MARCO STABILITO MESQUITA

Técnicas de controle e comparação de desempenho de
uma malha de vazão usando válvulas pneumáticas e
motobomba acionada por inversor de frequência

São Paulo

2021

MARCO STABILITO MESQUITA

Técnicas de controle e comparação de desempenho de
uma malha de vazão usando válvulas pneumáticas e
motobomba acionada por inversor de frequência

Versão corrigida

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: Professor Doutor Claudio Garcia

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, dede 2021

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Mesquita, Marco Stabilito

Técnicas de controle e comparação de desempenho de uma malha de vazão usando válvulas pneumáticas e motobomba acionada por inversor de frequência / M.S. Mesquita – versão corr. – São Paulo, 2021.

183 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1. Controle de Processos 2. Válvulas de Controle. 3. Inversores de Frequência. 4. Compensação de Atrito. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II. t.

Dedico este trabalho a Deus
que nos capacita com
sabedoria e entendimento.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Claudio Garcia, pela oportunidade, paciência, instruções e orientação deste trabalho, sempre com prestatividade e bom humor.

A minha esposa Léia de Andrade Tessarini e minha família que sempre esteve ao meu lado me apoiando.

Aos amigos do LCPI – Hadrien Philippe Martin Desvages, Manuel Alejandro Pérez Serrano, Victor Daniel Reyes Dreke, Edwin Red Estofanero Larico, Matheus Alves Almeida Rios, Walter Ernest Müller Moreira, Bruno Haruki Oyamata, Carlos Alberto Sanches Neto, Antonio Roberto Carpin Neto pela ajuda e companheirismo no laboratório.

Às empresas ABB, Rockwell, Endress+Hauser, Emerson, Yokogawa, Osisoft, Alphamarktec, Sick, Foccus e NI pelas parcerias, doações e suporte aos produtos e serviços de excelente qualidade.

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem aproximada de uma Planta Piloto de Vazão por meio de sua resposta ao degrau e aplicação do método da Síntese Direta para realizar a sintonia de controladores PID. Foi realizada uma validação dos modelos aproximados comparando-se a sua saída com os dados reais. Foram realizados experimentos utilizando uma válvula de controle com alto atrito, uma válvula de controle com baixo atrito e um inversor de frequência para controlar a vazão de água. Foi apresentado um método que visa reduzir a variabilidade do processo, chamado *Control Freeze* (CF), o qual foi empregado junto com um controlador PI atuando em um posicionador eletropneumático e em um posicionador digital com comunicação *Foundation Fieldbus*. O método *Constant Reinforcement 2* (CR2) foi proposto para compensação de atrito em válvulas atuadas por conversor de corrente para pressão (I/P).

Os experimentos mostraram que o controle da vazão pelo inversor de frequência tem muitas vantagens em relação ao controle pelas válvulas, tais como redução da perda de carga, redução do consumo de energia elétrica, baixas correntes de partida e eliminação de variabilidade causada pelo atrito nas válvulas de controle. A válvula de alto atrito insere uma banda morta que aumenta a variabilidade do sistema. Porém, os métodos CF e CR2 com desabilitação de controle geraram índices de desempenho superiores e reduziram os efeitos causados pelo atrito.

Palavras-chave: Controle de processos. Válvulas de controle. Inversores de frequência. Compensação de atrito.

ABSTRACT

This dissertation presents the approximated modeling of a Pilot Flow Plant through step response and applies the Direct Synthesis method to perform the tuning of PID controllers. A validation of the approximated models was made by comparing their outputs with real data. Experiments were performed with a high friction control valve, a low friction control valve and a frequency converter to control water flow. A method called Control Freeze (CF) was presented, which aims to reduce process variability and it is applied combined with a PI controller acting on an electropneumatic positioner and a digital positioner with Foundation Fieldbus protocol. The Constant Reinforcement 2 (CR2) method was proposed to friction compensation in valves actuated by I/P converter.

The experiments showed that the flow control carried out by a frequency converter has many advantages when compared with the control performed by control valves, like reduction of head loss, reduction of electrical energy consumption, lower start currents and elimination of variability caused by friction in control valves. The high friction valve inserts a dead band which increases the system variability. Nevertheless, CF and CR2 with control disabling methods generated higher performance indexes and reduced the effects caused by friction.

