ANDRES CAMILO VELASQUEZ PEÑALOZA

ESTUDO DE MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ATRITO EM UMA VÁLVULA DE CONTROLE EM PLANTA DE NEUTRALIZAÇÃO DE $_{\rm PH}$

São Paulo 2015 ANDRES CAMILO VELASQUEZ PEÑALOZA

ESTUDO DE MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ATRITO EM UMA VÁLVULA DE CONTROLE EM PLANTA DE NEUTRALIZAÇÃO DE $_{\rm P}{\rm H}$

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

ANDRES CAMILO VELASQUEZ PEÑALOZA

ESTUDO DE MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ATRITO EM UMA VÁLVULA DE CONTROLE EM PLANTA DE NEUTRALIZAÇÃO DE $_{\rm PH}$

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Garcia.

Este exemplar foi revisado e corrigido en responsabilidade única do autor e com a	n relação à versão original, sob anuência de seu orientador.
São Paulo, de	de
Assinatura do autor:	
Assinatura do orientador:	

Catalogação-na-publicação

Peñaloza, Andres Camilo Velasquez Estudo de métodos de compensação de atrito em uma válvula de controle em planta de pH / A. C. V. Peñaloza -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 92 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São

Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Compensação de atrito 2.Neutralização de pH 3.Válvula de controle 4.Controle PID I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

Agradecimentos

Ao meu amigo e orientador Professor Dr. Claudio Garcia, pela oportunidade, dedicação e ensinamentos que me tornaram melhor, profissionalmente e pessoalmente.

Aos meus pais, Marcelino e Doris e a minha irmã Diana, pelos conselhos e apoio incondicional.

Aos meus amigos e colegas Christiam Segundo Morales, Fellipe Garcia Marquez, Jorge Alvarado, Diana Riaño, Matheus Hidalgo, Bruno Castro e Eduardo Romanus pelos bons momentos, comentários e sugestões, os quais foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Resumo

O elemento final de controle mais usado nas malhas de processo na indústria é a válvula de controle. Portanto, é necessário assegurar que ela possua o melhor desempenho possível, a fim de assegurar um funcionamento satisfatório da malha de controle. Devido ao desgaste natural das partes móveis e o ressecamento das gaxetas, as válvulas apresentam atrito que insere oscilações na abertura da válvula e devido a seu comportamento não linear que diminui a eficiência do controle.

A presença de oscilações nas malhas de controle aumenta a variabilidade das variáveis de processo, o desgaste dos componentes e o consumo de energia, além de provocar o desperdício de materiais. Por isto, no presente trabalho são estudados e implementados diferentes compensadores de atrito existentes na literatura, visando reduzir o efeito do atrito nas válvulas e, por sua vez as oscilações na variável do processo. Estes métodos são aplicados na Planta Piloto de Neutralização de pH do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI). O processo de neutralização de pH é não-linear e apresenta características variantes no tempo, as quais tornam mais complexo o controle do processo.

Inicialmente foi feita a implementação dos compensadores em um *software* acadêmico (MATLAB[®]), devido à familiaridade que se tem com ele, o que facilitou um melhor entendimento dos métodos de compensação junto com o controlador PID no processo. Em uma segunda etapa, a fim de trazer os estudos a um ambiente mais prático, foram implementados os algoritmos de compensação de atrito em um sistema de controle industrial (ABB[®]).

Nos dois casos se realizaram testes em modo servo e regulatório e se avaliaram os resultados obtidos usando o índice ITAE (*Integral Time Absolute Error*). Os resultados evidenciam que os compensadores conseguem diminuir a variabilidade na válvula de controle, sendo que o compensador CR2 apresentou o melhor desempenho para o modo servo e regulatório.

Palavras-chave: Controle PID, compensação de atrito, neutralização de pH, *stiction*, válvula de controle.

Abstract

The most used final control element in process loops in the industry is the control valve. It must ensure that it has the best possible performance in order to guarantee a satisfactory operation of the control loop. Due of the natural wear of moving parts and drying gaskets, valves exhibit friction. This friction inserts oscillations in the valve opening and due to its non-linear behavior; this causes the efficiency to decrease. The presence of oscillations in the control loop increases the variability of the process variables, the component wear, energy consumption and cause a waste of materials.

Therefore, in this work we studied and implemented different friction compensation methods that exist in literature, in order to reduce the effect of friction on the valves and in turn the oscillations in the process variable. These methods are applied in the Pilot Plant Neutralization pH of Industrial Process Control Laboratory (LCPI), the pH neutralization process is nonlinear and presents time-varying characteristics, these characteristics become the control process more complex.

Initially, it was made the implementation of compensation methods in academic *software* (MATLAB[®]), due to the familiarity that already exist with it, which facilitated a better comprehension of the compensation methods with the PID controller in the process. In a second step, in order to bring the study to a more practical environment, the friction compensation algorithms were implemented in an industrial control system (ABB[®]).

In both cases were performed tests inn servo and regulatory mode, and evaluated the results using the ITAE index (*Integral Time Absolute Error*). The results show that in general terms that the compensating methods showing a very satisfactory performance, with the compensator CR2 showed the best performance for the servo and regulatory mode.

Keywords: PID Control, friction compensation, pH neutralization, stiction, control valve.

Lista de Figuras

Figura 2.1 –	Foto da Planta Piloto de Neutralização de pH do LCPI	20
Figura 2.2 –	P&ID da Planta Piloto de Neutralização de pH	22
Figura 2.3 –	Elementos de uma válvula de controle	23
Figura 2.4 –	Curva de titulação ideal e experimental, com o titulado HCL $(0,0056)$	
	mol/l)e o titulante NAOH (0,0185 mol/l) para um volume inicial do	
	titulado de 150 ml	25
Figura 3.1 –	Gráfico da histerese, banda morta (deadband) e zona morta (dead zone).	30
Figura 3.2 –	Comportamento do <i>stiction</i> em uma válvula.	31
Figura 3.3 –	Diagrama de fluxo do modelo de Kano.	33
Figura 3.4 –	Pressão do atuador.	34
Figura 3.5 –	Posição da haste	34
Figura 3.6 –	Curva de assinatura da válvula de controle	35
Figura 3.7 –	Ampliação do <i>slip-jump</i> da válvula de controle	35
Figura 3.8 –	Fluxograma do algoritmo de refinamento da estimação de $S.$	36
Figura 3.9 –	Validação dos parâmetros do modelo de Kano.	38
Figura 4.1 –	Estrutura da malha de controle com o compensador Knocker	39
Figura 4.2 –	Pulsos somados ao sinal de controle no compensador Knocker	40
Figura 4.3 –	Estrutura da malha de controle com o compensador CR2	41
Figura 4.4 –	Estrutura da malha de controle com o algoritmo de Desabilitação do	
	Controle.	42
Figura 4.5 –	Diagrama de fluxo de Desabilitação do Controle	43
Figura 4.6 –	Estrutura <i>Two-move</i> .	44
Figura 5.1 –	Forma diferencial da curva de titulação.	47
Figura 5.2 –	Gráfico da resposta ao degrau de 6 a 7 do pH	48
Figura 5.3 –	Resposta ao degrau da malha de nível	49
Figura 5.4 –	Resposta ao degrau da malha de nível (vermelho) com o modelo	
	identificado (azul).	50
Figura 5.5 –	Resposta a degrau no <i>set-point</i> da malha de nível	51
Figura 5.6 –	Resposta do modo servo e sintonia inicial	52
Figura 5.7 –	Validação do modelo identificado com os resultados experimentais	53
Figura 5.8 –	Modelo no $software$ (MATLAB [®]) para calcular a sintonia do controlador.	54
Figura 6.1 –	Resultado no modo servo com o controlador PID	57
Figura 6.2 –	Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de	
	compensação CR1	57
Figura 6.3 –	Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de	
	compensação CR2.	58

Figura 6.4 –	Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de	
	compensação <i>Knocker</i>	58
Figura $6.5-$	Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de	
	compensação <i>Two-move</i>	59
Figura 6.6 –	Resultado no modo servo com o controlador PID e o algoritmo de	
	desabilitação do controle.	60
Figura 6.7 –	Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador CR1	
-	e o algoritmo de desabilitação do controle.	61
Figura 6.8 –	Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador CR2	
0	e o algoritmo de desabilitação do controle.	61
Figura 6.9 –	Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador	
	<i>Knocker</i> e o algoritmo de desabilitação do controle	62
Figura 6 10 -	Besultado no modo regulatório com o controlador PID e o algoritmo	0-
1 Iguia 0.10	de desabilitação de controlo	63
Figure 6 11	Resultada na modo regulatório com o controlador PID, o componsador	00
	CP1 e e algoritme de desebilitação de controla	64
F: C 19	Deserte de la servela de menulatória como a controle des DID e como ence des	04
Figura 0.12 -	CD2 de iterative de la dilitera de l	0.4
D : 0.10	CR2 e o algoritmo de desabilitação do controle.	64
Figura 6.13 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador	
	<i>Knocker</i> e o algoritmo de desabilitação do controle	65
Figura 6.14 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o compensador	
	$Two-move. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $	65
Figura 6.15 -	-Resultado no modo servo com o controlador PID e o algoritmo de	
	desabilitação do controle.	67
Figura 6.16 –	Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador CR1 $$	
	e o algoritmo de desabilitação do controle	68
Figura 6.17 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador	
	CR2 e o algoritmo de desabilitação do controle	68
Figura 6.18 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador	
	Knocker e o algoritmo de desabilitação do controle	69
Figura 6.19 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o compensador	
	Two-move.	69
Figura 6.20 –	Vazão de base para 100% e 80% de abertura da válvula de controle.	71
Figura 6.21 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o algoritmo	
0	de desabilitação do controle.	72
Figura 6 22 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador	. –
0414 0.22	CB1 e o algoritmo de desabilitação do controle	72
Figura 6 23 -	Besultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador	. 4
1 iguia 0.20 -	CR2 a a algoritmo da desabilitação do controlo	72
		10

Figura 6.24 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador	
	Knocker e o algoritmo de desabilitação do controle	73
Figura 6.25 –	Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o compensador	
	<i>Two-move.</i>	74
Figura 6.26 -	-Resultado no modo regulatório com o compensador CR1 com $S = 3\%$.	76
Figura 6.27 -	-Resultado no modo regulatório com o compensador CR2 com $S = 3\%$.	76
Figura 6.28 –	Resultado no modo regulatório com o compensador Knocker com $S = 3\%$.	77
Figura 6.29 -	- Resultado no modo regulatório com o compensador $Two-move$ com	
	S = 3%	77
Figura A.1 –	Tela do supervisório do processo de Neutralização de pH	84
Figura A.2 –	Bloco de controle da malha de nível (esquerda)e bloco de controle da	
	válvula solenoide de saída (direita)	85
Figura A.3 –	Bloco de controle da malha de pH (esquerda) e bloco de compensadores	
	(direita)	86
Figura A.4 –	Bloco do PID e saída para a válvula de controle	87
Figura A.5 –	Bloco dos algoritmos de compensação de atrito	88
Figura A.6 –	Bloco do algoritmo de desabilitação.	89
Figura B.1 –	Resultado no modo regulatório com o Controlador PI	90
Figura B.2 –	Resultado no modo regulatório com o Controlador PID	91
Figura B.3 –	Resultado no modo regulatório com o Controlador PID2DOF	91
Figura B.4 –	Resultado no modo regulatório com o Controlador PID mais o Feedforward.	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Dados da válvula de controle. . . .	24
Tabela 3.1 – Resultados do refinamento dos valores identificados de S e J	37
Tabela 5.1 – Valores do FIT para cada modelo identificado	52
Tabela 6.1 – Índices de desempenho dos ensaios no modo servo	62
Tabela 6.2 – Índices de desempenho dos ensaios no modo regulatório com o $software$	
Acadêmico	66
Tabela 6.3 – Índices de desempenho dos ensaios em modo servo	70
Tabela 6.4 – Índices de desempenho dos ensaios em modo regulatório	74
Tabela 6.5 – Índices de desempenho dos ensaios de robustez	77
Tabela B.1 – Índices de desempenho em modo regulatório para o atuador linear. $\ .$	92

Lista de Símbolos

a	Amplitude dos pulsos do compensador <i>Knocker</i>
Bm	Banda morta
BOP	Banda de saída do compensador Two-move
C_A	Concentração de ácido
C_B	Concentração de base
D_v	Índice de variabilidade de posição da válvula
d	Direção do movimento da haste
d_m	Banda de agarramento
e	Erro da variável controlada
F_A	Vazão de ácido
F_B	Vazão de base
Н	Parâmetro de definição da região de busca do método de refinamento das estimativas
h	Precisão desejada para o método de refinamento das estimativas
h_k	Período entre os pulsos do compensador Knocker
J	Banda de agarramento (Slip-jump)
k	Ganho proporcional do controlador
k_d	Ganho derivativo do controlador
k_n	Ganho da malha de nível
М	Massa em gramas
M_p	Sobressinal máximo
MV	Variável manipulada
n	quantidade de moles
PV	Variável de processo

OPC	Saída do compensador <i>Two-move</i>
S	Banda morta mais banda de agarramento
step	Hasta da válvula parada (1) ou em movimento (0)
T_p	Período de tempo no qual se considera que o erro mínimo foi encontrado
T_s	Período de amostragem
T_I	Tempo de integração do controlador
t_s	Tempo de acomodação
t_p	Tempo no instante do início do pulso anterior no compensador $Knocker$
u_c	Saída do controlador
u_k	Saída do compensador
u_{ss}	Saída do controlador em estado estável
x_{ss}	Posição da haste em estado estável
δ	Erro aceitável para a variável controlada
$\delta 1$	Valor máximo da derivada para que o controle não seja desabilitado
$\delta 2$	Erro mínimo para que o controle não seja habilitado
η	Porcentagem de pureza
ρ	Massa específica
τ	Constante de tempo do processo de nível
$ au_k$	Largura dos pulsos no compensador Knocker
$ au_n$	Constante de tempo da malha de nível

Lista de Abreviaturas e Siglas

ARX	Modelo Autoregressivo com entradas Exógenas, do Inglês, AutoRegressive with eXogenous inputs
ARMAX	Modelo Autoregressivo de Médias Móveis com entradas Exógenas, do Inglês, AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs
CLP	Controlador Lógico Programável
CR	Constant Reinforcement
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FIT	Índice de Ajuste
HMI	Interface Homem Máquina, do Inglês, Human Machine Interface
ITAE	Integral do tempo absoluto multiplicado pelo tempo
I/P	Corrente para pressão
LCPI	Laboratório de Controle de Processos Industriais
MA	Malha Aberta
MF	Malha Fechada
MPC	Controle Preditivo Baseado em Modelo, do Inglês, Model Predictive Control
MRAC	Controlador Adaptativo Baseado em Modelo, do Inglês, <i>Model Reference Adaptive Control</i>
OE	Erro de saída, do Inglês, <i>Output-Error</i>
P&ID	Diagrama de Instrumentação e Tubulações, do Inglês, <i>Piping and Instru-</i> mentation Diagram
рН	Potencial Hidrogeniônico
PI	Controlador proporcional Integral
PID 2DOF	Controlador Proporcional Integral Derivativo com 2 Graus de Liberdade
PID	Controlador proporcional Integral Derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso, do Inglês, Pulse Width Modulation

Identificação da Instrumentação e Equipamentos da Planta Piloto

AE-40	Sensor de pH do TR
AIC-40	Controlador de pH do TR
AITY-40	Transmissor de pH do TR
FIT-31	Medidor e transmissor da vazão do TAPI para o TR
FIT-32	Medidor e transmissor da vazão do TASI para o TR
HV-31	Válvula solenoide de isolamento do TAPI
HV-32	Válvula solenoide de isolamento do TASI
HV-35	Válvula solenoide de isolamento do TAP
HV-36	Válvula solenoide de isolamento do TAS
FZ-41	Bomba dosadora de solução básica
LCV-35	Válvula boia, para controle de nível do TAPI
LCV-36	Válvula boia, para controle de nível do TASI
LIC-16	Controlador de nível do TR
LIT-10	Medidor e transmissor de nível do TR
LV-16A	Válvula de controle de nível do TR
MZ-81	Agitador do TR
TAP	Tanque de Ácido Principal
TAPI	Tanque de Ácido Principal Intermediário
TAS	Tanque de Ácido Secundário
TASI	Tanque de Ácido Secundário Intermediário
TBB	Tanque de Base para a Bomba
TBV	Tanque de Base para a Válvula
TE-40	Medidor de temperatura do TR

