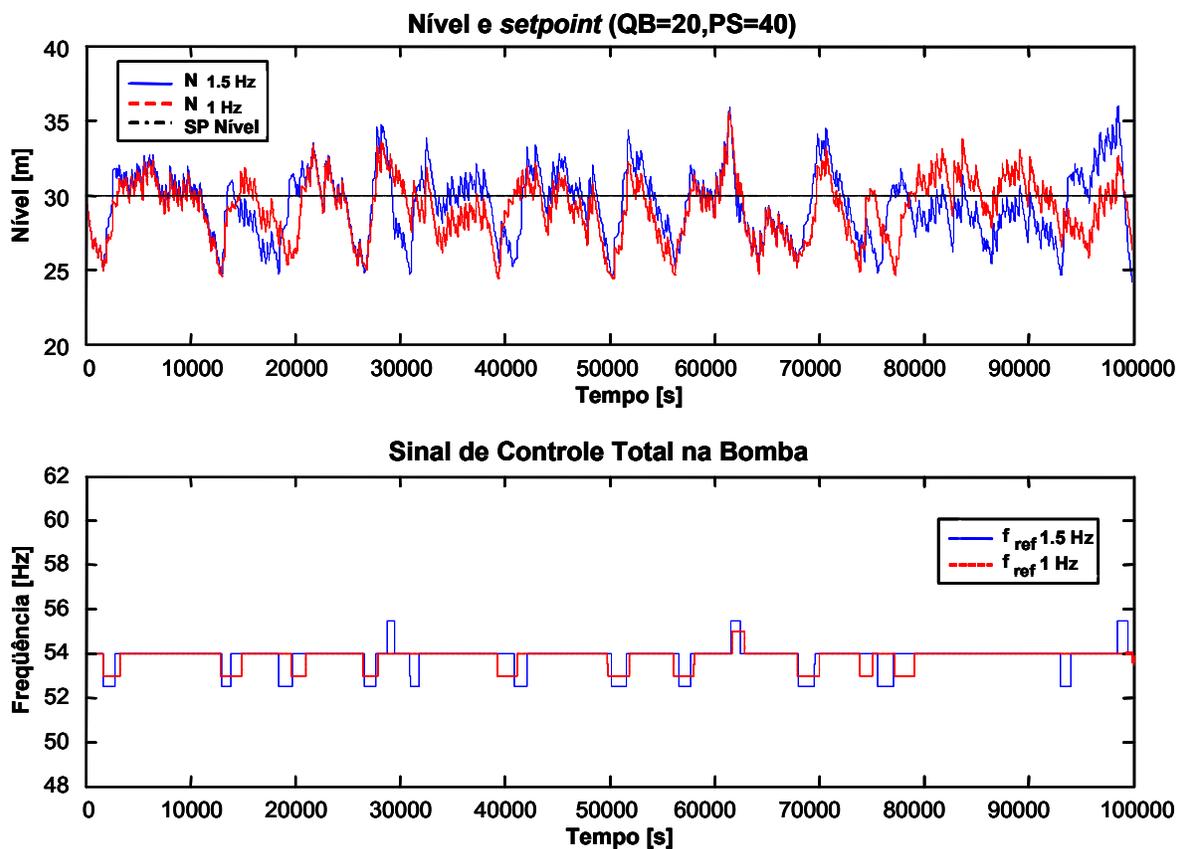


Figura B.10. Simulação 3, teste de f , apresentando as curvas 3.1 e 3.2.

A curva 3.2 é idêntica à curva 1.3 apresentada na Figura B.8. Comparando-a com a curva 3.1, cujos parâmetros diferem apenas em f , de [60 55 54 53 48] na 3.2 para [60 55.5 54 52.5 48]

na 3.1, o efeito de aumento da duração dos patamares é perceptível, mas desta vez, a quantidade de disparos foi levemente diferente. Isso já é uma forma de expressão da janela de histerese e do valor de 4000 pontos de n , pois ambos agem sobre o cômputo de retorno do valor de pertinência média após a atuação do novo patamar de velocidade, criando uma situação onde se permanece mais tempo sujeito às influências do sistema. Como o período de permanência no patamar aumenta, o retorno ao antigo patamar não instantâneo e uma variação na vazão de entrada pode afetar apenas o sistema que demorou mais para retornar.