Keywords: Process control. Control valves. Frequency Converter. Friction compensation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tela de visualização da Planta Piloto de Vazão no Process Book.....	8
Figura 2 – Conjunto motobomba pertencente à Planta Piloto	8
Figura 3 - Características do motor	9
Figura 4 – Principais componentes do inversor de frequência	9
Figura 5 – Circuito elétrico do inversor de frequência	10
Figura 6 – Formas de onda da tensão no inversor.....	10
Figura 7 - Inversor de frequência Siemens SINAMICS G110.....	11
Figura 8 - Partes de um <i>encoder</i> incremental	11
Figura 9 - Disco de encoder incremental, segundo o número de pulsos.....	12
Figura 10 - Sinais de um encoder incremental.....	12
Figura 11 - Formas de onda para indicação do sentido de giro	13
Figura 12 - Disco com e sem sinal de volta completa	13
Figura 13 - Discos de <i>Encoders Absolutos</i>	14
Figura 14 - Conector M23.....	14
Figura 15 - Sinais do encoder	14
Figura 16 - Diagrama de interligação do encoder.....	15
Figura 17 - Compressor da Schulz	16
Figura 18 - Medidor de vazão mássica Coriolis.....	17
Figura 19 - Funcionamento do medidor de vazão Coriolis	17
Figura 20 - Informações do medidor de vazão Coriolis no supervisório.....	18
Figura 21 - Placa de orifício.....	18
Figura 22 - Placa de orifício entre flanges com tomadas de pressão	18
Figura 23 - Princípio da conservação de massa	19
Figura 24 - Funcionamento da placa de orifício	19
Figura 25 - Transmissores de pressão diferencial da placa de orifício.....	20
Figura 26 – Corpos do tipo globo (<i>globe</i>) e angular (<i>angle</i>)	21
Figura 27 – Modo de operação do atuador 657 da Fisher.....	21
Figura 28 – Componentes do atuador 657 da Fisher	22
Figura 29 – Características de entrada de uma válvula de controle.....	22
Figura 30 - Válvulas de controle, de perturbação e válvulas manuais.....	22
Figura 31 - Tomadas de pressão à montante e à jusante nas válvulas de controle	23
Figura 32 - Transmissores de pressão diferencial das válvulas de controle	23
Figura 33 - Funcionamento do conversor I/P	24
Figura 34 - Conversor I/P modelo 846 da Fisher.....	24
Figura 35 - Posicionador eletropneumático modelo 3582i da Fisher-Emerson	25
Figura 36 - Descrição do posicionador eletropneumático modelo 3582i da Fisher-Emerson.....	26
Figura 37 - Diagrama de blocos do posicionador eletropneumático.....	26
Figura 38 - Posicionador digital DVC6010f da Fisher-Emerson	27
Figura 39 - Diagrama funcional do posicionador digital DVC6000	27

Figura 40 - Diagrama de blocos do posicionador digital DVC6000	28
Figura 41 - Sensor de posição LVDT	29
Figura 42 - Condicionadores de sinais LVC2500	30
Figura 43 - Medidor de pressão no atuador das válvulas de controle - modelo S-10 da Wika.....	30
Figura 44 - Válvula solenoide FV-16	31
Figura 45 – Partes constituintes e simbologia da válvula solenoide.....	31
Figura 47 - SDCD 800xA da ABB.....	32
Figura 48 - CLP modelo SLC 500 da Rockwell	33
Figura 49 - Placa de aquisição de dados PCI6229 da NI	34
Figura 50 - Bloco de conexão da placa de aquisição de dados da National Instruments.....	34
Figura 51 – Vazão, posição e pressão: válvula com gaxetas de grafite e posicionador EP	38
Figura 52 - Vazão, posição e pressão: válvula com gaxetas de grafite e posicionador FF	39
Figura 53 – Ensaio degrau: válvula com gaxetas de grafite e conversor I/P	40
Figura 54 - Ensaio degrau: válvula com gaxetas de teflon e posicionador EP	40
Figura 55 – Ensaio degrau: válvula com gaxetas de teflon e posicionador FF.....	41
Figura 56 – Ensaio degrau: válvula com gaxetas de teflon e conversor I/P	41
Figura 57 – Ensaio degrau: motobomba acionada pelo inversor	43
Figura 58 – Diagrama de blocos do modelo sendo validado.....	44
Figura 59 – MV incremental	45
Figura 60 – Validação do modelo da válvula de grafite com posicionador EP	45
Figura 61 – Validação do modelo da válvula de grafite com posicionador FF.....	46
Figura 62 – Validação do modelo da válvula de grafite com conversor IP	46
Figura 63 – Validação do modelo da válvula de teflon com posicionador EP	47
Figura 64 – Validação do modelo da válvula de teflon com posicionador FF.....	47
Figura 65 – Validação do modelo da válvula de teflon com conversor I/P	48
Figura 66 – Validação do modelo da motobomba	48
Figura 67 – Curva de resposta ao degrau unitário mostrando t_d, t_r, t_p, M_p e t_s	53
Figura 68 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$	55
Figura 69 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$	56
Figura 70 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$	57
Figura 71 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	58
Figura 72 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	59
Figura 73 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$	60
Figura 74 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$	61
Figura 75 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$	62
Figura 76 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	63
Figura 77 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$	64
Figura 78 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$	65
Figura 79 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$	66
Figura 80 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	67
Figura 81 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$	68

Figura 82 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	69
Figura 83 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$	70
Figura 84 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$	71
Figura 85 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$	72
Figura 86 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	73
Figura 87 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$	74
Figura 88 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$	75
Figura 89 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$	76
Figura 90 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$	77
Figura 91 – Ensaio de perturbação em malha aberta: válvula de grafite	83
Figura 92 – Ensaio de perturbação em malha aberta: válvula de teflon	84
Figura 93 – Ensaio de perturbação em malha aberta: motobomba acionada pelo inversor	84
Figura 94 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$	85
Figura 95 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$	86
Figura 96 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$	87
Figura 97 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	88
Figura 98 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$	89
Figura 99 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$	91
Figura 100 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$	92
Figura 101 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	93
Figura 102 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$	94
Figura 103 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$	95
Figura 104 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$	96
Figura 105 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	97
Figura 106 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$	98
Figura 107 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,30$ e $T_i = 1,36$	99
Figura 108 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$	100
Figura 109 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$	101
Figura 110 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$	102
Figura 111 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	103
Figura 112 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$	104
Figura 113 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$	105
Figura 114 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$	106
Figura 115 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$	107
Figura 116 – Comportamento típico de uma válvula de controle afetada pelo <i>stiction</i>	111
Figura 117 – Curva de assinatura – válvula de grafite – posicionador EP	113
Figura 118 – Curva de assinatura – válvula de teflon – posicionador EP	114
Figura 119- Estrutura da malha de controle de vazão com compensador CR2	115
Figura 120 – Algoritmo de desabilitação de controle	116