TR	Tanque do Reator
UV-31B	Válvula manual de isolamento do TAPI
UV-32B	Válvula manual de isolamento do TASI

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Revisão da Literatura	17
1.4	Estrutura da Dissertação	18
2	PLANTA PILOTO DE NEUTRALIZAÇÃO DE PH DO LCPI	20
2.1	Descrição do Processo	21
2.2	Válvula de Controle	22
2.3	Curva de Titulação do pH	24
2.4	Cálculo das concentrações das soluções	26
2.4.1	Cálculo da concentração de ácido	26
2.4.2	Cálculo da concentração de base	26
3	QUANTIFICAÇÃO DO ATRITO	28
3.1	Não-linearidades na válvula	28
3.2	Stiction	28
3.3	Modelo do Stiction	32
3.3.1	Modelo Empírico de Kano	32
3.3.2	Refinamento de Parâmetros	35
3.3.3	Validação do modelo com o algoritmo de Kano	37
4	COMPENSAÇÃO DO ATRITO	39
4.1	Compensadores de Atrito	39
4.1.1	Compensador <i>Knocker</i>	39
4.1.2	Compensador CR	41
4.1.3	Algoritmo de Desabilitação do Controle	42
4.1.4	Compensador <i>Two-move</i>	42
5	IDENTIFICAÇÃO E SINTONIA DAS MALHAS DE PH E NÍVEL .	46
5.1	Identificação da malha de nível	49
5.2	Controle de Nível	50
5.3	Identificação da malha de pH	51
5.4	Controle do pH	53
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
6.1	Índices de Desempenho para a análise dos resultados	55

6.2	Ensaios com Software Acadêmico	56
6.2.1	Ensaios no modo Servo	56
6.2.2	Ensaios no modo Regulatório	62
6.3	Ensaio com Software Industrial	66
6.3.1	Ensaios no Modo Servo	67
6.3.2	Ensaios no Modo Regulatório	70
6.4	Ensaio de Robustez dos Compensadores	75
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	78
7.1	Conclusões	78
7.2	Propostas de Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A – SUPERVISÓRIO E BLOCOS DE PROGRAMAÇÃO	84
A.1	Supervisório	84
A.1.1	Modificações feitas no Supervisório	84
A.1.2	Operação no modo Servo	85
A .2	Blocos de Programação	86
	APÊNDICE B – RESULTADOS COM O ATUADOR LINEAR	90

1 Introdução

1.1 Motivação

As válvulas de controle são muito usadas como elementos finais de uma malha de controle por conta da sua grande versatilidade, como exemplo temos processos químicos, farmacêuticos, petroquímicos, siderúrgicos e outros. Por isto é necessário assegurar que esse elemento final da malha de controle possua o melhor desempenho possível, a fim de manter estável o processo. As válvulas de controle podem gerar variabilidade nas malhas de controle, principalmente quando existe uma má sintonia do controlador, mau ajuste da instrumentação associada à válvula ou um alto atrito na mesma. As duas primeiras causas podem ser tratadas sem precisar parar o processo no qual atua a válvula de controle; no caso do atrito é necessário desmontar a válvula e, consequentemente, parar todo o processo.

As paradas programadas se realizam entre seis meses a três anos de operação (SRINIVASAN; RENGASWAMY, 2005). Em vista disso, existirão períodos em que a válvula operará com um alto atrito, podendo afetar a qualidade do produto final. Por isto, são importantes os algoritmos de compensação de atrito, uma vez que podem mitigar este inconveniente, até que se realize uma parada programada de manutenção.

A detecção e quantificação do atrito são muito importantes nos processos industriais para identificar as válvulas que precisam de manutenção e decidir podem operar com um valor de atrito aceitável. Portanto, a quantificação do atrito é vital para o planejamento da manutenção.

O atrito insere oscilações na abertura da válvula e decorre pelo desgaste das partes móveis e o ressecamento das gaxetas. Esta variabilidade diminui a eficiência da malha de controle e, por sua vez do processo, isto destaca a importância da compensação do atrito na válvula de controle.

Adicionalmente, percebe-se que a literatura disponível, referente à compensação de atrito em válvulas de controle, apresenta muitas pesquisas conduzidas apenas em ambiente simulado e em malhas de controle de vazão, não sendo encontrada aplicação alguma referente ao processo de controle de pH. Os experimentos realizados na Planta Piloto de Neutralização de pH do LCPI utiliza equipamentos e instrumentos de padrão industrial, portanto, prevê-se que os resultados obtidos neste trabalho sejam equivalentes aos encontrados na prática.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal testar e implementar as técnicas de compensação de atrito na válvula de controle, com o fim de melhorar o controle no processo de neutralização de potencial hidrogeniônico (pH) no Laboratório de Controle de Processos Industriais da Escola Politécnica da USP. Este objetivo principal conduz aos seguintes objetivos específicos:

- (i) Realizar as estimativas dos parâmetros de atrito da válvula de controle da planta de neutralização de pH;
- (ii) Obter um modelo da planta através de métodos de identificação de sistemas, visando sintonizar o controlador PID da malha de controle de pH;
- (iii) Estudar e implementar os compensadores de atrito usando o software (MATLAB[®]) e a placa de aquisição de dados da National Instruments (NI 6229) ou então o sistema digital de controle da ABB[®].
- (iv) Comparar os métodos de compensação para cada modo e encontrar aquele que apresente um melhor desempenho.

1.3 Revisão da Literatura

Na literatura existem diversos trabalhos que procuram eliminar a não-linearidade inserida na válvula pelo atrito. Os autores (HÄGGLUND, 2002), (HÄGGLUND, 2007), (SRINIVASAN; RENGASWAMY, 2008), (CUADROS, 2011), (ELY; LONGHI, 2011) e (MOHAMMAD; HUANG, 2012) desenvolveram técnicas para compensar o dito fenômeno e com isto conseguir um melhor desempenho na válvula e, consequentemente, da malha de controle.

O método de (HÄGGLUND, 2002) propõe uma função que adiciona pequenos pulsos ao sinal de controle de um controlador PID, com a finalidade de vencer o atrito quando exista uma variação de movimento. O mesmo autor em um artigo posterior (HÄGGLUND, 2007) propôs um compensador que adiciona a saída do compensador à saída do controlador. Este compensador considera os parâmetros de atrito da válvula e o sinal de saída do controlador.

Em (CUADROS, 2011) é feita uma análise dos compensadores anteriormente descritos e é proposto um algoritmo de desabilitação do controlador PID, mantendo a saída tanto do controlador como do compensador constantes quando a derivada do erro da malha de controle seja menor que um valor especificado e reabilitada quando o módulo do erro supera outro valor dado. O último compensador estudado é o desenvolvido por (SRINIVASAN; REN-GASWAMY, 2008), denominado compensador *Two-move*, que consiste em inserir dois movimentos em função do sinal de controle para conduzir a posição da válvula ao valor de referência. Fazendo uma análise do mesmo compensador, (ELY; LONGHI, 2011) propuseram corrigir os problemas de inversão no movimento, por conta que o primeiro modelo apresentado não leva em conta a banda morta.

Em (MOHAMMAD; HUANG, 2012) é reduzida as oscilações geradas pelo atrito na válvula de controle apenas mudando a sintonia do controlador, precisando para isto o um modelo aproximado do processo e a estrutura da dinâmica do controlador.

Os compensadores podem usar um ou os dois parâmetros do modelo de (KANO et al., 2004), este modelo representa o *stiction* na válvula de controle. Em (GARCIA, 2008) são escolhidos os modelos de Karnopp, Lugre e Kano por representarem de melhor forma o atrito nas válvulas de controle. Em (ROMANO, 2010) são estimados os parâmetros de Karnopp com dados obtidos em um processo operando em malha fechada. O modelo de Kano foi analisado em (CHOUDHURY; SHAH; THORNHILL, 2004) e em (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008), em ambos os artigos são descritos os métodos para calcular os parâmetros do modelo, em este trabalho é escolhido o modelo de Kano por ser o mais simples dos três.

Em diversos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Controle de Processos Industriais da EPUSP, como (BAEZA, 2013) e (SILVA, 2013), foram estudados compensadores de atrito. Igualmente, em (ROMANO; GARCIA, 2008) e (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008) foram estudados diferentes métodos de estimação do atrito em válvulas de controle.

O trabalho desenvolvido em (MADURO, 2011) apresenta testes com a válvula de controle da Planta Piloto de Neutralização de pH, o método de controle empregado é um PID de ganho variável aplicado na válvula de controle com o posicionador digital e o I/P. Os resultados obtidos com o posicionador digital foram bons, ao contrário dos obtidos com o conversor I/P (de corrente a pressão), que não apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que o pH nunca chegou a se estabilizar. Neste trabalho é usado o conversor I/P.

1.4 Estrutura da Dissertação

O *Capítulo 1, Introdução*, contextualiza a pesquisa e apresenta seus objetivos e motivações. O *Capítulo 2, Planta Piloto de Neutralização de pH*, apresenta uma descrição funcional dessa planta, incluindo seus equipamentos e instrumentos, adicionalmente são apresentados os cálculos para as concentrações de solução de ácido e base que vão ser usadas nos experimentos.

O Capítulo 3, Quantificação de atrito, apresenta a definição do stiction, a descrição

do seu comportamento e o efeito na válvula de controle. Igualmente, é descrito o modelo de Kano e o cálculo dos parâmetros deste modelo. O *Capítulo 4, Compensação de atrito*, tem por objetivo apresentar a teoria dos métodos de compensação de atrito que vão ser usados. No *Capítulo 5, Identificação e Sintonia das malhas de pH e nível*, são feitas a identificação e a sintonia dos controladores das malhas de pH e nível do tanque reator.

O Capítulo 6, Resultados experimentais, corresponde aos resultados obtidos em modo servo e regulatório, tanto no software acadêmico (MATLAB[®]) como no software industrial ABB[®]. O Capítulo 7, Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros, apresenta as conclusões gerais deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros. O Apêndice A, Supervisório e Blocos de Programação, expõe as modificações desenvolvidas no sistema supervisório e os blocos de programação desenvolvidos no software industrial da ABB[®]. O Apêndice B, Resultados com atuador linear apresenta os resultados de neutralização de pH obtidos com a bomba dosadora e algumas comparações destes resultados com aqueles conseguidos com a válvula de controle.

2 Planta Piloto de Neutralização de pH do LCPI

A Planta Piloto de Neutralização de pH do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) tem como objetivo reproduzir as condições encontradas em uma aplicação industrial. A planta possui instrumentação, sensores, atuadores e controladores semelhantes aos usados na indústria. Estas características oferecem a oportunidade de trabalhar com um processo real com respostas semelhantes a um processo de grande escala, onde se apresentam erros de medição e perturbações, que não são considerados quando se trabalha em um ambiente simulado. Portanto, se tem a vantagem de poder extrapolar as conclusões derivadas dos testes feitos na planta piloto para uma planta maior do mesmo processo. Na Figura 2.1 pode-se ver a Planta Piloto com a maioria do seus equipamentos.



Figura 2.1 – Foto da Planta Piloto de Neutralização de pH do LCPI.

Fonte: do Autor.

2.1 Descrição do Processo

O processo de neutralização de pH da Planta Piloto tem como objetivo neutralizar uma solução ácida de ácido clorídrico (HCl) com uma solução básica de hidróxido de sódio (NaOH), a reação de neutralização acontece no Tanque do Reator (TR). Este processo conta com dois equipamentos de atuação que controlam a vazão de base; um deles é uma bomba dosadora, a qual tem um comportamento linear; a outra é uma válvula de controle com comportamento não-linear por causa do atrito. Neste trabalho se emprega a válvula de controle a fim de avaliar diferentes formas de compensar o atrito presente nela. O tanque TR recebe as soluções ácida e básica e é agitado mecanicamente, através de um propulsor naval acoplado a um motor elétrico (MZ-81) para ajudar a homogeneizar a solução. O TR possui um transmissor e indicador de nível (LIT-10) e o nível é controlado com a abertura da válvula solenoide LV-16A. O pH do TR é medido através de um sensor de pH (AE-40) e o transmissor de pH (AITY-40) corrige automaticamente a medição de pH em relação a variações de temperatura (TE-40).

A Figura 2.2 apresenta o P&ID (do Inglês, *Piping and Instrumentation Diagram*) da Planta Piloto.

O TR recebe uma vazão constante de ácido de 41 litros por hora, que pode ser de um dos tanques intermediários, primário (TAPI) ou secundário (TASI). A vazão ao TR é comandada pelas válvulas solenoides (HV31) e (HV32). O fluxo dos dois tanques é constante, uma vez que eles têm uma válvula de entrada autorregulada do tipo boia que dá um nível constante para ambos os tanques intermediários.

A solução de ácido é preparada no tanque de ácido principal (TAP), que alimenta através da válvula (HV35) o TAPI e no tanque de ácido secundário (TAS) que alimenta através da válvula (HV36) o TASI, devido à diferença de elevação. As válvulas HV35 e HV36 têm sempre que estar abertas para assegurar o nível nos tanques TASI e TAPI.

A solução básica que chega ao tanque reator é preparada no tanque de base pressurizado (TBV) e o fluxo de base é regulado pela válvula de controle (FV40) do tipo ar para abrir. O TBV tem ligada uma válvula de entrada de ar (PV71) com o fim de manter uma pressão constante no tanque e vencer a perda de carga na válvula de controle.

Para realizar o controle de pH é possível trabalhar de duas formas para controlar a válvula de controle FV40. Uma delas é usar a placa de aquisição de dados NI 6229 da National Instruments em conjunto com (MATLAB[®]), esta forma oferece a possibilidade de trabalhar com um tempo de amostragem até de 1 kHz. A outra forma é mantendo toda a operação da planta pelo SDCD da ABB[®], modelo 800xA. Este software industrial permite realizar a operação da Planta Piloto através de uma Interface Homem Máquina (HMI). Neste trabalho, se realizam testes com as duas formas possíveis de trabalho.

A Planta Piloto também possui um sistema de segurança para garantir principal-



Figura 2.2 – P&ID da Planta Piloto de Neutralização de pH.

Adaptado de: Juliani (2011).

mente que os níveis dos tanques e a pressão do TBV não sejam excedidos, minimizando o risco de perda de materiais e a falha de algum outro componente. O sistema de segurança é implementado em um Controlador Lógico Programável (CLP), da marca Rockwell[®], modelo SLC 500.

2.2 Válvula de Controle

No mercado da instrumentação, existe uma variedade de tipos de válvulas, como a válvula borboleta, esfera, agulha e globo. Também há diferentes acessórios, como os tipos de atuadores que podem ser eletro-hidráulico, elétrico, pneumático e eletro-pneumático; as características inerentes de vazão que podem ser do tipo abertura rápida, linear, igual porcentagem, entre outras (FISHER, 2005). Uma válvula de controle tipo globo funciona mudando a posição do obturador da mesma, esta mudança aumenta ou diminui a vazão

do fluido. O obturador se encontra na ponta da haste móvel, cuja posição é alterada pelo atuador. O atuador recebe sinal de um conversor de corrente a pressão (I/P), cuja forma de operação é gerar uma pressão equivalente ao sinal elétrico recebido. A pressão gera uma força no diafragma, que se contrapõe à força da mola e movimenta a haste. Na região de operação cada valor de pressão garante uma posição diferente.