Além disso, é possível comparar a curva 3.2 com a 2.2, onde apenas a janela de histerese e o valor do n são diferentes. O efeito combinado destas duas variáveis alterou a quantidade de disparos de 16 no segundo caso para 11 no primeiro ao longo de um dia inteiro de simulação. É uma variação bastante sensível frente a ao resultado após todos os ajustes realizados ao longo das simulações.

7 CONCLUSÃO

Os testes desenvolvidos para o controlador permitiram partir de uma configuração com cerca de 40 acionamentos curtos de velocidades diferentes no sinal de controle, para algo em torno de apenas 10 para 1 dia de trabalho, e com duração maior, o que está condizente com a informação de campo de que cada alteração na rotação da bomba é seguida de um intervalo de 2 a 3 horas no procedimento manual com acompanhamento de um operador. O sistema aqui simulado, no entanto, utilizou um sinal de distúrbio de entrada mais agressivo que a média encontrada em campo, justamente para suplantarmos a desconfiança inerente a um modelo computacional.

A robustez do sistema pode ainda ser aumentada de acordo com o comportamento previsto para sinais de campo de vazão de entrada através do ajuste do parâmetro n , que pode ser aumentado caso a constante de tempo do sistema permita - ou seja, se o tempo necessário para causar alteração significativa no nível, e conseqüentemente na pertinência média, for superior ao aqui simulado, de 600 segundos para $n = 6000$ pontos. Da mesma forma, o aumento da histerese para intervalos ainda maiores também é um recurso, tão embora este ajuste já se mostre próximo de um limite matemático dentro do universo de trabalho. Além disso, ainda há a calibração dos patamares de velocidade, que serão necessários para cada sistema, e passíveis de estudos de vazão ideal para cada BCS.

De qualquer forma, há bastante credibilidade na flexibilidade que o controlador provê para se ajustar a uma situação real. É necessário que haja validação experimental, e esta pode ser guiada pelas simulações computacionais desenvolvidas, de forma a criar uma gama de resultados passíveis de comparação e análise, tanto para refinamento do modelo, quanto para verificação do controlador. A agressividade do sistema em laboratório deve ser representada por um distúrbio de entrada, de forma que os experimentos podem ser gradativamente reforçados para representar a situação de campo ou a situação computacional. Também é possível realizar leituras experimentais, e usar o sinal de entrada adquirido em laboratório para criar situação similar computacionalmente comparando o experimento com o simulador.

Apêndice C

Modelos computacionais utilizados no *Simulink*[®]

1 PLANTA

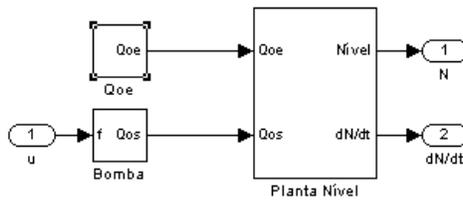


Figura C.1. Planta do controle de nível. No bloco do controle de nível, Planta Nível, fica a equação da variação do nível, Equação (3.4). No bloco da bomba, fica sua curva, Equação (3.1). No bloco de vazão de entrada, Qoe, fica o gerador de golfadas.

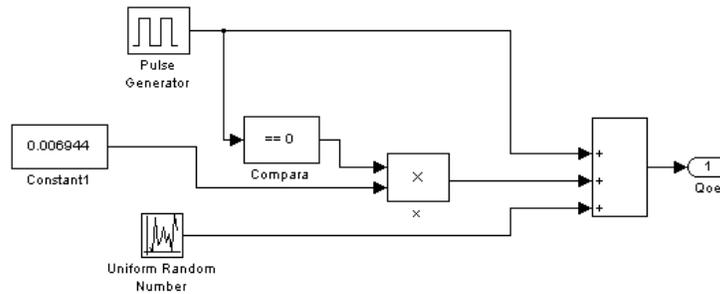


Figura C.2. Primeiro gerador de golfadas.

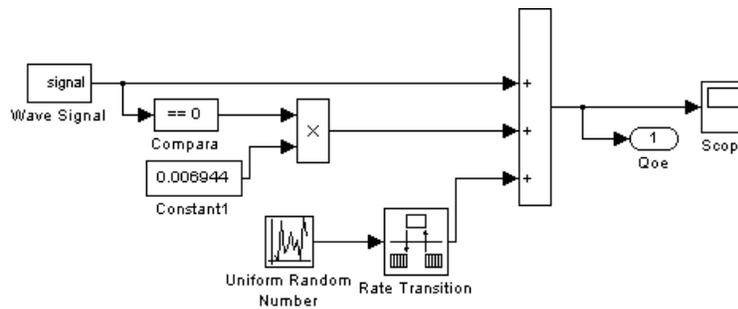


Figura C.3. Segundo gerador de golfadas – amplitude variável.