Figura 121 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CF $\delta=1,1\%$ (0,2m ³ /h) - $Kc = 0,60$ e $Ti = 0,77$	118
Figura 122 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,60$ e $Ti = 0,77$..	119
Figura 123 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,51$ e $Ti = 0,77$..	120
Figura 124 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CR2 - $S=17,2\%$ - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,60$ e $Ti = 0,77$	121
Figura 125 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CR2 - $S=2\%$ - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,60$ e $Ti = 0,77$	122
Figura 126 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	123
Figura 127 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF – CR2 - $S=17,2$ - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	124
Figura 128 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF – CR2 - $S=2,5$ - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	125
Figura 129 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	126
Figura 130 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP – CR2 - $S=17,2$ - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	127
Figura 131 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,75$ e $Ti = 0,95$	128
Figura 132 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	129
Figura 133 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor I/P – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	130
Figura 134 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor I/P – CR2 - $S=4\%$ - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	131
Figura 135 – Ensaio servo – motobomba com inversor – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,62$ e $Ti = 1,1$	132
Figura 136 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posic. EP – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,51$ e $Ti = 0,77$	133
Figura 137 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posic. FF – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	134
Figura 138 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – convers. I/P – CF - $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$..	135
Fig. 139 – Ensaio regulatório – válv. grafite – conv. I/P – CR2, $S=17,2\%$, $\delta=0,5\%$, $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$...	136
Figura 140 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posic. EP – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,75$ e $Ti = 0,95$	137
Figura 141 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posic. FF – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	138
Figura 142 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conv. I/P – CF $\delta=0,5\%$ - $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$	139
Figura 143 – Ensaio regulatório – válv. teflon – conv. I/P – CR2 - $S=4\%$, $\delta=0,5\%$, $Kc = 0,3$ e $Ti = 1,36$...	140
Figura 144 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $Kc = 0,62$ e $Ti = 1,1$	141

Figura 145 – Curva característica da bomba KSB Megabloc 32-200.....	151
Figura 146 – Perda de carga na válvula de grafite – PdIT15A	151
Figura 147 – Perda de carga na válvula de Teflon – PdIT15B	152
Figura 148– Consumo de energia em função dos métodos de controle de vazão	152
Figura 149 – Corrente de partida em sistema de partida direta e com inversor	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligação do encoder	14
Tabela 2 – Ganhos para sintonias do posicionador digital	28
Tabela 3 – Informação do atuador para ajuste básico.....	29
Tabela 4 - Válvulas solenoide da Planta Piloto de Vazão	32
Tabela 6 - Características da placa National PCI-6229.....	35
Tabela 7 – Constante de tempo para a válvula de teflon – medidor Coriolis x placa de orifício.....	37
Tabela 8 – Parâmetros do modelo – válvula de grafite com posicionador EP.....	39
Tabela 9 – Parâmetros do modelo – válvula de grafite com posicionador FF	39
Tabela 10 – Parâmetros do modelo – válvula de grafite com conversor IP.....	40
Tabela 11 – Parâmetros do modelo – válvula de teflon com posicionador EP	40
Tabela 12 – Parâmetros do modelo – válvula de teflon com posicionador FF	41
Tabela 13 – Parâmetros do modelo – válvula de teflon com conversor IP	41
Tabela 14 - Parâmetros obtidos nos ensaios de grau	42
Tabela 15 – Parâmetros do modelo – motobomba acionada por inversor	43
Tabela 16 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de grafite com posicionador EP	46
Tabela 17 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de grafite com posicionador FF.....	46
Tabela 18 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de grafite com conversor IP	47
Tabela 19 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de teflon com posicionador EP	47
Tabela 20 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de teflon com posicionador FF	48
Tabela 21 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de teflon com conversor I/P	48
Tabela 22 – Parâmetros utilizados nos modelos da motobomba	49
Tabela 23 – Índice fit dos modelos das curvas de reação.....	49
Tabela 24 - Parâmetros do controlador PI obtidos pela Síntese Direta.....	50
Tabela 25 – Sintonias propostas de controladores PI – válvula de grafite	50
Tabela 26 - Sintonias propostas de controladores PI – válvula de teflon	51
Tabela 27 - Sintonias propostas de controladores PI – motobomba	51
Tabela 28 - Sintonias testadas de controladores PI – válvula de grafite	54
Tabela 29 - Sintonias testadas de controladores PI – válvula de teflon	54
Tabela 30 - Sintonias testadas de controladores PI – motobomba	54
Tabela 31 - Parâmetros ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP.....	79
Tabela 32 - Parâmetros ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF	79
Tabela 33 - Parâmetros ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP.....	80
Tabela 34 - Parâmetros ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP	80
Tabela 35 - Parâmetros ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF	81
Tabela 36 - Parâmetros ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP.....	82
Tabela 37 - Parâmetros ensaio servo - motobomba.....	82
Tabela 38 – Efeito da perturbação nos diferentes elementos finais de controle	84
Tabela 39 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP	108
Tabela 40 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador FF.....	108