Na Figura 2.3 é possível ver as partes mais importantes de uma válvula do tipo globo, que é o tipo de válvula de controle presente na Planta Piloto de Neutralização de pH. As partes mais importantes de uma válvula são:

- Corpo da válvula: é a parte da válvula por onde o fluxo passa e é fechada, aberta ou parcialmente obstruída.
- Gaxetas da válvula: aneis que evitam que o fluxo saia da tubulação do processo.
- Haste da válvula: estrutura que transmite o movimento do atuador até o obturador.
- Castelo: é a estrutura que sustenta o atuador.
- Atuador: parte da válvula que faz o acionamento da parte móvel da mesma. No caso da válvula da Planta Piloto de pH é do tipo diafragma.



Figura 2.3 – Elementos de uma válvula de controle.

Adaptado de: (FISHER, 2005).

O problema do atrito na válvula ocorre pelas condições de funcionamento da válvula. Dentro da válvula, para evitar que o fluido do processo saia pelo orifício entre a haste e o corpo da válvula, existem aneis de vedação (gaxetas) que geram atrito quando a haste se movimenta. Existem uma grande quantidade de configurações do engaxetamento tanto para o material de que é feito como diferentes arranjos do mesmo. Estas configurações dependem principalmente das necessidades de temperatura e diferença de pressão no corpo da válvula. O desgaste no engaxetamento eleva os níveis de atrito na válvula, ocasionando os problemas de variabilidade antes mencionados. A Planta Piloto de Neutralização de pH conta com uma válvula globo, um atuador pneumático de diafragma do tipo ar para abrir, com uma excursão da haste de 12,7 mm e gaxetas de grafite. Na Tabela 2.1 é possível observar outras características importantes da válvula com que se trabalhou.

Tabela 2.1 – Dados da válvula de controle.

Característica	Descrição
Área do Diafragma	$0,0210 \text{ m}^2$
Peso do Atuador	$4,5 \mathrm{kg}$
Comportamento da Válvula	Linear
Ação da Válvula	5-15 psi (Air to react)
Excursão da haste	$12,7 \mathrm{\ mm}$
Material da Gaxeta	Grafite (GRAFOIL (\mathbb{R}))
Conexão ao Processo	NPT
Material dos componentes internos	Inox $316L$ SST
Cv Nominal	$0,\!22$
Atuador	Mola diafragma Baumann modelo 32
Adaptado de: (FISHER, 2005)	

2.3 Curva de Titulação do pH

A curva de titulação é uma ferramenta de muita utilidade para o controle de pH. Uma curva de titulação consiste em um gráfico que mostra como reage um volume de uma amostra básica ou ácida, com outro volume de composição conhecida. Para construir a curva tem-se que misturar sucessivamente uma fração do volume de composição conhecida ao volume da amostra e medir o pH da solução resultante, até que se obtenham dados suficientes para estimar as características da planta. Na Figura 2.4 mostram-se as curvas de titulação experimental e teórica da Planta Piloto de Neutralização de pH, sendo HCl o titulado e NaOH a solução titulante (MARQUES, 2015).

Como é definido em (SHINSKEY, 1990) o pH é o logaritmo negativo da atividade do íon de hidrogênio, em íon por litro.

$$pH = -\log(H^+) \tag{2.1}$$

A água pura pode-se dissociar em uma baixa proporção em íon de hidrogênio (H+) e hidroxila (OH-), como é descrito na equação (2.2):

$$H_2 O = H^+ + O H^- (2.2)$$



Figura 2.4 – Curva de titulação ideal e experimental, com o titulado HCL (0,0056 mol/l) e o titulante NAOH (0,0185 mol/l) para um volume inicial do titulado de 150 ml.

Adaptado de: (MARQUES, 2015).

O produto da concentração de íon de hidrogênio pela concentração de íon de hidroxila é chamado de produto iônico da água K_w , este produto tem um valor constante a 25° C de:

$$K_w = [H^+][OH^-] = 1 * 10^{-14}$$
(2.3)

Na água, para cada íon de hidrogênio há um íon de hidroxila.

$$K_w = 10^{-7} * 10^{-7} = 1 * 10^{-14}$$
(2.4)

Da equação (2.4) pode-se deduzir que as concentrações de íons de hidrogênio e hidroxilas são inversamente proporcionais, ou seja, o aumento de uma das concentrações implica na diminuição da outra. Igualmente, é possível concluir que a escala do pH vai tipicamente de 0 a 14 em dissolução aquosa, sendo ácidas as dissoluções com um pH menor que 7, básicas as que têm um pH maior que 7 e neutras as que têm um pH igual a 7, onde o dissolvente é a água. As soluções usadas neste trabalho são:

- Hidróxido de sódio (NaOH) com uma concentração de 0,0185 mol/l, onde foram diluídos 44 g de NaOH a 97% em um tanque com 57,7 litros de água filtrada.
- Ácido clorídrico (HCl) com uma concentração de 0,0056 mol/l, onde foram diluídos 83,4 ml de HCl a 36,5% em um tanque com 180 litros de água filtrada.

2.4 Cálculo das concentrações das soluções

2.4.1 Cálculo da concentração de ácido

Para o cálculo da quantidade de ácido necessário para conseguir que a relação entre ácido e base consiga ter um pH final de 7 no tanque reator, tem-se um volume no TAP de $Vol_{TAP} = 180$ litros e uma concentração desejada de ácido de [HCl] = 0,0056 mol/l, que dá um pH teórico de 2,25 de acordo com a equação (2.1). Calcula-se a quantidade de moles conforme a equação (2.5)

$$n = 0.0056 * 180 = 1.008 \text{mol NAOH do TBV}$$
 (2.5)

Para uma porcentagem de concentração de 37,25% se tem uma massa específica de 441,5525 gramas por litro. Portanto, para calcular o volume de ácido que se precisa adicionar no tanque de água, se divide o produto dos moles pela concentração molar, o que produz gramas sobre a massa específica do ácido, como se descreve na equação (2.6).

$$Vol_{HCl} = \frac{M}{\rho} = \frac{1,008 * 36,46}{441,5525}$$
(2.6)

O resultado é um volume de 83,23 ml de ácido a adicionar no tanque de água.

2.4.2 Cálculo da concentração de base

Para uma concentração molar de base desejada [NaOH] = 0,0185mol/l em um volume de tanque $Vol_{TBV} = 57,7$ litros, se calcula a quantidade de moles conforme a equação (2.7).

$$[NaOH] = \frac{n}{Vol_{TBV}} \qquad n = 1,0675 \text{mol NaOH no TBV}, \tag{2.7}$$

Para calcular a quantidade de massa requerida, se conhece o valor de η , que é a porcentagem de pureza do NaOH, ela é igual a 0,97. Como se tem uma massa molar de MMNaOH = 39,9971 g/mol e se conhece a quantidade de moles, é feito o cálculo da massa na equação (2.8).

$$Massa \ NaOH = \frac{MM \ NaOH * n}{\eta} = \frac{39,9971 * 1,0675}{0,97}.$$
 (2.8)

Obtém-se uma massa de base para adicionar no TBV de 44,0154 gramas. Com o fim de manter uma concentração entre o ácido e a base e conseguir obter um pH final de 7 é feito o cálculo do fluxo de trabalho entre as duas soluções nas equações (2.9) e (2.10).

$$F_A * C_A = F_B * C_B, \tag{2.9}$$

$$F_B = \frac{41 * 0,0056}{0,0185} = 12,4180 \frac{1}{h}$$
(2.10)

onde F_A e C_A são a vazão e a concentração de ácido, respectivamente e F_B e C_B são a vazão e a concentração de base.

3 Quantificação do atrito

A variabilidade na malha de controle pode surgir devido ao atrito excessivo nas válvulas de controle. Portanto, é necessário conhecer o fenômeno e um método de como estimar os parâmetros que representam o atrito na válvula, a fim de aplicar os algoritmos de compensação de atrito.

Neste capítulo são expostos os principais efeitos do atrito no comportamento das válvulas de controle e a definição do *stiction*. Também, se apresenta o modelo de *stiction* para a válvula de controle que é empregado. No final do capítulo são estimados os parâmetros de atrito da válvula que são usados nos métodos de compensação de atrito.

3.1 Não-linearidades na válvula

As não-linearidades nas malhas de controle podem aparecer devido a uma ou uma combinação de causas, tais como as mencionadas em (CHOUDHURY; JAIN; SHAH, 2008):

- Que o processo seja não-linear por natureza.
- A característica de funcionamento da válvula de controle seja não linear.
- A presença de não linearidades nas válvulas de controle do tipo *stiction*, banda morta e/ou histerese.

A não-linearidad da característica instalada de vazão de controle é chamada de não-linearidad suave, devido a que localmente podem ser consideradas lineares frente às pequenas variações que acontecem. O atrito estático (*stiction*), a banda morta e a histerese são denominados de não linearidades severas, porque sua característica não linear é muito maior e dominante. Com o fim de melhorar o controle, se busca compensar o atrito na válvula de controle para reduzir a variabilidade do processo.

3.2 Stiction

A presença de oscilações na malha de controle é devida, muitas vezes, às não linearidades na válvula de controle, como a banda morta, *backslash* e o *stiction*, esse último é a maior causa de oscilações nas malhas de controle.

O stiction é a combinação de duas palavras em Inglês; static (estático) e friction (atrito) no qual o atrito estático excede o atrito dinâmico dentro da válvula no início da movimentação da mesma (CHOUDHURY; SHAH; THORNHILL, 2004). O atrito estático

faz com que a haste da válvula fique presa quando se tenta fazer pequenas alterações em sua posição.

O stiction é a propriedade de um elemento atuador, que gera um movimento suave em resposta a uma entrada variável, composta por uma parte estática (banda morta + banda de agarramento) seguida por um salto abrupto repentino, chamado *slip-jump*. O *slip-jump* é expresso como uma porcentagem do *span* de saída. Sua origem em um sistema mecânico é o atrito estático, o qual excede o atrito dinâmico (CHOUDHURY; JAIN; SHAH, 2008). Com o fim de ter um melhor entendimento dos fenômenos que acontecem na válvula, são definidos alguns termos de acordo com a norma (ISA, 2000).

- Atrito estático *(static friction stiction)*: resistência ao início do movimento, normalmente medida como a diferença entre as forças necessárias para superar o atrito estático ao se inverter o sentido de movimento da haste da válvula.
- Banda morta (dead band): a faixa de valores em que um sinal de entrada pode ser variado, com reversão de direção, sem iniciar uma mudança observável no sinal de saída. É expresso em porcentagem da largura do sinal de entrada.
- Zona morta *(dead zone)*: a faixa de valores de entrada para a qual nenhum valor da saída existe.
- Histerese *(hysteresis)*: propriedade de um elemento evidenciada pela dependência da saída em relação à história de excursões anteriores e à direção da movimentação atual, para uma dada excursão da entrada (Figura 3.1).

Na Figura 3.2 pode-se ver o comportamento do *stiction*, o gráfico é chamado curva de assinatura e representa a relação entre a entrada (pressão) e a saída da válvula (posição). Quando a válvula está em repouso se encontra no ponto A, seguindo a descrição acima da definição do atrito estático da (ISA, 2000) o segmento AB representa a banda morta e o segmento BC a banda de agarramento, depois que o sinal do controlador consegue superar ambas as bandas, se produz o salto abrupto (*slip-jump*). Se a velocidade da válvula for muito baixa ou nula, ela poderia-se agarrar novamente, tendo nesse ponto somente presente a banda de agarramento. No gráfico este comportamento é observado e expresso pelo parâmetro J.

No ponto E, a válvula está no seu ponto máximo, nesse ponto o comportamento que a válvula apresenta é o mesmo anteriormente descrito, mas no sentido contrário.

O principal problema do atrito estático é que ele pode impedir que a haste da válvula se movimente quando acontecem pequenas mudanças no sinal de entrada do controle. Portanto, a haste se move só quando existir força suficiente para vencer o atrito estático. Por isto, a força necessária para levar a haste da válvula a se mover é maior do que a força necessária para levar a haste até a posição desejada, resultando em um salto.

Figura 3.1 – Gráfico da histerese, banda morta (deadband) e zona morta (dead zone).







Adaptado de: (Cuadros, 2011)

3.3 Modelo do Stiction

O modelo do *stiction* se divide em modelos empíricos e modelos físicos. Os modelos empíricos reproduzem a relação entre a entrada (como corrente, tensão ou pressão) e a saída (posição) no modelo da válvula, tal como está na Figura 3.2.

Os modelos físicos usam o balanço de forças e a segunda lei de Newton na válvula para prever seu movimento. Uma grande desvantagem do modelo físico é a necessidade de uma grande quantidade de parâmetros da válvula, como a massa das partes móveis, o coeficiente da mola e coeficientes de atrito; os quais não são de fácil estimação.

Em (GARCIA, 2008) foram testados oito modelos diferentes para representar os efeitos do atrito nas válvulas de controle e se concluiu que os modelos de Karnopp, de Kano e Lugre conseguem ter o melhor comportamento esperado. Neste trabalho é escolhido o modelo de Kano para modelar o efeito do atrito na válvula de controle, por causa da simplicidade para o cálculo dos parâmetros do mesmo em comparação com os modelos de Karnopp e Lugre.

3.3.1 Modelo Empírico de Kano

Na Figura 3.2 podem-se definir dois parâmetros para trabalhar com o modelo de Kano, denominados $J \in S$. O modelo assume que as unidades da entrada e saída sejam do tipo p.u. (por unidade). O parâmetro S representa a banda morta mais a banda de agarramento, isto é, a amplitude do sinal de entrada necessária para reverter o movimento da válvula. O parâmetro J representa a amplitude da banda de agarramento, que é a mesma do *slip-jump*, essa amplitude é o tamanho do deslizamento da haste que se observa quando a válvula começa a se movimentar.

O algoritmo proposto por Kano é mostrado na Figura 3.3. Segundo o modelo, a variável stp indica se a haste da válvula está se movimentando ou se está parada, consequentemente, se existe o efeito do atrito estático; a variável d representa a direção do último movimento da válvula e armazena o valor da entrada no instante em que a válvula suspende seu movimento.

Os parâmetros $S \in J$ são necessários para a sintonia dos compensadores de atrito, portanto, uma boa quantificação dos mesmos é de grande importância. Para quantificar o atrito foi feito um teste com três ciclos completos de um sinal triangular no conversor I/P com os dados sendo coletados pela placa NI 6229 a uma frequência de 1 kHz.

Para realizar o teste se precisa de um instrumento de medição de pressão no atuador e outro instrumento de medição de posição da haste da válvula, isto pode limitar a implementação do cálculo dos parâmetros do modelo por causa de necessitar de instrumentação que normalmente não está instalada em um processo industrial.



Figura 3.3 – Diagrama de fluxo do modelo de Kano.

Adaptado de: (Kano,2004).

Na Figura 3.4 pode-se observar o gráfico da pressão em Pascal, que é o sinal de entrada na válvula (saída do controlador *op*) e a posição da haste válvula (Figura 3.5) em metros, que é o sinal de saída da válvula (variável manipulada). No gráfico da posição pode-se observar que existem intervalos em que a posição mantém um valor constante, embora a pressão aumente, adicionalmente apenas quando a pressão atinge certo valor a válvula começa a movimentar-se. Como a válvula é do tipo ar para abrir, a posição tem um valor máximo quando a pressão é zero e a válvula se encontra fechada.

Na curva de assinatura (Figura 3.6) pode-se ver a relação entre a pressão do atuador e a posição da haste (ambos em valores por unidade), o gráfico comparado com a curva de




Fonte: do Autor.

Figura 3.5 – Posição da haste.



Fonte: do Autor.

assinatura da Figura 3.2 se encontra invertido no eixo vertical, sendo que a medida de posição é máxima quando a pressão é zero e a válvula está fechada.