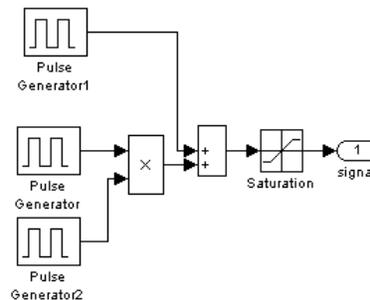


Figura C.4. Componente do segundo e terceiro gerador de golfadas – sinal em onda para gerar amplitude variável.

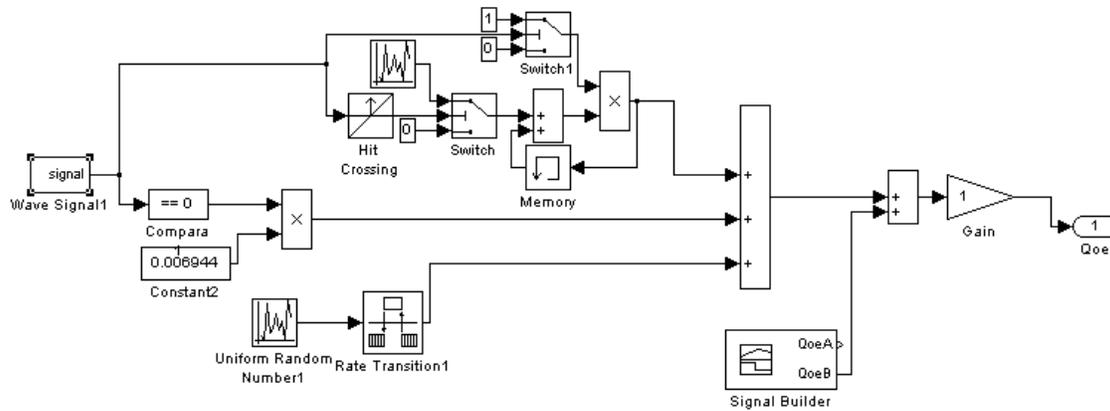


Figura C.5. Terceiro gerador de golfadas – amplitude e frequência variáveis. Detalhe do gerador de sinais para teste do mecanismo de auto-ajuste.

2 SUPERVISOR FUZZY PID

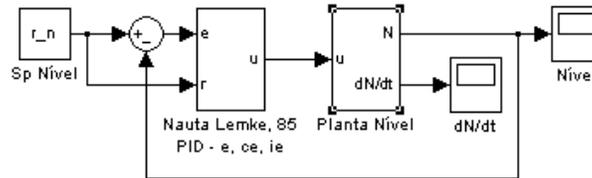


Figura C.6. Malha de controle do controlador *Fuzzy* PID supervisor.