Tabela 41 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor I/P	109
Tabela 42 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP	109
Tabela 43 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador FF	109
Tabela 44 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P	110
Tabela 45 - Parâmetros ensaio regulatório - motobomba	110
Tabela 46 – Parâmetro S da curva de assinatura	112
Tabela 47 – Parâmetros da desabilitação de controle	117
Tabela 48 – Comparativo do controle PI, PI+CF – válvula de grafite – posic. EP, $\tau_c = 0,5$, τ , $K_c = 0,6$ e $T_i = 0,77$	142
Tabela 49 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta = 0,5\%$ – válvula de grafite – posicionador EP - $\tau_c = 0,8$, τ , $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$	143
Tabela 50 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta = 0,5\%$ – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	144
Tabela 51 – Comparativo do controle PI, PI + CF e PI + CR2 com $\delta = 0,5\%$ – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	145
Tabela 52 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta = 0,5\%$ – válvula de teflon – posicionador EP - $\tau_c = 0,5$, τ , $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$	146
Tabela 53 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta = 0,5\%$ – válvula de teflon – posicionador FF - $\tau_c = 2,8$, τ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	147
Tabela 54 – Comparativo do controle PI, PI + CF e PI + CR2 com $\delta = 0,5\%$ – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	148
Tabela 55 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta = 0,5\%$ – motobomba - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$	149
Tabela 56 – Pesos dos índices para pontuação final do controlador	149
Tabela 57 – Pontuação final dos controladores	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B_m – Banda morta
CC – Corrente contínua
CLP – Controlador Lógico Programável
CPU – Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit*)
CR1 - *Constant Reinforcement 1*
CR2 - *Constant Reinforcement 2*
DC – *Direct Current*
EP – Eletropneumático
 e_{ss} – Erro médio em Estado Estacionário (*Steady-State Error*)
FF – Foundation Fieldbus
GBN – *Generalized Binary Noise*
IGBT - Transistor Bipolar de Porta Isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)
IHM – Interface Homem Máquina
IMC – *Internal Model Controller*
I/O – Entrada / Saída (*Input / Output*)
I/P – Corrente para pressão
ISE – *Integrated Squared Error*
 J – Banda de agarramento (*slip-jump*)
LCPI – Laboratório de Controle de Processos Industriais
LED – *Light Emitting Diode*
LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*
MV – Variável Manipulada (*Manipulated Variable*)
OE – *Output Error*
OPC – *Open Platform Communication* (antigo: OLE for Process Control)
P&ID – *Piping and Instrumentation Diagram*
PI – Proporcional Integral
PID – Proporcional Integral Derivativo
PIMS – *Plant Information Management System*
PLC – *Programmable Logic Controller*
PRBS – *Pseudo Random Binary Sequence*
PV – Variável do Processo (*Process Variable*)
PWB – *Printed Wiring Board*
PWM – Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)
 S – Banda morta mais J (curva de assinatura)
SDCD – Sistema Digital de Controle Distribuído
SP – *Set Point*
USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.4	ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO	6
2	DESCRIÇÃO DA PLANTA DE VAZÃO.....	7
2.1	CARACTERÍSTICAS DO CONJUNTO MOTO BOMBA.....	8
2.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA (FY17)	9
2.3	ENCODER INCREMENTAL (ST17).....	11
2.3.1	Tecnologias de detecção	11
2.3.2	<i>Encoder</i> óptico	11
2.3.3	Tipos de <i>encoder</i>	12
2.3.4	<i>Encoder</i> aplicado na Planta Piloto de vazão.....	14
2.3.5	Cartão DP820	15
2.4	COMPRESSOR DE AR	16
2.5	MEDIDORES DE VAZÃO INSTALADOS NA PLANTA PILOTO DE VAZÃO	17
2.5.1	Medidor de vazão mássica (FIT-10B)	17
2.5.2	Placa de orifício (FE-10)	18
2.5.3	Transmissores de pressão diferencial da Yokogawa (FIT-10A e FIT10D).....	20
2.6	VÁLVULAS DE CONTROLE E SOLENÓIDES E SEUS ACESSÓRIOS.....	20
2.6.1	Válvulas de controle ET da Fisher (FV-11 e FV-12).....	20
2.6.2	Válvula GLS da Valtek (FV-13)	23
2.6.3	Transmissores de pressão diferencial da Yokogawa (PDT-15A e PDT-15B)	23
2.6.4	Conversores I/P 846 da Emerson (FY-11 e FY-12)	24
2.6.5	Posicionadores Eletropneumáticos 3528i da Fisher (ZC11E e ZC12E).....	25
2.6.6	Posicionadores Digitais DVC6000 da Fisher (ZT-11D e ZT-12D).....	26
2.6.7	Sensores de posição LVDT (ZT-11A e ZT-12A)	29
2.6.8	Medidores de Pressão S-10 da Wika (PT-11 e PT-12).....	30
2.6.9	Válvulas Solenoides 8210-100 da Ascoval (FV-14, FV-15, FV-16).....	31
2.7	SISTEMAS DE CONTROLE, DE PROTEÇÃO E DE MONITORAÇÃO	32
2.7.1	SDCD ABB 800xA.....	32