Em (UEHARA; ROMANO; GARCIA, 2008) tendo a curva de assinatura em valores p.u., são estimados os valores de $S \in J$ medindo-se diretamente a partir dessa curva. O valor de S é estimado medindo-se diretamente o tamanho da reta superior e inferior da curva de assinatura e fazendo-se uma média das duas medidas, uma vez que devido a imperfeições na haste pelo uso da válvula, a largura das bases da curva de assinatura são diferentes. O valor da média para os dados coletados de S é de 14,35%.

Para estimar o valor de J se faz a medição na região da curva onde se produz o salto (*slip-jump*). Segundo os testes realizados na válvula com que se está trabalhando,



Figura 3.6 – Curva de assinatura da válvula de controle.

percebe-se um atrito muito grande pelo qual é possivel observar o salto na apertura e fechamento da válvula. A medição do salto na Figura 3.7 resulta em um J de 0,83%.

Figura 3.7 – Ampliação do *slip-jump* da válvula de controle



Fonte: do Autor.

3.3.2 Refinamento de Parâmetros

Depois de obtido o parâmetro S, é possível refinar o valor obtido do mesmo. Para refinar as estimativas dos parâmetros de atrito, em (SILVA, 2013) se propõe um ensaio de resposta ao degrau. Isto se dá considerando a definição do parâmetro S que corresponde à

maior variação possível na entrada da válvula, na qual após uma mudança de direção não ocorrem mudanças na posição da haste.

No ensaio (Figura 3.8) é realizada uma busca binária onde se define uma região [S-H; S+H], sendo S a estimativa inicial do parâmetro e H o erro máximo esperado da estimativa de S. No método inicialmente se eleva a pressão no atuador de 0% até 50% e se espera até que a posição da haste e a pressão no atuador sejam estáveis. Após disso, se aplica um degrau de S-H esperando que não haja alteração nenhuma na posição da haste e que aconteça o contrário quando se aplique um degrau de S+H partindo-se do mesmo 50%. Se os casos anteriores ocorrem, é garantido que o valor real do parâmetro se encontra na região definida anteriormente. Nas iterações seguintes se continua partindo do valor de 50% e o valor de H é reduzido pela metade, até que a região de busca seja menor que um valor h, que representa a precisão desejada. Os parâmetros a usar são S = 14,35%, H = 20% e h = 0,1%.

Figura 3.8 – Fluxograma do algoritmo de refinamento da estimação de $S\!\!.$



Fonte: (Silva, 2013).

O procedimento para encontrar o valor refinado de J é similar ao procedimento usado para refinar o valor de S, a diferença consiste que se tem que aplicar um degrau no mesmo sentido que o degrau inicial que o último movimento depois da parada da válvula. Portanto, os passos a seguir são os mesmos que os usados no fluxograma da Figura 3.8. Para o caso de J foram escolhidos H = 1.5%, h = 0.1% e J = 0.83%.

Na Tabela 3.1 pode-se ver os resultados obtidos depois de empregar o método de refinamento.

Tabela 3.1 – Resultados do refinamento dos valores identificados de S e J.

Característica	Resultado Obtido	Número de iterações
S	$12,\!28\%$	7
J	0,75%	3
	Fonte: do Auto	or.

Esta técnica de refinamento de parâmetros é de bancada e não com a válvulando operando. Em (ROMANO, 2010) se apresenta um método de identificação dos parâmetros de Kano que usa os dados históricos da válvula de controle para realizar o cálculo e desta menira não precisa de parar o processo.

3.3.3 Validação do modelo com o algoritmo de Kano

Com os novos valores calculados dos parâmetros refinados $S \in J$, é realizada uma comparação do algoritmo de Kano com esses valores e os dados da posição dos testes feitos com a válvula. A entrada do modelo é o sinal por unidade da pressão de entrada do atuador (Figura 3.5) que foi enviado para a válvula e a saída do modelo é a posição da haste.

Na Figura 3.9 se mostra o resultado da validação dos parâmetros calculados no modelo de Kano com os dados testados. Na parte superior do gráfico as duas figuras são diferentes. Isto era esperado, tendo em conta que o modelo de Kano pressupõe que o atrito seja igual tanto para fechamento como para a abertura da válvula, caso que não acontece na válvula em questão, possivelmente em consequência das imperfeições que tem a haste da válvula pelo uso.

Figura 3.9 – Validação dos parâmetros do modelo de Kano.



Fonte: do Autor.

4 Compensação do Atrito

Neste capítulo são descritos os métodos de compensação de atrito CR1, CR2, *Knocker* e *Two-move*. Também, é apresentado um algoritmo para desabilitar a ação dos compensadores e manter constante a saída do controlador.

4.1 Compensadores de Atrito

Além da não linearidade presente no processo de neutralização de pH, o atrito da válvula de controle diminui o desempenho da malha de controle de pH, visto que a posição da haste não atinge o valor dado pelo sinal de controle para obter uma vazão de base que neutralize a solução no tanque reator. Portanto, o atrito introduz variabilidade na variável controlada e aumenta o tempo de acomodação.

Os compensadores de atrito descritos trabalharam em conjunto com o controlador PID na malha de controle de pH.

4.1.1 Compensador Knocker

O compensador *Knocker* (HÄGGLUND, 2002) é uma função que adiciona pulsos com uma duração e amplitude constante na direção da taxa de mudança do sinal de controle. Portanto, na estrutura da malha, o sinal dos pulsos u_k é somado ao sinal de saída do controlador u_c como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Estrutura da malha de controle com o compensador Knocker.



Adaptado de: (HÄGGLUND, 2002).

A finalidade do compensador é que a soma dos pulsos com o sinal de controle consiga vencer o *stiction* da válvula para que a haste fique na posição desejada. A saída do *knocker* pode-se ver na Figura 4.2, a qual é uma sequência de pulsos que é caracterizada por três parâmetros que são h_k , que é o tempo entre cada pulso, a é a amplitude do pulso e τ_k é a largura dos pulsos.



Figura 4.2 – Pulsos somados ao sinal de controle no compensador Knocker.

Adaptado de: (HÄGGLUND, 2002).

Cada intervalo do pulso u_k é dado pela seguinte equação:

$$u_k(t) = \begin{cases} a * sgn(u_c(t) - u_c(t_p)) & t \le t_p + h_k + \tau_k \\ 0 & t > t_p + h_k + \tau_k \end{cases}$$
(4.1)

onde t_p é o tempo no instante do início do pulso anterior. O sentido de cada pulso (sgn) se determina pela taxa de variação do sinal de controle u_c .

A escolha dos parâmetros dos pulsos deve-se realizar adequadamente para determinar as características dos mesmos e a efetividade do compensador. Os pulsos têm que ser suficientemente pequenos, de modo a não gerar um deslizamento maior que o desejado para vencer o *slip-jump*. Igualmente os pulsos devem ser suficientemente largos, de forma que consigam movimentar a válvula e esta não fique presa. As recomendações realizadas em (HÄGGLUND, 2002) são de manter o valor de *a* em um intervalo de [1%-4%]. Também se recomenda que o parâmetro τ_k seja de duas vezes o período de amostragem e que h_k seja de $h_k = n * T_s$, onde *n* se encontra na faixa de $2 \le n \le 5$.

Em (SRINIVASAN; RENGASWAMY, 2005) são simuladas diferentes combinações dos parâmetros do compensador comparando, para cada caso, o erro integral quadrático

(ISE). Nesse artigo concluiu-se que se tem que utilizar h_k de 4 a 6 vezes o valor do período de amostragem do sistema e de duas vezes para τ_k . Para o valor da amplitude (a), em função da intensidade do atrito nos testes realizados recomenda-se uma amplitude para levar em conta o efeito do *slip-jump* (banda de agarramento) e da banda morta, uma amplitude de $a = \frac{S}{2}$; o valor de τ_k e h_k é de duas e cinco vezes o valor do tempo de amostragem, respectivamente.

4.1.2 Compensador CR

O compensador CR é apresentado em (HÄGGLUND, 2007). Ele tenta eliminar a banda morta, adicionando um sinal de compensação cada vez que a ação de controle muda de sentido. O nome CR vem das siglas em Inglês *Constant Reinforcement*. O sinal de compensação total (MV) é a soma da saída do controlador PID (u_c) com o sinal de compensação da banda morta (u_k). O compensador tem uma estrutura de malha tal como a vista na Figura 4.1. A equação (4.2) representa o algoritmo de compensação CR.

$$u_k = \frac{Bm}{2} * sgn\left(\frac{du_c}{dt}\right) \tag{4.2}$$

Em (IVAN; LAKSHMINARAYANAN, 2009) foi usado um compensador com a mesma estrutura do compensador da equação (4.2), mas tendo em conta tanto a banda de agarramento como a banda morta, portanto, é usado o parâmetro S do modelo de Kano. A equação com essa nova mudança foi a implementada neste trabalho é a seguinte:

$$u_k = \frac{S}{2} * sgn\left(\frac{du_c}{dt}\right) \tag{4.3}$$

Outra forma mais direta do mesmo compensador apresentada em (HÄGGLUND, 2007) é considerando o sinal do erro para fazer a compensação da banda morta. A estrutura da malha de controle que representa este compensador se mostra na Figura 4.3 e a equação que o representa é a (4.4). Para diferenciar esta opção da proposta original da equação (4.2) se chama esta segunda opção de CR2.

Figura 4.3 – Estrutura da malha de controle com o compensador CR2.



Adaptado de: (HÄGGLUND, 2007).

$$u_k = \frac{S}{2} * sgn\left(e\right) \tag{4.4}$$

4.1.3 Algoritmo de Desabilitação do Controle

Em (CUADROS, 2011) se propõe um método, no qual depois de haver aplicado os compensadores e minimizado o erro, se não houver nenhuma mudança no *set-point* os pulsos de compensação não seriam necessários e o sinal de controle poderia ser mantido constante. Porém, no caso em que acontecer alguma perturbação na malha ou mudança no *set-point*, os pulsos dos compensadores seriam retomados e o sinal de controle variaria. Na Figura 4.4 pode-se ver a estrutura da malha de controle com o algoritmo de Desabilitação do Controle.

Figura 4.4 – Estrutura da malha de controle com o algoritmo de Desabilitação do Controle.



Adaptado de: (CUADROS, 2011).

O algoritmo de Desabilitação do controle pode ser observado na Figura 4.5. Nele, a saída do controlador é mantida fixa no momento em que a variável controlada estiver próxima ao *set-point*. Portanto, para desabilitar o controlador e o compensador, se comparam as derivadas do erro com um valor limite (δ 1). Se a derivada for menor em um período de tempo determinado (T_p) de 10 segundos no testes realizados, se considera que o erro mínimo foi encontrado, ou seja, que a posição da haste atingiu uma posição onde a PV alcançou o valor de referência. De acordo com as equações (4.1) do compensador Knocker e (4.4) do CR1 quando o controlador é desativado a saída do compensador será zero, contudo no caso do compensador CR2 na equação (4.3) depende do erro portanto na implementação do algoritmo se precisa de um sinal do bloco do desabilitador que desative a saída do bloco do compensador CR2. Quando o erro da variável controlada for superior a outro valor limite (δ 2) por mais de quatro intervalos de amostragem (T_s), o controlador será habilitado de novo e por conseguinte o compensador.

4.1.4 Compensador *Two-move*

No trabalho de (SRINIVASAN; RENGASWAMY, 2008) é proposto o método Two-move, que tem como objetivo diminuir a variabilidade da variável controlada (PV) e



Figura 4.5 – Diagrama de fluxo de Desabilitação do Controle.

Adaptado de: (CUADROS, 2011).

por sua vez a variabilidade da haste da válvula, tudo isto sem incrementar a variabilidade do sinal de controle.

O método insere dois movimentos na válvula; o primeiro tira a haste da posição agarrada sem saturar a válvula, o segundo leva ao valor de estado estável da posição da haste xss. Nas equações (4.5) e (4.6) se descreve o sinal de compensação para cada um dos dois movimentos. O primeiro movimento tem que ser suficientemente grande para que, quando aconteça o segundo, a haste atinja a posição que se deseja na fase de movimento e não no *slip-jump*. O sinal de compensação tem que ter a amplitude da banda de agarramento (J) e o valor do sinal de controle (uss) que corresponde ao valor do sinal de controle que estabiliza a válvula na posição xss.

1° Movimento
$$u_k(t) = sgn * \left(\frac{du_c(t)}{dt}\right) * \left(|u_c(t+1)| + J\right) + uss,$$
 (4.5)

2° Movimento
$$u_k(t+1) = -(u_c(t+1) - uss).$$
 (4.6)

As equações propostas em (SRINIVASAN; RENGASWAMY, 2008) apresentam o modelo de um parâmetro, que não tem em conta a banda morta. Como foi descrito no *Capítulo 3, Quantificação de atrito*, de fato existe banda morta na válvula de controle com que são feitos os testes. Considerando a banda morta o valor de *uss* pode variar dependendo se existe inversão do movimento na válvula de controle para atingir a posição xss, pois se precisaria de uma variação de S (banda de agarramento + banda morta) para a movimentação, o que não ocorre no modelo Two-move original.

Em (ELY; LONGHI, 2011) foi realizada uma análise das desvantagens do método Two-move original. Adicionalmente, foi proposta uma variação do compensador na qual se adiciona em cascata ao compensador um bloco de correção de banda morta e cuja saída do compensador (OPC) não é somada à saída do controlador, mas é o próprio sinal de entrada da válvula de controle, como se pode ver na Figura 4.6. Também se propõe o parâmetro BOP, este é uma banda de saída definida que permite diminuir a agressividade da MV.

Figura 4.6 – Estrutura Two-move.



Adaptado de: (ELY; LONGHI, 2011).

O comportamento do compensador depende do resultado de $(|u_c(t_k) - OPC(t_{k-1})|)$, existindo três possíveis casos para a saída do compensador e a correção da banda morta com o cálculo do compensador (OPC) e da direção do movimento a ser realizado (d) para cada caso.

No primeiro caso, quando a diferença é maior que J, o valor de $OPC(t_k)$ (como foi definida a saída do compensador) será igual a $u_c(t_k)$, já que a variação é suficientemente grande para que exista movimento. No segundo caso acontece o contrário e a diferença é menor que J e maior que BOP, o sinal do controlador gera um movimento menor que o *slip-jump*, portanto é aplicado o compensador *Two-move*. No último caso, se a diferença é menor que o valor do BOP, a saída do compensador é mantida constante. O uso do BOP é de muita utilidade, uma vez que não permite um desgaste muito rápido da válvula quando os valores da variável manipulada (PV) estão próximos ao valor de referência.

$$1^{\circ} \operatorname{Caso} |u_c(t_k) - OPC(t_{k-1})| > J$$

$$(4.7)$$

$$OPC(t_k) = u_c(t_k)$$

$$d(t_k) = sgn(u_c(t_k) - OPC(t_{k-1}))$$

2° Caso $BOP < |u_c(t_k) - OPC(t_{k-1})| \le J$
(4.8)

Primeiro Movimento:

$$OPC(t_{k}) = OPC(t_{k-1}) + (|u_{c}(t_{k}) - OPC(t_{k-1})| + J) * sgn(u_{c}(t_{k}) - OPC(t_{k-1}))$$

$$d(t_{k}) = sgn(u_{c}(t_{k}) - OPC(t_{k-1}))$$

Segundo Movimento:

$$OPC(t_{k}) = OPC(t_{k-1}) - J * sgn(u_{c}(t_{k}) - OPC(t_{K-1}))$$

$$d(t_{k}) = -d(t_{k-1})$$

$$3^{\circ} \text{ Caso } |u_{c}(t_{k}) - OPC(t_{k-1})| < BOP$$

$$OPC(t_{k}) = OPC(t_{k-1})$$

$$d(t_{k}) = d(t_{k-1})$$

$$d(t_{k}) = d(t_{k-1})$$

(4.9)

A escolha do valor de BOP tem que ser menor que a banda de agarramento (J). Portanto, se a banda de saída for muito próxima a J, os ciclos limite do processo não poderiam ser eliminados, pois o controlador precisa alterar muito sua saída para causar uma movimentação na válvula. Por outro lado, um valor muito pequeno do BOP aumentaria a variabilidade do sinal de controle. O valor escolhido para o BOP foi de 0,65.