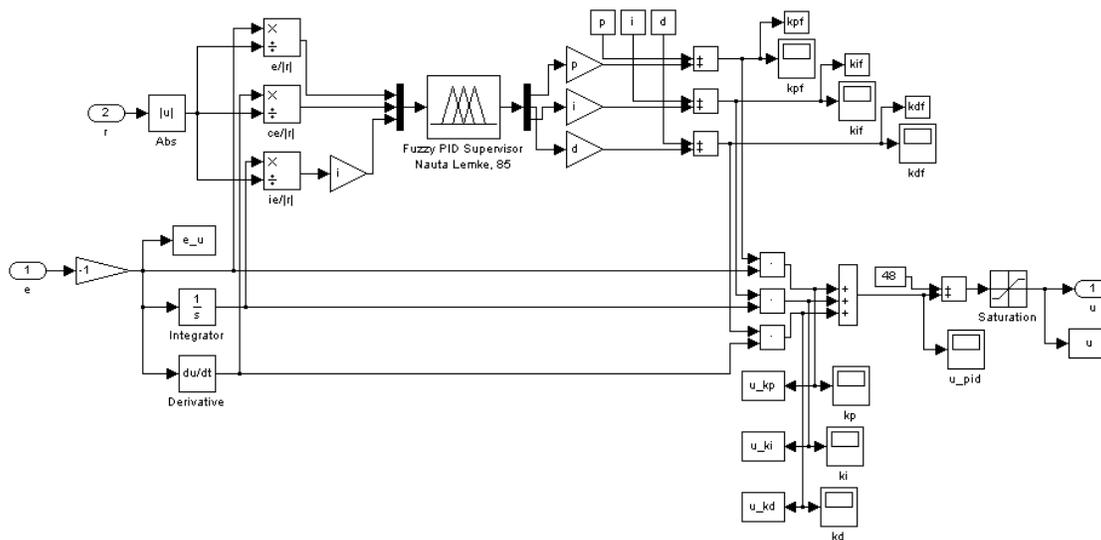


Figura C.7. Controlador *Fuzzy* PID Supervisor.

3 MONITORAMENTO DA MÉDIA MÓVEL

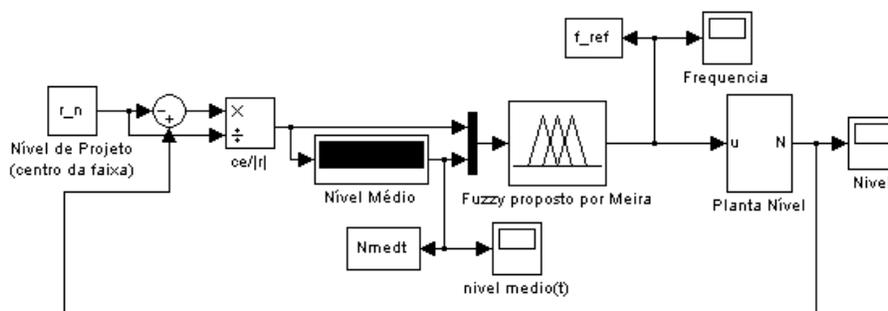


Figura C.8. Malha de controle do controlador Monitoramento da Média Móvel.

4 CLASSIFICADOR POR REGIÕES

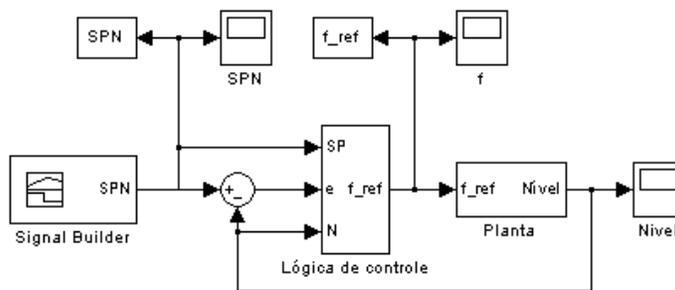


Figura C.9. Malha de controle do controlador Classificador por Regiões.

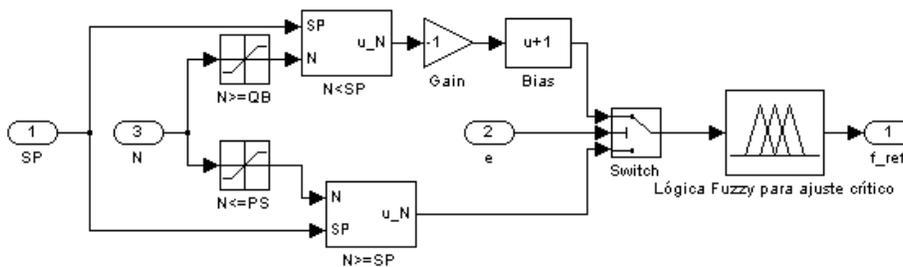


Figura C.10. Controlador Classificador por Regiões.

5 HISTERESE COM AUTO-AJUSTE

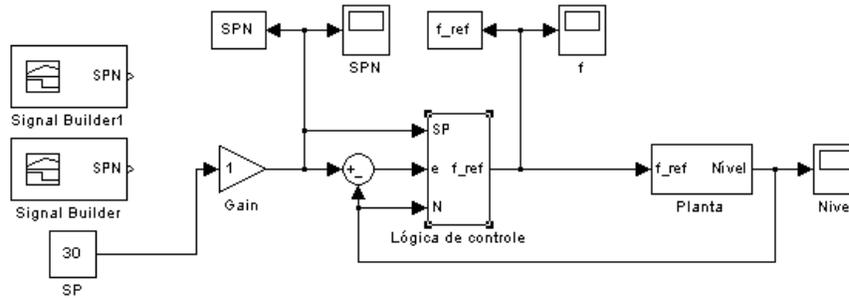


Figura C.11. Malha de controle do controlador Histerese com Auto-ajuste. Detalhe dos geradores de sinal de referência.