2.7.2	CLP Rockwell SLC500.....	33
2.7.3	Placa de Aquisição da NI PCI6229	34
2.7.4	Sistema PIMS Osisoft PI.....	35
3	MODELO APROXIMADO DA PLANTA PILOTO DE VAZÃO E SINTONIA DO CONTROLADOR PI ...	36
3.1	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	36
3.2	MODELOS APROXIMADOS DA PLANTA.....	36
3.2.1	Medição de vazão	37
3.2.2	Elementos finais de controle	37
3.2.3	Ensaio degrau das válvulas	38
3.2.4	Ensaio degrau da motobomba	43
3.3	VALIDAÇÃO DOS MODELOS	44
3.4	CONTROLE PI DA VAZÃO.....	49
4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS CONTROLADORES	52
4.1	ENSAIOS NO MODO SERVO	52
4.1.1	Válvula de Grafite com Posicionador EP	55
4.1.2	Válvula de Grafite com Posicionador FF.....	59
4.1.3	Válvula de Grafite com Conversor IP	61
4.1.4	Válvula de Teflon com Posicionador EP	64
4.1.5	Válvula de Teflon com Posicionador FF.....	68
4.1.6	Válvula de Teflon com Conversor IP.....	70
4.1.7	Motobomba acionada por inversor.....	74
4.1.8	Resultados – Ensaio Servo.....	78
4.2	ENSAIOS NO MODO REGULATÓRIO.....	83
4.2.1	Válvula de Grafite com Posicionador EP	85
4.2.2	Válvula de Grafite com Posicionador FF.....	88
4.2.3	Válvula de Grafite com Conversor IP	90
4.2.4	Válvula de Teflon com Posicionador EP	94
4.2.5	Válvula de Teflon com Posicionador FF.....	98
4.2.6	Válvula de Teflon com Conversor I/P	100
4.2.7	Motobomba acionada por inversor.....	104
4.2.8	Resultados – Ensaio Regulatório.....	108
5	MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ATRITO <i>CONTROL FREEZE</i> E CR2	111
5.1	DEFINIÇÃO DE <i>STICTION</i>	111

5.2	CURVA DE ASSINATURA.....	112
5.3	O MÉTODO CR.....	115
5.3.1	Experimentos No Modo Servo	117
5.3.2	Experimentos No Modo Regulatório	133
5.3.3	Resultados – Experimentos com CF e CR2.....	142
5.4	COMPARATIVO ENTRE BOMBA COM INVERSOR E VÁLVULA DE CONTROLE.....	150
6	CONCLUSÃO	154
6.1	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	155
	REFERÊNCIAS.....	157
	APÊNDICE A – DIAGRAMA P&ID DA PLANTA PILOTO DE VAZÃO	162
	APÊNDICE B – PROGRAMA EM SIMULINK PARA LEITURA E ESCRITA DE DADOS NA PLACA DE AQUISIÇÃO PCI6229 DA NI	163
	APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLANTA DE VAZÃO.....	164
	APÊNDICE D – TELAS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA ABB 800xa	165

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As válvulas são elementos finais de controle muito usados na indústria de processos. Elas tipicamente possuem uma haste ou um disco móvel, responsável pelo fechamento ou abertura da válvula por meio de um movimento linear ou de rotação (dependendo do tipo da válvula). Para impedir que o fluido vaze pela entrada da haste, no corpo da válvula são inseridas gaxetas, porém, além de vedarem o corpo da válvula, elas também geram atrito com a haste, inserindo uma banda morta no processo.

Devido às não linearidades dos processos industriais, perturbações no processo ou sintonia inadequada de controladores, a variável controlada pode não estabilizar no valor de referência, oscilando em torno deste. Esta oscilação é denominada variabilidade da malha de controle, um efeito indesejado que provoca perda de material no processo, gasto de energia e desgaste dos elementos da malha (PAIOLA, 2008).

A banda morta é uma das principais causas da variabilidade nas plantas industriais. (EMERSON, 2019) menciona que em uma planta auditada, 30% das válvulas possuíam banda mortas maiores que 4% e 65% das malhas tinham bandas mortas maiores que 2%. (EMERSON, 2019) recomenda, para um melhor desempenho, que as válvulas possuam uma banda morta inferior a 1%.

Ao longo de anos de uso, as válvulas tendem a aumentar o atrito, devido ao desgaste de seus componentes, comum em sistemas com partes móveis (SILVA, 2013). Alguns tipos de atuadores, como o de tipo pistão, tendem a sofrer maior desgaste com o tempo em superfícies e gaxetas, perda de lubrificação e degradação de elastômeros. Atuadores do tipo mola e diafragma possuem características de atrito mais uniformes com a idade (EMERSON, 2019).