A saída do compensador além da observada nas equações (4.7), (4.8) e (4.9) tem outro termo para a compensação da banda morta de forma semelhante à equação (4.4)proposta em (HÄGGLUND, 2007). Portanto, a equação final do compensador é a seguinte:

$$u_k(t_k) = OPC(t_k) + d * \frac{(S-J)}{2}$$
(4.10)

onde (S - J) é a banda morta. A compensação deste fenômeno não pode se inserir diretamente na variável *OPC*, visto que isto afetaria o cálculo de $|u_c(t_k) - OPC(t_{k-1})|$. Esta última variação apresentada por (ELY; LONGHI, 2011) é implementada neste trabalho.

5 Identificação e Sintonia das malhas de pH e nível

Neste capítulo é feita uma identificação das malhas de controle de pH e nível na região de operação. Para os modelos identificados de cada malha são feitas sintonias de controladores PID para cada caso e são testadas as sintonias na Planta Piloto de Neutralização de pH.

Segundo os trabalhos desenvolvidos na Planta Piloto de Neutralização de pH (FAVARO, 2012) e (ALVARADO, 2013) o processo apresenta tempos de acomodação longos e uma alta variabilidade. Por tal razão, não é factível realizar uma sintonia de modo experimental, por isto optou-se por fazer uma identificação das malhas, a fim de se obter um modelo aproximado do sistema e poder desenvolver os controladores para o ponto de operação desejado. Estes modelos serviram como uma estimativa para a sintonia dos controladores das malhas de nível e pH.

No trabalho de (MARQUES, 2015) é mostrado o gráfico da derivada da curva de titulação $(dpH/dV_{titulante})$. Esta curva possui uma relação direta com o ganho da planta. Portanto, o comportamento em uma faixa de pH vai ser muito diferente de outra. Na Figura 5.1 a diferença entre o valor teórico e experimental é devida à existência de ácidos e bases fracas na solução, que alteram significativamente o ganho da planta. Pode-se evidenciar que na faixa de pH de 7 a 8 o ganho é maior que na faixa de pH de 6 a 7.

Os resultados obtidos em (MADURO, 2011) usando a válvula de controle na Planta Piloto de Neutralização de pH podem ser observados na Figura 5.2. Nela se apresenta a resposta ao degrau de 6 a 7 no *set-point* do pH, pode-se perceber a existência de uma alta variabilidade do pH, não conseguindo estabilizar em nenhum momento perto do *set-point* desejado, ainda, o autor comenta que o tempo total do teste durou até acabar a solução de base do TBV.



Figura 5.1 – Forma diferencial da curva de titulação.



Figura 5.2 – Gráfico da resposta ao degrau de 6 a 7 do p
H .

Adaptado de: (MADURO, 2011).

5.1 Identificação da malha de nível

Considerando que a variação da malha de pH não afeta em grande medida a malha de nível tanto como no caso contrário e que a natureza do nível apresenta um comportamento lento e linear, é feita inicialmente a identificação da malha de nível. Para realizar esta identificação, foi mantido o valor de pH em 7 com a sintonia utilizada em (MADURO, 2011) para a válvula de controle e uma vazão de ácido de 41 l/h. A variável de processo foi estabilizada em um valor de 75% do seu valor máximo, a seguir foi aplicado um degrau de 3% na variável manipulada (MV). A resposta ao degrau em malha aberta apresentou um comportamento de sistema de primeira ordem, que conseguiu estabilizar-se em 5000 segundos (Figura 5.3).



Figura 5.3 – Resposta ao degrau da malha de nível.

Fonte: do Autor.

Como se pode observar, a malha do nível tem um comportamento de primeira ordem e de modo reverso, portanto a equação que representa a resposta é a seguinte:

$$y(s) = \frac{-k_n}{\tau_n * s + 1} \tag{5.1}$$

Para o cálculo do ganho é aplicada a seguinte equação:

$$k_n = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} = \frac{\text{Variação da Variável de Processo } [\%]}{\text{Variação da Variável Manipulada } [\%]}$$
(5.2)

A constante de tempo τ_n é calculada como o tempo em que a resposta ao degrau atinge um valor de 63,2% da resposta em regime permanente. Os valores dos parâmetros calculados são $k_n = 2,08$ e $\tau_n = 1435$, portanto o modelo do sistema é representado pela equação (5.3) e o modelo identificado junto com a resposta do processo real é mostrado na Figura 5.4.

$$G_{ma,nivel}(s) = \frac{-2,08}{1435s+1} \tag{5.3}$$





Fonte: do Autor.

5.2 Controle de Nível

Partindo do modelo identificado e dos parâmetros do mesmo, foi feita uma primeira estimação da sintonia do controlador com o método da Síntese Direta. Em seguida foi variada a constante de tempo desejada da malha fechada até encontrar uma resposta satisfatória. Os valores obtidos são $k_{c,nivel} = 3$ e $Ti_{nivel} = 1230$, obtendo-se a seguinte equação do controlador:

$$G_{c,nivel}(s) = 3\left(1 + \frac{1}{1230s}\right)$$
 (5.4)

O controlador é testado no modelo com um degrau de 1% no valor de referencia do nível, obtendo-se a saída da Figura 5.5, onde se mostra que o gráfico estabiliza em 120 segundos com uma resposta de primeira ordem.



Figura 5.5 – Resposta a degrau no *set-point* da malha de nível.

5.3 Identificação da malha de pH

Como o comportamento da malha de pH é do tipo não linear, foi definido um intervalo de trabalho no qual é feita a identificação e o controle. Este intervalo é para um pH de 6 até 8, sendo esta região a que tem uma maior não-linearidade.

O teste na planta foi realizado em malha fechada com um controlador PI com a sintonia dada no trabalho de (MADURO, 2011) e a sintonia para a malha de nível calculada na seção anterior. O resultado obtido é apresentado na Figura 5.6. O gráfico mostra uma variabilidade muito alta. Por causa da não-lineraridade tão alta não é possível estimar um modelo baseado na curva de reação do processo. Portanto, são utilizados métodos de identificação como o ARX, ARMAX e OE usando os dados da PV e da MV para identificar o modelo da planta. Se utilizou um método recursivo variando os parâmetro de cada estrutura de modelo (na,nb,nc,nf) de um a dez, obtendo-se como resultado o maior valor do índice *fit* para cada estrutura. O *fit* é o índice de ajuste que resulta de comparar o modelo com os dados experimentais. Na equação (5.5) pode-se observar o cálculo do índice *fit*, onde $\hat{y}(t)$ representa os dados da simulação, $\bar{y}(t)$ o valor médio dos valores medidos de y * (t). O símbolo $\|.\|$ representa a norma euclidiana definida como a raíz da soma dos elementos do vetor elevado ao quadrado.

$$fit(\%) = 100 * \left(1 - \frac{\|y(t) - \hat{y}(t)\|}{\|y(t) - \bar{y}(t)\|}\right)$$
(5.5)

O maior valor de *fit* obtido foi de 60,28% com o método OE de ordem dois, portanto este foi o modelo identificado escolhido. Na tabela 5.1 podem-se observar os valores do FIT para cada um dos modelos identificados e os ordens de cada um dos parâmetros de cada modelo.

Figura 5.6 – Resposta do modo servo e sintonia inicial.



Fonte: do Autor.

Tabela5.1-Valoresdo FIT para cada modelo identificado.

Modelo	FIT (%)	Ordens				
ARX	$13,\!91$	na=9, nb=7, nk=0				
ARMAX	$23,\!39$	na=7, nb=10, nc=8, nk=0				
OE	60,28	nb=3, nf=2, nk=0				
Fonte: do Autor.						

O modelo de malha fechada identificado é convertido de discreto a continuo com a função d2c do Matlab e se representa na equação (5.6):

$$G_{ma,pH} = \frac{-0.06542s^2 + 169.1\ 10^{-5}s + 5.002\ 10^{-7}}{s^2 + 3.354\ 10^{-5}s + 4.402\ 10^{-7}}$$
(5.6)

O modelo é validado inserindo a mesma sintonia do PI com que foi realizado o primeiro experimento, como pode-se observar na Figura 5.7. No gráfico pode-se verificar

que embora o modelo não represente fielmente os dados experimentais, ele representa aproximadamente o comportamento do pH. No entanto, se poderia pensar em usar os métodos de identificação para modelos de processos não-lineares descritos em (ROMANO, 2010) como uma alternativa para realizar uma nova identificação no caso em que a sintonia desenvolvida em base à equação do modelo (5.6) não fosse satisfatória.

Figura 5.7 – Validação do modelo identificado com os resultados experimentais.



Fonte: do Autor.

5.4 Controle do pH

Com o modelo identificado na seção anterior é calculada uma sintonia que consiga atingir o valor de referência com um sobressinal baixo, deve ser uma sintonia lenta que permita obter uma boa resposta no momento em que trabalhe junto com o método de compensação de atrito.

Para isto é utilizado o bloco de *Simulink Signal Constraints*, neste bloco são dados os limites desejados do sobressinal, de variação sobre o *set-point* e dos valores para as constantes da sintonia do controlador. O bloco realizar iterações até fornecer uma sintonia que cumpra com as condições de resposta estipuladas.

Na Figura 5.8 se apresenta o modelo com o bloco *Signal Constraints*, igualmente se tem um filtro para o termo derivativo do controlador com um valor do filtro estimado experimentalmente.

Os valores das constantes obtidas com o bloco são $k_c = 4,1, T_i = 180$ e $T_d = 3$. Esta vai ser a sintonia que vai-se utilizar nos testes junto com os compensadores.

Figura 5.8 – Modelo no software (MATLAB[®]) para calcular a sintonia do controlador.



Fonte: do Autor.

6 Resultados Experimentais

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de compensação de atrito CR1, CR2, *Knocker*, *Two-move* e o algoritmo de desabilitação do controle, que foram discutidos no capítulo 4, tanto para o caso com o *software* acadêmico (MATLAB[®]) como para o *software* industrial (800xA da ABB[®]), analisando-se o desempenho em modo servo e regulatório para cada caso.

6.1 Indices de Desempenho para a análise dos resultados

Para comparar as respostas obtidas por cada um dos compensadores propostos, tanto para modo servo como modo regulatório se precisa de índices de desempenho que possam quantificar qual método gera melhores resultados. Para avaliar o desempenho do sistema comparando a variável controlada com o valor de referência, é usado o ITAE (do Inglês, *Integral Time Absolute Error*) na equação (6.1). O índice de desempenho ITAE foi calculado como a média dos índices ITAE em cada região de ensaio, uma vez que este índice dá um peso maior para os erros que ocorrem em instantes de tempo maiores. Para o caso de pH são 4 regiões, cada uma com 1800 segundos. O índice ITAE calcula um valor maior para respostas com tempo de acomodação longo, portanto para a análise específica do problema regulatório o cálculo do índice é feito para todo o tempo do teste.

$$ITAE = \frac{1}{4} * \sum_{i=0}^{3} \left(\frac{1}{1800} \sum_{k=1}^{7200} |e(k)| (t(k) - 1800i) \right)$$
(6.1)

Outro indicador é o tempo de acomodação t_s (OGATA, 2003), que é o tempo necessário para a curva de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final, faixa que normalmente se especifica por uma percentagem absoluta do valor final. O valor da percentagem escolhido foi 0,1 no valor do pH, de maneira que possa se comparar todas as respostas dos testes realizados. No caso do problema regulatório se tem em conta o tempo em que se consegue neutralizar o ácido desde que é adicionada a perturbação.

O sobressinal máximo (M_p) é outro critério para analisar os resultados do modo servo, porém para o modo regulatório este critério não faz muito sentido. Optou-se por usar um critério análogo ao de sobressinal máximo o qual é o desvio máximo em relação ao *set-point* (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2006). O uso dos métodos de compensação de atrito diminui a variabilidade da variável controlada através de um sinal de controle mais agressivo gerado pelos compensadores. Este comportamento pode encurtar a vida útil da válvula, portanto, para medir o desgaste da válvula emprega-se a equação (6.2), em esta é realizada a somatória do módulo da substração do termo da atual de posição com o anterior.

$$D_v = \sum_{k=1}^{7200} |x(k) - x(k-1)|$$
(6.2)

6.2 Ensaios com *Software* Acadêmico

Esta primeira implementação foi realizada usando a placa National Instruments (NI 6229) e com o software acadêmico (MATLAB[®]), tendo em conta a familiaridade que já se tinha com este software. Para estes testes os parâmetros segundo o modelo de Kano da válvula de controle são S 12,28% e J 0,75% (Tabela 3.1). A taxa de execução do controlador PID foi de 1 segundo, todavia a taxa para o compensador foi de 3 segundos, a fim deixar que a válvula tenha tempo para se mover, seguindo as recomendações dadas em (ELY; LONGHI, 2011).

6.2.1 Ensaios no modo Servo

Para os ensaios do modo servo aplica-se uma sequencia de degraus no *set-point*, variando de 7 para 8, 8 para 7 e 7 para 6, nos instantes 1800, 3600 e 5400 segundos, respectivamente. Neste caso, a vazão de ácido se mantém constante sendo de 41 l/h. No início do teste se tenta partir de valores do ponto de operação, no caso do nível é um valor de 75% do nível total do tanque reator e para o pH é um valor de 7.

Inicialmente se apresenta o resultado obtido apenas com o controlador PID na Figura 6.1. Embora a sintonia tenha sido desenvolvida visando obter uma resposta suave, o resultado exibe um sobressinal quando existe uma variação do *set-point*. Na Figura 6.1 é possível perceber as oscilações na variável de processo por causa do atrito na válvula de controle, o comportamento das ditas oscilações difere de outras oscilações também causadas pelo atrito, como no controle de vazão, devido ao comportamento lento do pH.

Da mesma forma, o sinal da variável manipulada apresenta oscilações, as quais ocorrem porque a posição da haste não consegue atingir uma posição que consiga proporcionar uma vazão de base que neutralize o ácido por causa do atrito na válvula, por isto o sinal começa a aumentar até superar o valor do atrito estático (parâmetro S no modelo de Kano), no entanto, quando o dito valor consegue ser maior que S, o valor de posição atingido é maior que o desejado e neste ponto começa o mesmo comportamento, mas no sentido contrário.

Este efeito de variabilidade, que também se apresenta no sinal de controle, não afeta a resposta do pH, contudo diminui a vida útil da válvula de controle, já que uma movimentação maior da válvula implica em um maior desgaste de suas partes. O esforço de controle fica perto dos limites apenas quando existe uma variação no *set-point*, mas não chega perto de saturar em nenhum momento.



Figura 6.1 – Resultado no modo servo com o controlador PID.

Fonte: do Autor.

Nas Figuras 6.2 a 6.5 são apresentados os resultados obtidos com os compensadores CR1, CR2, *Knocker* e *Two-move*.

Na Figura 6.2 se observa um sobressinal muito menor que no caso com apenas o PID no degrau de 7 para 8. Quando a PV se encontra no valor de referencia de 8 se observa uma maior variabilidade, mas quando está no valor de 6 a PV apresenta um comportamento menos oscilatório. Pode-se observar que o sinal da MV possui uma variação muito maior que no caso apenas com o PID, o qual ocasiona um desgaste maior na válvula.



Figura 6.2 – Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de compensação CR1.

Fonte: do Autor.

O resultado obtido com o compensador CR2 se apresenta na Figura 6.3, na resposta pode-se observar um baixo sobressinal e um bom acompanhamento do sinal de referência.

Novamente a PV mostra uma maior variabilidade quando a referência do pH é de 8 e menor variabilidade quando é de 6. No começo do teste, a PV ainda não tinha se estabilizado, portanto se observa um pequeno sobressinal.



Figura 6.3 – Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de compensação CR2.



O resultado do teste com o método de compensação *Knocker* pode-se observar na Figura 6.4. O resultado apresenta variabilidade em todos os patamares, embora a amplitude da variação seja menor que as anteriores respostas obtidas.