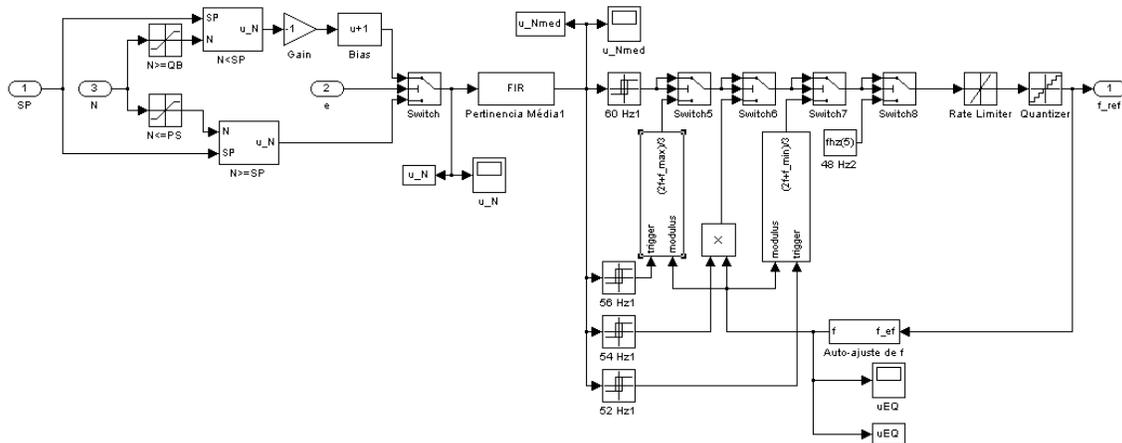


Figura C.12. Controlador Histerese com auto-ajuste. Detalhes do classificador, da histerese, da parametrização da rotação de transição e dos filtros de saída.

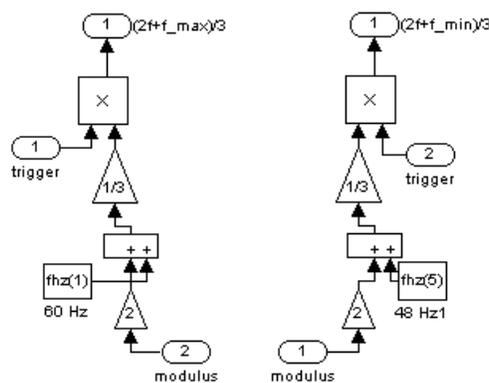


Figura C.13. Componente do controlador Histerese com Auto-ajuste – parametrização da rotação de transição.

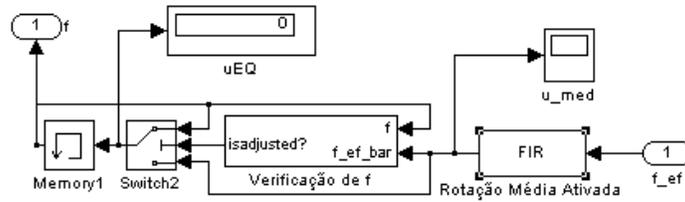


Figura C.14. Componente do controlador Histerese com Auto-ajuste – mecanismo de auto-ajuste.

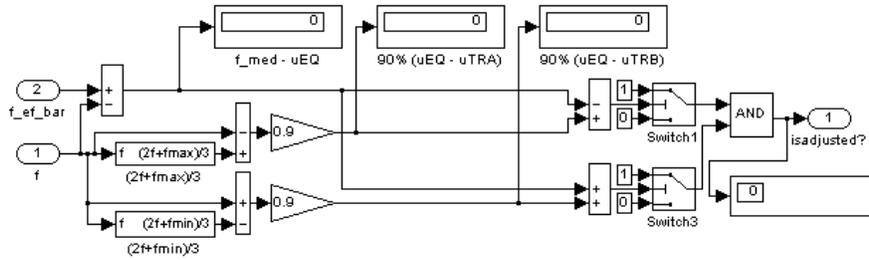


Figura C.15. Componente do mecanismo de auto-ajuste – monitoramento da média móvel do sinal de controle.