O atrito dificulta o controle e tende a aumentar a variabilidade da variável controlada. As opções para a solução deste problema são a manutenção da válvula, com a consequente substituição de peças ou uma compensação do atrito feita por um algoritmo de controle. Enquanto a manutenção requer a retirada da válvula e a interrupção temporária do processo, o uso de algoritmos de controle para compensar o atrito contorna este transtorno, reduzindo assim o tempo de inatividade do processo e prolongando o tempo de utilização da válvula.

Nas válvulas de controle pneumáticas pode-se escolher a forma de posicionamento do atuador. Neste trabalho se estudaram três modos de posicionamento de válvulas de controle em uma planta piloto de vazão: através de conversor de corrente para pressão

(conversor I/P), de posicionador eletropneumático (EP) e de posicionador digital com interface *Foundation Fieldbus* (FF). Ao especificar válvulas de controle, a escolha do atuador e posicionador afeta bastante o desempenho estático (banda morta), a resposta dinâmica e até o consumo de ar (EMERSON, 2019).

As malhas de vazão estão presentes em diversos ramos da indústria, como óleo e gás, química, papel e celulose, farmacêutica, alimentícia e outras. Em uma indústria siderúrgica, há inúmeras malhas que controlam o fluxo de água, desde a captação de água bruta, processo de clarificação da água, utilização de água clarificada em processos produtivos e tratamento de efluentes. Em cada etapa do processo produtivo deve-se ter um controle preciso e estável da vazão de água para se obter produtos que atendam às normas de qualidade exigidas, além de uma operação segura que proteja equipamentos e pessoas. A relevância do controle nessas aplicações se deve à necessidade de produção constante com pequena variabilidade, de modo a evitar a redução da qualidade do produto, perda de insumos e tempo produtivo. Em um ambiente industrial há centenas de malhas de controle que sofrem tanto com distúrbios internos como os causados pelas demais malhas, sendo preciso o controle para manter a variável de processo dentro de uma faixa definida.

Com o avanço da eletrônica, foi possível desenvolver reguladores de velocidade de motores elétricos, sendo o conversor de frequência, ou, como é comumente conhecido, inversor de frequência é o arranjo mais utilizado em aplicações nas indústrias de alumínio, siderurgia e mineração para acionamento de motores de indução (VIEIRA, 2018).

O controle de vazão também pode ser feito por bombas, regulando-se a variação da rotação do motor através de um inversor de frequência. A substituição do controle de vazão da válvula de controle para o inversor de frequência pode trazer uma economia de energia elétrica entre 47,18% a 52,22%. Esta economia pode chegar a 67,03% se houver a troca de um motor padrão para um motor de alto rendimento (MESQUITA, 2009).

O setor de saneamento básico representou 2,40% do consumo de energia elétrica do Brasil em 2015 (CHEREM, 2016). É fundamental buscar alternativas para reduzir o consumo de energia, pois reduzem impactos ambientais causados na geração de energia elétrica e reduzem os custos operacionais das empresas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho mostra o resultado inédito de se controlar a vazão da Planta Piloto de Vazão do Laboratório de Controle de Processos Industriais – LCPI da Escola Politécnica da USP por meio da modulação da referência enviada ao inversor de frequência. Também

mostra os resultados de se usar um medidor mássico no controle da vazão, o qual opera baseado no efeito Coriolis.

Além disso, é objetivo desta pesquisa implementar e comparar o desempenho de controladores para válvulas de controle, bem como testar a eficácia de compensadores de atrito para válvulas com posicionador eletropneumático ou digital e conversor I/P. É avaliado se o método de compensação de atrito CR2, o qual foi concebido para o conversor I/P, é eficiente também para os posicionadores. E, finalmente, mostrar dados do processo gerados através da ferramenta Osisoft PI.

Esta dissertação é uma continuação e consolidação de estudos já feitos na Planta Piloto de Vazão. Para atingir o objetivo principal deste trabalho, algumas etapas são necessárias:

- Instalação elétrica e configuração de componentes;
- Criação de desenhos e diagramas elétricos;
- Implementação de algoritmos de controle em SDCD;
- Criação de telas de supervisão;
- Instalação e configuração de um sistema de aquisição de dados;
- Ensaios em degrau para levantar curvas de reação do processo;
- Comparação da eficiência do controle para a válvula de baixo atrito e a de alto atrito usando os três tipos de posicionadores (digital, eletropneumático e conversor I/P);
- Uso de técnicas não intrusivas de compensação de atrito com o algoritmo CR2.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Maddarena (2006) mostrou casos reais de aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água. Ele avaliou a instalação de 123 inversores no Brasil, além de mais de 350 na América do Sul e mais de 2500 no mundo. Os benefícios encontrados foram:

- Significativa economia de energia
- Eliminação de válvulas de controle
- Redução da erosão, cavitação, recirculação e golpe de aríete
- Redução da corrente e demanda ativa de partida
- Melhora no rendimento da bomba
- Partidas e paradas mais suaves e menos frequentes
- Redução da carga e desgaste do rotor e deflexões no eixo
- Aumento da vida útil do selo, redução da ondulação de pressão

- Melhora no controle do processo (fluxo, pressão e nível)
- Redução dos custos de construção civil (tanques e tubulação)
- Redução dos custos de manutenção

Os métodos de diagnóstico de válvulas podem ser classificados como intrusivos e não intrusivos. Os métodos não intrusivos são baseados em análise *off-line* de dados do processo, sem interação humana durante a coleta de informações. Já os métodos intrusivos precisam de intervenção em tempo real durante a operação. Paiola (2008) estudou dois métodos intrusivos para diagnosticar as perturbações causadas pelo atrito nas válvulas: o Teste de Elevação e o Teste de Mudanças do Ganho do Controlador. O resultado encontrado foi que o Teste de Elevação foi eficiente na detecção do *stiction*, enquanto o Método de Mudanças no Ganho do Controlador apresentou falhas ao identificar o *stiction*.