Fonte: do Autor.

Como foi visto no *Capítulo 4, Compensação de atrito* o método *Two-move* tem seu próprio algoritmo interno de Desabilitação do Controle e os resultados mostram um índice de desgaste da válvula (Tabela 6.1) próximo aos valores com os outros compensadores.



Figura 6.5 – Resultado no modo servo com o controlador PID e o método de compensação Two-move.

Fonte: do Autor.

O sinal da variável manipulada em todos os casos se mantém perto de um valor nominal de 35%, contudo este valor varia por causa da vazão de saída do tanque que depende do nível do TBV, considerando que com um tanque cheio foi possível fazer dois testes no modo servo.

Os resultados são apresentados nas Figuras 6.6 a 6.9. Como se pode observar na Tabela 6.1, os métodos de compensação conseguem diminuir o índice ITAE em comparação com apenas o PID simples. Os valores calculados para cada compensador são muito próximos, no entanto o compensador *Two-move* obteve o menor índice ITAE, com um valor de 44116.

É evidente, tendo em conta o tempo de acomodação e a variabilidade das respostas, que a região com o pH 8 possui um ganho muito maior que a região com o pH 6, corroborando a análise do gráfico da derivada da curva de titulação realizado em (MARQUES, 2015). Pelo fato do ganho ser maior em 8 pH, o *slip-jump* tem um efeito mais acentuado na variável controlada, o que dificulta seu controle. Este comportamento se apresenta em todos os testes realizados, tanto para o modo servo como regulatório.

A próxima etapa dos testes será aplicar o algoritmo de desabilitação. O algoritmo de desabilitação do controle desativa o compensador e mantém uma saída do controlador PID constante, quando a derivada do erro permanece abaixo do 0,05 em uma escala de pH por mais de 10 segundos e que volta a atuar se o módulo do erro sai do intervalo do erro permitido por mais de 2 segundos. Este erro permitido ou erro aceitável foi calculado tendo em conta o erro de medição inserido na variável manipulada. Adicionalmente, estas condições são usadas para todos os testes, tanto para o *software* acadêmico como para o *software* industrial, em modo servo e regulatório.

Como era de se esperar, nas figuras com o algoritmo de desabilitação pode-se

apreciar que a PV possuem uma maior variabilidade em comparação com apenas o compensador. Igualmente, a MV com o algoritmo de desabilitação possui uma amplitude menor que sem o algoritmo.

Na Figura 6.6 pode-se ver a resposta do PID com e sem o desabilitador. Com o algoritmo de desabilitação a PV apresenta um maior sobressinal e um atraso puro de aproximadamente 30 segundos, em comparação com apenas o controlador PID. O sinal da MV com o algoritmo de desabilitação possui algumas partes que permanecem constante, estas são as partes onde o algoritmo atua.



Figura 6.6 – Resultado no modo servo com o controlador PID e o algoritmo de desabilitação do controle.

Fonte: do Autor.

A resposta do método de compensação CR1 com o algoritmo de desabilitação da Figura 6.7 também apresenta um atraso quando comparados com apenas o compensador. Isto pode-se verificar com os valores dos tempos de acomodação tanto para o degrau positivo como negativo na Tabela 6.1. Enquanto na MV é possível perceber que a variação com o algoritmo de desabilitação é bastante menor.

A resposta com o compensador CR2 junto com o algoritmo de desabilitação (Figura 6.8) apresentou bons resultados, obtendo tempos de acomodação positivos e negativos mais rápidos que com apenas o compensador (Tabela 6.1), no entanto, a resposta com o algoritmo de desabilitação apresentou uma variabilidade maior quando o valor de referência era de 7. Pode-se notar uma diferença no erro de regime permanente por causa da pressão na saída do TBV.

A Figura 6.9 mostra que os resultados obtidos com o compensador *Knocker* e o algoritmo de desabilitação, embora apresentem um sobressinal menor para o degrau positivo e negativo que com apenas o compensador *Knocker*, possuem uma variabilidade maior, como se pode constatar na Tabela 6.1.

Os índices de desempenho de todos os compensadores com e sem o método de

Figura 6.7 – Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador CR1 e o algoritmo de desabilitação do controle.



Fonte: do Autor.

Figura 6.8 – Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador CR2 e o algoritmo de desabilitação do controle.



Fonte: do Autor.

desabilitação são apresentados na Tabela 6.1. Nota-se um aumento do índice ITAE quando os compensadores trabalham junto com o algoritmo de desabilitação do controle, o que era esperado por causa do erro aceitável do algoritmo.

Também, com os métodos de compensação se conseguem tempos de acomodação menores, mas não é o mesmo compensador que consegue o menor tempo para o degrau positivo e para o negativo. O menor tempo com degrau positivo foi para o compensador CR2 com o algoritmo de desabilitação e para o degrau negativo foi o *Knocker* também com o desabilitador. Entretanto, o custo desta melhora é um aumento drástico na variabilidade da pressão no atuador, chegando a valores de até dez vezes os valores obtidos com apenas

Figura 6.9 – Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador *Knocker* e o algoritmo de desabilitação do controle.



Fonte: do Autor.

Tabela 6.1 – I	lndices de	desempenho	dos	ensaios	no	modo s	servo.

Método	ITAE	D_v	$t_{s \ 7-8}$	$t_{s\ 7-6}$	$t_s m$ édia	$M_{p \ 7-8}$	$M_{p\ 7-6}$	$M_p m \acute{e} dia$
PID	75.025	$96,\!85$	303	714	$508,\!50$	$0,\!27$	$0,\!38$	0,32
CR1	72.425	$1.238,\!60$	118	609	$363,\!50$	$0,\!16$	$0,\!44$	0,29
CR2	50.154	690,02	135	710	422,50	$0,\!10$	$0,\!30$	$0,\!20$
Knocker	46.148	667, 49	245	494	369,50	$0,\!23$	$0,\!34$	$0,\!28$
PID-DES	96.974	$97,\!45$	210	788	499,00	$0,\!21$	$0,\!58$	0,39
CR1-DES	72.361	$831,\!59$	204	661	432,50	$0,\!12$	$0,\!46$	$0,\!28$
CR2-DES	57.399	427,98	71	551	$311,\!00$	$0,\!10$	$0,\!30$	$0,\!20$
Knocker-DES	61.665	$453,\!51$	372	456	414,00	$0,\!14$	$0,\!29$	0,21
Two-move	44.116	$665,\!50$	268	474	$371,\!00$	$0,\!20$	$0,\!37$	$0,\!28$

Fonte: do Autor.

o controlador PID.

O índice de desgaste da válvula D_v aumenta bastante com os testes realizados com apenas os compensadores em comparação com os resultados com o algoritmo de desabilitação.

O compensador *Two-move* apresenta o melhor comportamento com o mais baixo índice ITAE, o menor D_v para os compensadores sem o algoritmo de desabilitação do controle, com a média de tempo de acomodação e de sobressinal razoáveis.

6.2.2 Ensaios no modo Regulatório

Para os ensaios no modo regulatório se mantém um *set-point* no pH de 7, mas foi adicionada à vazão do tanque primário de 41 l/h, uma vazão adicional provinda do tanque secundário de 41 l/h aos 2000 segundos de operação. Ambos os tanques possuem a mesma

concentração de ácido clorídrico e as vazões de ácido se mantiveram aproximadamente constantes em torno das esperadas durante todo o teste.

As Figuras 6.10 a 6.14 mostram os resultados obtidos com apenas o controlador PID e com os compensadores CR1, CR2, *Knocker* e *Two-move* com e sem o algoritmo de desabilitação. A sintonia do controlador PID usada no modo regulatório é a mesma usada no modo servo, com $k_c = 4,1$; Ti = 180 e Td = 3.

Na Figura 6.10 se nota uma diferença no desvio máximo de 0,271 do controlador PID com o algoritmo de desabilitação sobre apenas o controlador PID. Da mesma forma, o tempo de acomodação apresenta um resultado inferior no caso do controlador junto com o algoritmo de desabilitação com uma diferença de 159 segundos entre ambos. O sinal da MV do algoritmo de desabilitação possui uma amplitude maior que no caso sem o algoritmo, isto acontece pois o algoritmo de desabilitação de fato vai demorar mais para o controlador reagir após a PV sair do erro aceitável. Outra possível causa do desempenho inferior do controlador PID em conjunto com o algoritmo de desabilitação em comparação com apenas o controlador PID pode ser devido a que o algoritmo mantém constante o sinal de controle antes que a PV atinja o valor de *set-point*, portanto, a haste da válvula cessou seu movimento antes de atingir a posição ideal e o *slip-jump* impediu este erro de ser corrigido.

Figura 6.10 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o algoritmo de desabilitação do controle.



Na resposta do compensador CR1 com e sem o desabilitador (Figura 6.11), se nota uma diferença no desvio máximo de 0,147 e de 148 segundos entre o primeiro e o segundo. O tempo de acomodação do CR1 é o mais rápido dos testes em modo regulatório, como pode-se observar na Tabela 6.2. No entanto, o índice ITAE para o CR1 com o desabilitador apresenta um valor pior que aquele obtido com apenas o controlador PID.

Na Figura 6.12 se apresentam as respostas do CR2 com e sem desabilitador, o

Figura 6.11 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador CR1 e o algoritmo de desabilitação do controle.



Fonte: do Autor.

índice ITAE com valor de 372570 para o compensador sem o desabilitador do controle e o desvio máximo de 0,252 são os melhores resultados obtidos, como se mostra na Tabela 6.2. O resultado obtido para o CR2 com o desabilitador também apresenta bons resultados sendo o terceiro melhor índice ITAE, a discrepância no desvio máximo é de 0,167 e no tempo de acomodação de 24 segundos entre o CR2 e o CR2 com desabilitador.

Figura 6.12 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador CR2 e o algoritmo de desabilitação do controle.





As respostas do *Knocker* com e sem o algoritmo de desabilitação podem ser vistas na Figura 6.13. Novamente o resultado do *Knocker* com o desabilitador é levemente inferior ao logrado pelo *Knocker*, contudo o índice D_v é o menor, com o valor de 140,77 para o compensador e desabilitador (Tabela 6.2).

Figura 6.13 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador *Knocker* e o algoritmo de desabilitação do controle.



Fonte: do Autor.

Na Figura 6.14 se mostra a resposta do compensador *Two-move*. Apesar dele ter o segundo maior desvio máximo e um dos maiores tempos de acomodação, possui o segundo melhor índice ITAE com o valor de 410690 e o menor índice D_v de 390,59 quando se usam compensadores sem o algoritmo de desabilitação, como se pode conferir na Tabela 6.2.

Figura 6.14 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o compensador Two-move.



Fonte: do Autor.

Para os testes em modo regulatório o algoritmo de desabilitação do controle atua com maior frequência que nos testes em modo servo como é possível observar no sinal de controle, isto acontece devido a que o *set-point* é mantido constante.

Tendo em conta os resultados da Tabela 6.2, se verifica que todos os compensadores apresentam resultados satisfatórios e bastante próximos no índice ITAE. Os resultados

Método	ITAE	D_v	Tempo de	Desvio		
			acomodação (seg)	Máximo		
PID	498.170	89,28	348	0,446		
CR1	482.980	$752,\!41$	325	$0,\!615$		
CR2	372.570	$453,\!31$	336	0,252		
Knocker	460.650	$391,\!49$	472	0,361		
PID-DES	643.070	$48,\!35$	507	0,717		
CR1-DES	503.660	406,39	473	0,468		
CR2-DES	424.140	142, 18	360	0,419		
Knocker-DES	480.050	140,77	394	0,422		
Two-move	410.690	390, 59	401	$0,\!645$		
Fonte: do Autor.						

Tabela 6.2 – Índices de desempenho dos ensaios no modo regulatório com o *software* Acadêmico.

conseguidos são os esperados em relação ao uso do algoritmo de desabilitação, ou seja, aumentaram o índice ITAE mas diminuiram em o índice de desgaste da válvula D_v .

O compensador CR2 obteve o melhor resultado com o menor valor do ITAE, o menor desvio máximo e o segundo menor tempo de acomodação.

6.3 Ensaio com Software Industrial

Com o fim de testar os métodos de compensação em condições próximas a um ambiente industrial, eles são programados no SDCD 800xA da ABB[®]. A programação dos métodos de compensação e controle foi feita usando os blocos do sistema supervisório, visando ser o mais fiel possível a uma implementação real.

No momento da implementação as condições dos parâmetros de atrito mudaram com respeito aos testes feitos com o *software* acadêmico. Enquanto o parâmetro J permaneceu constante, o parâmetro S mudou de 12,28% para 6%, portanto os resultados entre ambos os testes são diferentes. No entanto, por causa dessa variação, é possível verificar a eficácia dos compensadores para valores altos e baixos de atrito em uma válvula de controle. Um possível motivo desta mudança são as condições de trabalho da planta, com uma solução limpa sem fragmentos que possam grudar nos componentes internos da válvula e uma alta movimentação pela quantidade de testes feitos na válvula de controle que podem estragar as gaxetas, mas por causa da baixa pressão nas tubulações não acontecem vaziamentos da solução básica. A sintonia do PID é a mesma usada nos ensaios anteriores e os intervalos de execução do compensador e do PID são de 3 e 1 segundos, respectivamente.

6.3.1 Ensaios no Modo Servo

Os ensaios no modo servo foram realizados com as mesmas especificações do teste no *software* acadêmico. Isto é, variando o *set-point* em uma sequência de degraus, mudando de 7 para 8, de 8 para 7 e de 7 para 6, aos 1800, 3600 e 5400 segundos de operação, respectivamente. Neste caso, a vazão de ácido se mantém constante em 41 l/h. No início do teste se tenta partir de valores do ponto de operação, no caso do nível de 75% do nível total do tanque reator e para o pH de 7.

Nas Figuras 6.15 a 6.19 se apresentam os gráficos com os resultados dos testes em modo servo apenas do controlador PID, os compensadores CR1, CR2, *Knocker* e *Two-move* com e sem desabilitador. Novamente a resposta do pH apenas com o controlador PID apresenta uma resposta com uma alta variabilidade e um alto índice ITAE de 85963 (Tabela 6.3) que diminui quando são testados os compensadores.

Na Figura 6.15 se exibe a resposta do controlador PID com e sem o algoritmo de desabilitação. A resposta com o algoritmo de desabilitação tem um atraso com respeito a apenas o controlador de 45 segundos aproximadamente e um maior sobressinal, tanto para o degrau positivo como negativo. Novamente, o resultado da implementação do desabilitador apresenta um menor valor do índice D_v e um maior índice ITAE.



Figura 6.15 – Resultado no modo servo com o controlador PID e o algoritmo de desabilitação do controle.

Fonte: do Autor.

O resultado com o compensador CR1 com e sem o algoritmo de desabilitação se exibe na Figura 6.16. O resultado com apenas o CR1 é bastante satisfatório, obtendo o segundo melhor índice ITAE com um valor de 36500 e igualmente o segundo tempo de acomodação mais rápido dos compensadores testados nestas condições, com um valor médio de 272,5 segundos (Tabela 6.3). O resultado obtido do CR1 com o algoritmo do desabilitador tem um índice ITAE de quase o dobro, com apenas uma pequena diminuição no índice de desgaste da válvula D_v .



Figura 6.16 – Resultado no modo servo com o controlador PID, o compensador CR1 e o algoritmo de desabilitação do controle.

Fonte: do Autor.

A resposta obtida com o compensador CR2 foi bastante satisfatória, obtendo o melhor índice ITAE com um valor de 22873, o tempo de acomodação médio mais rápido com 234 segundos e o menor sobressinal médio com 0,27, como se pode constatar na Tabela 6.3. Na Figura 6.17 pode-se observar a resposta do compensador CR2 com e sem o algoritmo de desabilitação, o resultado obtido com o desabilitador de 70412 é mais de três vezes maior que com apenas o compensador no índice ITAE, contudo o índice de desgaste da válvula D_v foi o menor obtido com a implementação de um compensador.





Fonte: do Autor.

O desempenho obtido com o compensador *Knocker* não foi muito bom, dos resultados obtidos com os compensadores sem o algoritmo de desabilitação ele apresenta o pior índice ITAE de 46811 e o maior tempo de acomodação médio com 453 segundos no mesmo caso. O compensador *Knocker* junto com o algoritmo de desabilitação melhorou um pouco o índice de desgaste da válvula D_v , mas piorou o desempenhos dos outros índices, como se pode observar na Tabela 6.3.



Figura 6.18 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador *Knocker* e o algoritmo de desabilitação do controle.

Fonte: do Autor.

Na Figura 6.19 se mostra o resultado do teste realizado com o compensador Two-move. Os resultados têm baixa variabilidade para um valor de pH de 7 e 6, mas se percebe maior variabilidade quando o valor de referência do pH é de 8. Além disso, o valor médio do sobressinal foi o segundo menor com um valor de 0,29, como se pode constatar na Tabela 6.3.



Figura 6.19 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o compensador Two-move.

Fonte: do Autor.
Método	ITAE	D_v	$t_{s \ 7-8}$	$t_{s \ 7-6}$	$t_s m \acute{e} dia$	$M_{p \ 7-8}$	$M_{p \ 7-6}$	$M_p m \acute{e} dia$
PID	85.963	$107,\!50$	242	497	369,5	$0,\!354$	$0,\!452$	$0,\!40$
CR1	36.500	520,70	96	449	272,5	$0,\!4962$	0,1623	$0,\!33$
CR2	22.873	$311,\!95$	95	373	234	$0,\!4226$	0,1186	$0,\!27$
Knocker	46.811	$249,\!61$	303	603	453	0,3439	$0,\!3207$	$0,\!33$
PID-DES	92.674	$76,\!38$	420	562	491	0,5652	0,5089	$0,\!53$
CR1-DES	67.597	510,70	93	542	317,5	0,532	0,163	$0,\!34$
CR2-DES	70.412	$144,\!01$	155	577	366	$0,\!5541$	$0,\!1944$	$0,\!37$
Knocker-DES	69.224	$241,\!55$	177	460	318,5	$0,\!4845$	$0,\!3314$	$0,\!40$
Two-move	44.078	$396,\!48$	128	664	396	0,126	0,4644	$0,\!29$

Tabela 6.3 – Índices de desempenho dos ensaios em modo servo.

Fonte: do Autor.

Na Tabela 6.3 podem-se observar os índices de cada um dos compensadores com e sem o algoritmo de desabilitação do controle. Os resultados são melhores que os obtidos nos testes com o *software* acadêmico o que era esperado, uma vez que o atrito estático diminuiu (parâmetro S) e portanto o esforço para vencê-lo é menor.

Os parâmetros do algoritmo de desabilitação do controle são iguais aos usados no ensaio servo com o *software* acadêmico, com um erro aceitável de 0,05 na escala de pH com 10 segundos para ativar o algoritmo quando a derivada do erro é menor que o intervalo aceitável e 2 segundos para desativar o algoritmo quando o módulo do erro sai do intervalo de erro permitido. Como era de se esperar, quando se aplica o algoritmo de desabilitação do controle o índice ITAE aumenta, mas diminui o índice de desgaste da válvula D_v . Portanto, poderia se pensar que é possível diminuir o erro aceitável ou as condições de tempo para habilitar o algoritmo, visando obter uma melhor resposta.

O pior desempenho continua sendo com a configuração controlador PID mais o algoritmo de desabilitação. O sinal da variável manipulada é menor que nos testes feitos com o *software* acadêmico, por causa do menor valor de atrito, que precisa uma movimentação menor para conseguir superá-lo. O compensador com melhor desempenho foi o CR2 com os melhores índices de tempo de acomodação, sobressinal máximo e menor índice ITAE.

6.3.2 Ensaios no Modo Regulatório

Para os ensaios no modo regulatório com o *software* industrial, foram usadas as mesmas especificações que com o *software* acadêmico, isto é, mantendo o *set-point* em um pH de 7, onde é inserida uma vazão do tanque primário de 41 l/h e uma vazão adicional provinda do tanque secundário de 41 l/h aos 2000 segundos de operação. Ambos os tanques possuem a mesma concentração de ácido clorídrico e as vazões de ácido se mantiveram aproximadamente constantes em torno das esperadas durante todo o teste. No início do teste se tenta partir de valores do ponto de operação, no caso do nível 75% do nível total do tanque reator e para o pH 7. A sintonia do controlador PID usada no modo regulatório é a mesma que a usada com o *software* acadêmico.

As Figuras 6.21 a 6.25 mostram os resultados obtidos com apenas o controlador PID e com os compensadores CR1, CR2, *Knocker* com e sem o algoritmo de desabilitação do controle, e com o compensador *Two-move*.

Na Figura 6.21 se apresentam os resultados do controlador PID com e sem o algoritmo de desabilitação. Neste caso, o resultado obtido com o desabilitador apresenta um melhor índice ITAE de 410370 (Tabela 6.4) e um desvio máximo de menos da metade do apresentado com apenas o controlador PID. A MV apenas do controlador apresenta uma maior amplitude, possivelmente por causa de uma menor vazão do TBV.

Para verificar que de fato a variação do nível no TBV afeta a vazão de base, foi realizado um teste esvaziando o TBV com uma abertura fixa de 100% e 80% na válvula de controle. Na Figura 6.20 se verifica que quando diminui o nível do TBV, também diminui a vazão de base, portanto a válvula de controle tem que abrir mais para manter uma vazão constante de base.





Fonte: do Autor.

A resposta com o compensador CR1 com e sem o algoritmo de desabilitação pode-se apreciar na Figura 6.22. Mais uma vez a resposta com o desabilitador apresenta maior



Figura 6.21 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o algoritmo de desabilitação do controle.

Fonte: do Autor.

variabilidade e, portanto, um maior índice ITAE de 417060 em comparação com apenas o CR1 de 241450 como se pode constatar na Tabela 6.4. O tempo de acomodação do CR1 é o menor dos testes realizados com um valor de 225 segundos.

Figura 6.22 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador CR1 e o algoritmo de desabilitação do controle.





A resposta do compensador CR2 obteve o melhor índice ITAE com um valor de 226550 (Tabela 6.4), porém não obteve bons resultados para o tempo de acomodação e o desvio máximo. O algoritmo de desabilitação junto com o compensador CR2, como se esperava, piorou o índice ITAE e melhorou o D_v , em contrapartida o desvio máximo diminuiu e o tempo de acomodação aumentou com o desabilitador. Na Figura 6.23 pode-se observar a variabilidade da resposta do CR2 com o desabilitador em contrapartida com apenas o CR2.

Figura 6.23 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador CR2 e o algoritmo de desabilitação do controle.



Fonte: do Autor.

A resposta obtida com o compensador *Knocker* obteve o segundo melhor índice ITAE com um valor de 237410 (Tabela 6.4) e o menor desvio máximo com 0,254. Neste caso, o algoritmo de desabilitação diminuiu o tempo de acomodação e aumentou o valor do desvio máximo em comparação com apenas o compensador *Knocker* (Figura 6.24).

Figura 6.24 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID, o compensador *Knocker* e o algoritmo de desabilitação do controle.





Na Figura 6.25 se vê a resposta do compensador Two-move. Ele apresentou o pior índice ITAE com um valor de 279670 e o melhor índice de desgaste da válvula de 227,14 de todos os compensadores sem algoritmo de desabilitação.

A resposta dos compensadores em conjunto com o algoritmo de desabilitação do



Figura 6.25 – Resultado no modo regulatório com o controlador PID e o compensador Two-move.

Fonte: do Autor.

Tabela 6.4 – Índices de desempenho dos ensaios em modo regulatório.

Método	ITAE	D_{n}	Tempo de	Desvio
		U	acomodação (seg)	Máximo
PID	563.940	55,28	462	0,853
CR1	241.450	306, 38	225	0,343
CR2	226.550	243,11	327	0,367
Knocker	237.410	261, 49	480	0,254
PID-DES	410.370	$35,\!68$	283	0,401
CR1-DES	417.060	96,47	412	0,322
CR2-DES	363.460	183,93	316	0,327
Knocker-DES	327.670	138,82	276	0,364
Two-move	279.670	227,14	337	0,305

Fonte: do Autor.

controlador mostrou a PV variando entre o valor do erro permitido pelo algoritmo, nestes casos a variável de processo não conseguiu estabilizar por causa da alta não-linearidade inerente do pH naquele ponto de operação. O esforço de controle em todos os caso nunca ultrapassou os pontos de saturação em nenhum dos resultados.

Na Tabela 6.4 mostram-se os resultados dos indicadores dos testes feitos. Tal como o resultado dos testes em modo regulatório com o *software* acadêmico, os compensadores CR1 e CR2 apresentaram os melhores resultados com o menor índice ITAE, com valores 226550 e 241450 respectivamente, no entanto o compensador CR2 obteve um indicador D_v muito menor de 243,11 que o CR1 de 306,38.

Novamente os resultados obtidos com o algoritmo de desabilitação aumentaram o índice ITAE e diminuíram o D_v , no entanto com o algoritmo de desabilitação neste caso o índice ITAE aumentou quase o dobro, mas o índice de desgaste da válvula não

diminuiu nessa mesma proporção. Todos os compensadores apresentam um índice de desvio máximo menor que com apenas o controlador PID. O compensador CR2 com o algoritmo de desabilitação teve um menor desvio máximo, permitindo observar que este índice nem sempre se encontra presente junto com a resposta que possui o menor índice ITAE. Igualmente, comparando os três compensadores com e sem o algoritmo de desabilitação, se concluiu que não existe uma correlação entre usar o desabilitador e os resultados dos indicadores de tempo de acomodação e desvio máximo.

Consegue-se apreciar que o sinal da variável manipulada no compensador Two-move oscilou bastante, isto aconteceu por causa do pequeno valor de J. Se ele fosse maior, o valor escolhido de BOP poderia ser maior e, portanto a faixa na qual se desativa a ação do compensador também aumentaria.

6.4 Ensaio de Robustez dos Compensadores

Nesta seção se apresentam os ensaios de robustez dos compensadores CR1, CR2, Two-move e *Knocker* com e sem o algoritmo de desabilitação do controle. A robustez dos compensadores é testada usando 3% para o valor do parâmetro S, isto é, a metade do S real (6%) que foi calculado com a curva de assinatura, lembrando que este parâmetro mudou de 12,28% para 6%, desde que foram realizados os testes com o *software* acadêmico até que se realizaram os testes com o *software* industrial. Este experimento foi realizado para provar o caso em que aumente o atrito na válvula no tempo e o parâmetro S dos compensadores seja mantido no mesmo valor. Para este ensaio foram utilizadas as mesmas configurações dos testes em modo regulatório com o *software* industrial (800xA da ABB[®]).

Nas Figuras 6.26 a 6.29 se apresentam os resultados obtidos nos testes com o valor do parâmetro S mudado. As respostas usando apenas os compensadores possuem uma variabilidade quase inexistente antes da perturbação com a entrada de ácido do tanque secundário ao processo. Após a perturbação, as respostas apresentam desvio máximo muito maior que nas respostas em modo regulatório com o valor de S igual a 6% e um sobressinal quando o pH tenta retomar o valor do *set-point*. Nenhum destes consegue estabilizar a resposta no tempo do teste ou pelo menos ter uma variabilidade dentro das faixas de aceitação do ruído de medição (\pm 0,3 pH).

Diferentemente dos resultados dos testes anteriormente mostrados, neste caso as melhores respostas são obtidas com o algoritmo de desabilitação do controle. Nesta configuração, como o algoritmo mantém constante a saída da variável manipulada quando esta fica dentro da faixa de erro aceitável, a saída da MV fica constante ainda antes da variável de processo chegar ao valor do *set-point*, portanto não acontece o desvio máximo além do *set-point* com a mesma magnitude que nos testes sem o algoritmo de desabilitação.

Na Tabela 6.5 se apresentam os valores dos indicadores de cada um dos compen-

Figura 6.26 – Resultado no modo regulatório com o compensador CR1 com S=3%.



Fonte: do Autor.

Figura 6.27 – Resultado no modo regulatório com o compensador CR2 com S = 3%.



Fonte: do Autor.

sadores com e sem o algoritmo de desabilitação do controle. O compensador Knocker apresentou o melhor índice ITAE com o algoritmo de desabilitação. No entanto, nenhum dos compensadores conseguiu obter uma melhor resposta que o PID com o algoritmo de desabilitação com o S = 6%.

Os resultados dos testes regulatórios com o menor valor de S de 3% apresentaram um desempenho inferior em comparação com os testes feitos com o valor de S de 6%. Este comportamento pode-se explicar pelo fato de que o sinal do compensador é menor e, portanto, a resposta da válvula vai ser mais lenta.

Quanto aos índices de tempo de acomodação e desvio máximo, mais uma vez os melhores índices de cada caso não acompanharam a resposta com o menor ITAE.



Figura 6.28 – Resultado no modo regulatório com o compensador Knocker com S=3%.

Fonte: do Autor.

Figura 6.29 – Resultado no modo regulatório com o compensador Two-move com S=3%.



Fonte: do Autor.

Tabela6.5– Índices de desempenho dos ensaios de robustez.

Método	ITAE	D_v	Tempo de	Desvio		
			acomodação (seg)	Máximo		
PID-DES $(S = 6\%)$	410.370	35,68	283	0,401		
CR1	921.970	$56,\!28$	585	$0,\!48$		
CR2	968.910	$49,\!11$	568	0,56		
Knocker	943.030	$48,\!35$	644	0,72		
CR1-DES	737.900	$64,\!99$	760	0,70		
CR2-DES	766.430	$49,\!44$	786	0,86		
Knocker-DES	417.890	$46,\!37$	483	$0,\!35$		
Two-move	1.328.300	$56,\!09$	479	$0,\!89$		
Fonte: do Autor.						

7 Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

As conclusões finais deste trabalho são apresentadas neste capítulo, complementando as discussões e análises realizadas ao longo dos capítulos referentes ao desenvolvimento desta pesquisa. Adicionalmente, são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

Os métodos de compensação CR1 e CR2 foram implementados de uma maneira imediata, tanto no *software* acadêmico como no SDCD. Os métodos *Knocker*, *Two-move* e desabilitação do controle, embora tendo sido um pouco mais complexos que os CRs, não precisaram de blocos especiais ou uma alta capacidade de computação.

A fim de comparar as respostas obtidas com os compensadores deve ser levado em conta que existem diferentes fatores que afetam o desempenho de cada compensador, como a concentração das soluções ou o tempo em que começa o teste depois que as soluções de ácido e base foram preparadas. Igualmente, a pressão e o nível no tanque de base pressurizado afetam a vazão de saída, portanto, quanto maior for a pressão de saída menor é a abertura da válvula de controle. Contudo, o processo de neutralização de pH mesmo sendo não-linear, pode ser controlado com um controlador linear e obter um resultado satisfatório, caso as condições de operação da planta não variem significativamente.

Os métodos de compensação CR1, CR2, *Two-move* e *Knocker* conseguem diminuir a variabilidade no controle de pH, porém aumentam a variabilidade do sinal de controle e, por conseguinte, aumentam o desgaste da válvula, aumentando os custos de manutenção. O algoritmo de desabilitação do controle junto com os compensadores também consegue diminuir a variabilidade da variável manipulada superando a desvantagem do desgaste da válvula. No entanto, na maioria dos casos observados nos testes, o índice ITAE aumentava quando se utilizava o algoritmo de desabilitação.

O comportamento do algoritmo de desabilitação do controle nos casos em que o sistema tivesse perturbações constantes ou contínuas mudanças no *set-point* é nulo, pois não se cumprem as condições para ativar o algoritmo. Segundo os resultados observados nos ensaios de Robustez dos compensadores, se não se tem certeza do parâmetro S o uso do algoritmo de desabilitação pode ajudar a diminuir o desvio máximo e a variabilidade que com apenas o compensador.