Em (GARCIA, 2008) foram apresentados, implementados e comparados oito modelos para representar o efeito do atrito em válvulas de controle, sendo quatro modelos baseados em princípios físicos: Clássico (OLSSON, 1996), Karnopp (KARNOPP, 1985), Sete Parâmetros (ARMSTRONG-HÉLOUVRY; DUPONT; CANUDAS DE WIT, 1994), Lugre (CANUDAS DE WIT; OLSSON; ASTRÖM; LISCHINSKY, 1995); e quatro empíricos: Stenman (STENMAN et al., 2003), Choudhury (CHOUDHURY; JAIN et al., 2006; CHOUDHURY; THORNHILL et al., 2004; CHOUDHURY et al., 2005), Kano (KANO et al., 2004) e He (HE et al., 2007). Dentre eles, três foram capazes de representar o comportamento esperado das válvulas: Karnopp, Lugre e Kano. Garcia (2008) evidencia que os modelos experimentais, baseados em dados, são os modelos mais desenvolvidos e mais rápidos.

Uehara (2009) mostrou uma relação entre os coeficientes dos modelos de atrito de Karnopp e de Kano, bem como equações para transformar um modelo no outro. O modelo de Kano se mostrou o mais preciso e menos sensível ao ajuste de sintonia do controlador. Foram apresentados métodos para identificar os parâmetros a partir de dados do funcionamento normal da planta.

Garcia et al. (2012) realizaram ensaios de grau aplicados no conversor I/P e no posicionador digital da válvula de teflon para, a partir das curvas de reação, identificar um modelo de 1ª ordem com tempo morto para a Planta Piloto. A partir desse modelo, foram geradas três sintonias de um controlador PI usando o método da Síntese Direta. Observou-se uma variabilidade maior para as sintonias mais agressivas, para a válvula de alto atrito e para o conversor I/P. A utilização de sintonia com ganho proporcional K_c menor, bem como o uso da válvula de baixo atrito e do posicionador digital reduziram a variabilidade.

Os modelos físicos dos internos da válvula precisam da medição da posição da haste, dado nem sempre disponível em um sistema industrial. Baeza (2013) usou compensadores de atrito por modelo interno. Esse trabalho apresenta o estudo de cinco compensadores não lineares: controlador rastreador de trajetória, controlador por modos deslizantes, controlador por modos deslizantes integrador, controlador por modelo interno não linear e controlador PI não linear. Dentre esses, o controlador por modos deslizantes e por modos deslizantes integrador apresentaram os melhores resultados.

Silva (2013) estudou compensadores de atrito que não precisam de modelos internos e podem ser implantados em CLPs ou SDCDs, os quais são: *CR1*, *CR2*, *Knocker* e *Two-move*. Ele usou também a desabilitação do controle quando a vazão se acomoda. Seus resultados mostram que é possível que uma válvula com alto atrito tenha desempenho similar a uma válvula com baixo atrito, através das técnicas de compensação de atrito utilizadas. Estes métodos também foram testados em (HARAOKA; KAWAMORITA, 2017).

Para simular o funcionamento da Planta Piloto de Vazão, Mora (2014) criou um modelo matemático da planta no ambiente *Simulink*, no qual foram modeladas as perdas de carga no circuito hidráulico e nos instrumentos, o efeito de atrito das válvulas e o comportamento da bomba hidráulica. Este modelo usou como medidor de vazão uma placa de orifício ligada a um transmissor de pressão diferencial. Para vazões baixas, a placa de orifício apresentou maior incerteza na medição e a diferença entre o modelo simulado e os valores reais foi elevada.

Hidalgo (2015) propôs um método de compensação de atrito chamado modos deslizantes com integrador, o qual traz bons resultados quando implementado com tempos de amostragem entre 1 e 10 ms, o que exige muito processamento de um SDCD e pode necessitar de um *hardware* dedicado para ser implantado. Quanto ao método chamado observador de estados, usado para reconstituir a posição da haste, ele não gerou bons resultados de controle. O controlador PI com *CR2* se mostrou uma solução simples de se implementar e que produziu resultados satisfatórios e o controlador PI com posicionador digital produziu bons resultados, mas inferior a todos os compensadores de atrito.

Dreke (2017) adicionou ao modelo da planta criado por Mora (2014) um medidor de vazão mássica por efeito Coriolis e calculou o coeficiente *Cv* das válvulas de controle a partir dos valores medidos da pressão diferencial (antes e após a válvula). Com essas mudanças, o modelo gerou resultados mais próximos aos valores reais de operação.

Marques (2020) desenvolveu métodos para estimar o modelo da válvula usando os modelos de atrito Kano, Karnopp, Luge e GMS. Em seus experimentos, o modelo GMS

se mostrou o mais preciso. Ele utiliza o método do controle adaptativo por inversão para compensação automática de atrito.