O compensador *Two-move* modificado (ELY; LONGHI, 2011), possui seu próprio algoritmo de desabilitação. Os resultados com este compensador foram melhores que os

outros métodos de compensação em conjunto com o algoritmo de desabilitação.

As respostas obtidas com o software acadêmico apresentam melhores resultados com os compensadores Knocker e Two-move no modo servo e CR2 e Two-move no modo regulatório. Para o caso com o software industrial se apresentam melhores resultados com os compensadores CR2 e CR1 no modo servo e CR2 e Knocker no modo regulatório. Existe uma alta influência da sintonia do PID, portanto, para obter um resultado satisfatório da variável de processo quando são implementados os métodos de compensação, precisa-se de uma sintonia do PID específica para cada um dos compensadores, uma vez feita a escolha do compensador o PID poderia ser sintonizada novamente com o compensador presente. Embora os compensadores Knocker, CR1 e CR2 utilizem apenas o parâmetro S no modelo, as respostas obtidas com os estes compensadores foram satisfatórias por causa do pequeno valor de J em comparação com o S.

Os resultados obtidos com os dois tipos de *software* indicam que os métodos de compensação de atrito conseguem diminuir a variabilidade para diferentes valores do parâmetro S.

Igualmente, os resultados obtidos mostram que um compensador com o melhor índice ITAE não necessariamente tem o melhor tempo de subida e sobressinal no modo servo, e tempo de acomodação e desvio máximo no modo regulatório. Portanto, pode-se concluir que não existe um método de compensação que supere todos os outros em todos os aspectos. Por conseguinte, partindo de um ponto de trabalho e das condições da válvula de controle, a questão não é mais selecionar qual algoritmo de compensação é o melhor, mas sim escolher aquele que é mais adequado para a aplicação e que forneça os melhores resultados para o conjunto de índices de avaliação usados. Contudo os resultados obtidos em todas os ensaios realizados com o compensador CR2 apresentaram bons índices ITAE e este compensador é de facil implementação.

Os resultados obtidos em modo regulatório com a válvula de controle são bastante satisfatórios em comparação com os melhores resultados obtidos no Apêndice B com os métodos de controle do trabalho de (ROMANUS; GIOVANINNI, 2014) com a bomba dosadora. Isto pode-se explicar por que a válvula de controle possui um tempo de resposta mais rápido que a bomba dosadora.

No caso em que a sintonia do PID seja agressiva, quando o controlador trabalhe em conjunto com os métodos de compensação, a resposta que vai se obter terá uma maior variabilidade, portanto precisa-se que a sintonia calculada para o PID seja suave. No entanto, se é feito o teste apenas com o controlador PID com uma sintonia suave, os resultados não serão bons, pois a haste se movimenta mais lentamente, ocasionando paradas antes de atingir a posição desejada.

O trabalho de pesquisa desenvolvida apresenta bons resultados com grande interesse prático e de fácil implementação na industria.

7.2 Propostas de Trabalhos Futuros

A seguir são mencionadas algumas propostas para trabalhos futuros na Planta Piloto de Neutralização de pH.

- Dado que a Planta Piloto possui dois elementos finais de controle, a válvula que controla a vazão de base do TBV e a bomba dosadora que controla a vazão de base do TBB, é possível pensar em usar os dois atuadores para neutralizar o pH no caso que se opere a planta com uma perturbação de solução ácida com concentrações maiores no mesmo.
- Testar na válvula de controle diferentes técnicas de controle como *feedforward*, preditivo, PID2DOF com pré-alimentação, que já foram testadas no atuador linear (bomba dosadora) e observar qual delas apresenta o melhor comportamento.
- Realizar testes na planta de pH usando água destilada ao invés de filtrada para a solução de base no tanque TBV e verificar como isto afeta as respostas da neutralização da solução ácida.
- Realizar uma identificação de sistemas não linear da Planta Piloto com a válvula de controle como elemento final e implementar um controlador do tipo não linear, com o fim de comparar o desempenho.
- Realizar um estudo comparando os resultados obtidos neste trabalho com os resultados dos mesmos algoritmos implementados com o posicionador digital da válvula de controle.
- Encontrar a relação ótima entre a sintonia do controlador PID e o compensador usado, visando obter os melhores índices de desempenho.
- Melhorar a malha de controle de pressão no TBV visando manter uma vazão constante de base para aperturas constantes da válvula de controle.
- Agregar ao modelo do sistema da Planta Piloto de Neutralização de pH realizado no trabalho de (MARQUES, 2015) a válvula de controle, para realizar diversos testes simulados antes de realizar os experimentos na Planta Piloto. Isto economizaria reagentes e tempo, uma vez que as constantes de tempo da Planta são da ordem de alguns minutos.
- Encontrar os valores limites $(\delta 1, \delta 2)$ e os tempos de ativação e desativação do algoritmo de desabilitação que consigam diminuir o índice de desgaste D_v e manter uma resposta satisfatória da variável de processo.

Referências Bibliográficas

ALVARADO, C. S. M. Identificação e controle preditivo de uma planta-piloto de neutralização de pH. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Advanced PID control. 2. ed. [S.l.]: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society; Research Triangle Park, NC 27709, 2006.

BAEZA, J. R. Controle não linear aplicado a malhas de controle com válvulas de alto atrito. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

CHOUDHURY, M. S.; JAIN, M.; SHAH, S. L. Stiction-definition, modelling, detection and quantification. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 18, n. 3, p. 232–243, 2008.

CHOUDHURY, M. S.; SHAH, S. L.; THORNHILL, N. F. Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics. *Automatica*, Elsevier, v. 40, n. 10, p. 1719–1728, 2004.

CUADROS, M. A. d. S. L. *Quantificação e compensação de atrito em válvulas de controle pneumáticas.* Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

ELY, V. E.; LONGHI, L. G. S. Desenvolvimento e implementação de um compensador de agarramento para válvulas de controle. In: 15° Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação. [S.l.: s.n.], 2011. p. 14–17.

FAVARO, J. Controle preditivo aplicado à planta piloto de neutralização de pH. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

FISHER, F. C. I. Control valve handbook. 4. ed. 2005.

GARCIA, C. Comparison of friction models applied to a control valve. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 16, n. 10, p. 1231–1243, 2008.

HÄGGLUND, T. A friction compensator for pneumatic control valves. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 12, n. 8, p. 897–904, 2002.

HÄGGLUND, T. Automatic on-line estimation of backlash in control loops. *Journal of Process Control*, Elsevier, v. 17, n. 6, p. 489–499, 2007.

ISA. NORMA ANSI/ISA-75.25.01 Test Procedures for Control Valve Response Measurement from Step Inputs. 2000.

IVAN, L. Z. X.; LAKSHMINARAYANAN, S. A new unified approach to valve stiction quantification and compensation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 48, n. 7, p. 3474–3483, 2009.

JULIANI, R. C. G. Adequação de Planta Piloto de Neutralização de pH a Plataforma de Pesquisa e Desenvolvimento. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

KANO, M.; MARUTA, H.; KUGEMOTO, H.; SHIMIZU, K. Practical model and detection algorithm for valve stiction. In: *IFAC symposium on dynamics and control of process systems*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 5–7.

MADURO, P. A. P. Estudo de variabilidade causada por válvula de controle em planta de neutralização de pH. Trabalho de Conclusão (MBA) Curso de especialização do PECE da USP, 2011.

MARQUES, F. G. Modelagem Fenomenológica de uma Planta Piloto de neutralização de *pH.* Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

MOHAMMAD, M. A.; HUANG, B. Compensation of control valve stiction through controller tuning. *Journal of Process control*, Elsevier, v. 22, n. 9, p. 1800–1819, 2012.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2003.

ROMANO, R. A. Identificação de processos não-lineares e quantificação de atrito em válvulas de controle. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.

ROMANO, R. A.; GARCIA, C. Karnopp friction model identification for a real control valve. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 14906–14911.

ROMANUS, E. E.; GIOVANINNI, R. V. Estudo, Implementação e Testes de Diferentes Algoritmos de Controle Aplicados a Uma Planta de Neutralização de pH. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

SHINSKEY, F. G. *Process control systems: application, design and tuning.* 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1990.

SILVA, B. C. Avaliação da eficiência de compensadores de atrito aplicados a válvulas de controle. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Stiction compensation in process control loops: A framework for integrating stiction measure and compensation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 44, n. 24, p. 9164–9174, 2005.

SRINIVASAN, R.; RENGASWAMY, R. Approaches for efficient stiction compensation in process control valves. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 218–229, 2008.

UEHARA, D.; ROMANO, R. A.; GARCIA, C. Comparação e equivalência dos modelos de atrito de kano e karnopp aplicados a válvulas de controle. In: *Anais do 17th Congresso Brasileiro de Automatica*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 14–17.

Apêndices

APÊNDICE A – Supervisório e Blocos de Programação

A.1 Supervisório

A.1.1 Modificações feitas no Supervisório

A tela da interface homem-máquina (IHM) que se vê na Figura A.1 foi modificada. De uma primeira versão que se tinha, foram adicionados os blocos dos controladores da bomba dosadora e da válvula de controle. Além disso, foram adicionados os indicadores de nível e pressão do TBV e de posição na válvula de controle e três botões com as tendências dos compensadores, o nível do tanque reator e a PV e o *set-point* do pH. Também foram inseridas animações de nível e pressão no TBV, no nível máximo do TAS e o TAP e no motor agitador do tanque reator. Finalmente, foi adicionado o botão "Compensadores" para escolher o tipo de compensador e inserir os parâmetros que eles precisam.

Figura A.1 – Tela do supervisório do processo de Neutralização de pH.



Fonte: do Autor.

A.1.2 Operação no modo Servo

Para realizar os testes na Planta Piloto de Neutralização de pH se tem que verificar que a quantidade de soluções de ácido e base sejam suficientes para o teste. Tem se que verificar que sejam ligados:

- A válvula FV 35 para conferir a vazão constante de ácido do TAPI, caso em que os testes sejam feitos com ácido do TAP.
- A válvula FV 36 para conferir a vazão constante de ácido do TASI, caso em que os testes sejam feitos com ácido do TAS.
- A válvula FV 64 para pressurizar o TBV.
- O motor MZ81 para a mistura das soluções no TR.

Para regular a malha de nível, precisa-se ajustar o *set-point* e mudar para o modo automático a malha de controle de nível, para que a malha opere com o algoritmo PID programado no SDCD. Igualmente, tem que se mudar para o modo automático uma das duas válvulas solenoide de saída do TR (LV 16A ou LV 16B), como pode-se observar na Figura A.2.

Figura A.2 – Bloco de controle da malha de nível (esquerda)e bloco de controle da válvula solenoide de saída (direita).



Fonte: do Autor.

Antes de colocar a malha de pH a em modo automático recomenda-se aplicar um valor de saída no controlador de pH em modo manual de 35%, que é o valor nominal para a vazão de ácido. Alem disso, tem que trocar o *set-point* para modo externo. Feito o anterior, se procede a ligar o tipo de compensador após ter condições nominais de trabalho, ligar o *set-point SERVO* (Figura A.3).

Figura A.3 – Bloco de controle da malha de pH (esquerda) e bloco de compensadores (direita).



Fonte: do Autor.

A.2 Blocos de Programação

Apesar de usar todos os blocos e ferramentas já prontas no software Control Builder da ABB, foi necessário criar uma biblioteca própria, programando o código de cada um dos algoritmos de compensação e o algoritmo de desabilitação. Nas figuras A.4 a A.6 se apresentam os diagramas gerais dos blocos dos algoritmos de compensação, de desabilitação e do controlador PID. Na Figura A.4 de acima para baixo se mostra a saída do erro, o bloco do *set-point* para o modo servo, o bloco do controlador PID e a saída que vai para o conversor I/P da válvula de controle. Pode-se observar que a saída total é a soma da saída do controlador com a saída do compensador.

Na Figura A.5 se têm os compensadores implementados, cada um com os algoritmos programados dentro de cada bloco.

Por fim, na Figura A.6 se tem o bloco do algoritmo de desabilitação tanto do compensador *Two-move* como do algoritmo de desabilitação de (CUADROS, 2011). Na parte inferior se tem o sinal de posição da válvula de controle que é usada para obter o parâmetro de desgaste da válvula.

Figura A.4 – Bloco do PID e saída para a válvula de controle.



Fonte: do Autor.



Figura A.5 – Bloco dos algoritmos de compensação de atrito.

Fonte: do Autor.



Figura A.6 – Bloco do algoritmo de desabilitação.

Fonte: do Autor.

APÊNDICE B – Resultados com o atuador linear

Como foi descrito anteriormente, a Planta Piloto de Neutralização de pH possui duas formas de operação, a primeira com a válvula de controle e a segunda com a bomba dosadora. Esta última tem um comportamento linear, que permite um controle mais fácil do pH. Com o fim de realizar uma comparação na mesma planta com o dito atuador linear para o modo regulatório, foram usadas as sintonias escolhidas para a bomba dosadora do trabalho de formatura de (ROMANUS; GIOVANINNI, 2014). As condições dos testes neste caso foram as mesmas que no ensaio regulatório com o *software* industrial, isto é, mantendo o *set-point* em um pH de 7, onde é inserida uma vazão do tanque primário de 41 l/h e uma vazão adicional provinda do tanque secundário de 41 l/h aos 2000 segundos de operação, ambos os tanques com a mesma concentração de ácido clorídrico. No início do teste se tenta partir de valores do ponto de operação, no caso do nível 75% do nível total do tanque reator e para o pH 7.

Nas Figuras B.1 a B.4 se observam as resposta do pH usando a bomba dosadora como atuador. Na resposta obtida com o controlador PI na Figura B.1 pode-se observar um desvio máximo e um tempo de acomodação de 1,176 e 714 segundos, respectivamente. Ambos os valores são bastante consideráveis em comparação com os resultados obtidos com o compensador CR2 na Tabela B.1.



Figura B.1 – Resultado no modo regulatório com o Controlador PI.

Fonte: do Autor.

Na Figura B.2 se mostra a resposta com o controlador PID para o atuador linear. Os índices obtidos neste caso são muito próximos aos conseguidos com o controlador PI. Novamente, os índices de tempo de acomodação, desvio máximo e ITAE (Tabela B.1) são piores que os obtidos com o compensador CR2 implementado na válvula de controle.





Na Figura B.3 se observa a resposta do controlador PID2DOF, que neste caso consegue superar unicamente o índice de desvio máximo com um valor de 0,3451 ao compensador CR2, que obteve um valor de 0,367.

Figura B.3 – Resultado no modo regulatório com o Controlador PID2DOF.



Fonte: do Autor.

Finalmente, na Figura B.4 se observam os resultados com o controlador Feedforward junto com o PID, o qual tem um índice de desvio máximo negativo, devido ao comportamento do controlador que adianta o aumento da vazão de base para evitar a queda do pH. Portanto, seu desvio máximo é positivo.



Figura B.4 – Resultado no modo regulatório com o Controlador PID mais o *Feedforward*.

Fonte: do Autor.

Na Tabela B.1 são apresentados os resultados obtidos como atuador linear. Os melhores indicadores com o atuador linear foram obtidos com o controlador PID2DOF com índice ITAE de 528940, que é muito maior que no caso do compensador CR2 na válvula de controle, que obteve um valor de 226550.

Os únicos índices com o atuador linear que tiveram uma melhor resposta que os obtidos com o compensador CR2 na válvula de controle, foram no desvio máximo para o controlador *Feedforward* mais o PID e o PID2DOF.

Controlador	ITAE	Tempo	Desvio
		de acomodação	Máximo
PI	1.422.800	714	$1,\!176$
PID	1.296.800	737	1,039
PID2DOF	528.940	898	$0,\!3451$
FEEDFORWARD	968.910	337	-0,333
CR2	226.550	327	0,367
	Γ \downarrow 1	A	

Tabela B.1 – Índices de desempenho em modo regulatório para o atuador linear.

Fonte: do Autor.