O livro (OGATA, 2000) aborda a teoria geral de controle. O livro (AGUIRRE, 2015) provê embasamento sobre métodos de identificação de sistemas. O livro (GARCIA, 2017) fornece conhecimentos sobre controle de processos industriais como obtenção de modelos, análise de estabilidade e de desempenho de sistemas de controle e sintonia de controladores.

1.4 ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O Capítulo 1 descreve a motivação e os objetivos que se pretende alcançar. O Capítulo 2 apresenta a Planta Piloto de Vazão, bem como a instrumentação que a compõe. O Capítulo 3 define um modelo de primeira ordem com tempo morto para essa planta através da curva de reação ao degrau. O método da Síntese Direta é usado para sintonizar o controlador PI da malha de vazão. O Capítulo 4 mostra os ensaios nos modos servo e regulatório para medir a variabilidade e outros índices de desempenho das malhas. O Capítulo 5 destaca as técnicas de compensação de atrito CF e CR2 em válvulas de controle para reduzir a variabilidade na malha de controle e um comparativo entre o controle com inversor e com válvulas de controle. O Capítulo 6 inclui a conclusão do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE VAZÃO

A Planta Piloto de Vazão corresponde a um circuito fechado de vazão, cuja água é retirada de uma caixa d'água, flui pelo circuito hidráulico e retorna à caixa d'água. A vazão é forçada por meio de uma bomba hidráulica, cuja rotação pode ser ajustada por meio de um inversor de frequência. A planta possui duas válvulas de controle, uma de alto e uma de baixo atrito, e uma terceira válvula para causar perturbações na vazão. Além disso, há três medidores de vazão, dois baseados em placa de orifício mais transmissores de pressão diferencial e um medidor Coriolis. Ademais, existem válvulas solenoide de bloqueio da vazão, tanto na entrada como na saída do circuito hidráulico, além de uma terceira válvula solenoide que permite drenar a água do sistema. A planta conta com um visor de vazão que permite ver a coloração da água bem como seu grau de limpeza e com um manômetro que indica a pressão na tubulação.

A planta é controlada através de um SDCD por meio de sinais analógicos e/ou pelo protocolo *Foundation Fieldbus*. Assim, é possível estimar e projetar controladores para compensação de atrito usando ferramentas presentes na indústria. A planta conta ainda com uma placa de aquisição de dados que permite receber e enviar sinais da planta e, portanto, é possível controlar e coletar dados com elevada frequência de amostragem no ambiente do *MATLAB*®.

Adicionalmente, a planta possui ainda um CLP dedicado ao intertravamento de segurança do sistema, bem como um software para armazenamento histórico das variáveis do processo. Portanto, a Planta Piloto de Vazão do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) possui estrutura com equipamentos comuns na indústria, para o estudo acadêmico detalhado de diversos temas, com foco na pesquisa aplicada às necessidades da indústria de processos.

A planta possui algumas linhas de pesquisa que podem ser desenvolvidas, como: modelagem matemática do sistema, análise de variabilidade com atuadores inteligentes (como posicionadores digitais) e com atuadores convencionais (como conversores I/P), análise de variabilidade com válvulas de alto e baixo atrito, quantificação do atrito, compensação de atrito, vantagens e desvantagens de empregar instrumentação analógica com transmissão 4-20mA ou instrumentação *Fieldbus Foundation* etc.

A tela de visualização da planta, do Software *PI ProcessBook* da OSIsoft, apresenta uma visão esquemática da planta e é mostrada na Figura 1. O diagrama P&ID da planta é apresentado no Apêndice A e mostra toda a instrumentação instalada nela. O Apêndice C mostra o diagrama de blocos do controle de vazão da planta.

Figura 1 - Tela de visualização da Planta Piloto de Vazão no Process Book

Fonte: (DESVAGES; RIOS, 2018)

Os elementos que compõem a planta são apresentados nas próximas seções.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO CONJUNTO MOTO BOMBA

Uma caixa d'água de 1000 litros armazena a água que circula pela Planta Piloto de Vazão. A motobomba da Figura 2 é composta pela bomba Megabloc 32-200 da KSB e seu tipo é centrífuga horizontal. Ela bombeia a água da caixa d'água para a planta, que volta para a caixa d'água. A curva característica da bomba é exibida mais adiante na Figura 144. A rotação do motor é regulada por um inversor de frequência. O motor é de indução trifásico com quatro polos 90L da WEG e suas características estão na Figura 3.

Figura 2 – Conjunto motobomba pertencente à Planta Piloto de Vazão

Fonte: (MORA, 2014)

Figura 3 - Características do motor

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado Ip/In	Conjugado nominal Cn (kgf.m)	Conjugado com rotor bloqueado Cp/Cn	Conjugado máximo Cmax/Cn
cv	kW							
3	2,2	90L	1725	8,7	6,8	1,25	2,6	2,8

rendimento η %			fator de potência $\cos\phi$			Fator de serviço Fs	Momento de inércia J (kgm2)	Tempo de rotor bloqueado quente (s)	Nível de ruído dB (A)	Peso aprox (kg)
% da potência nominal										
50	75	100	50	75	100					
79	82	83	0,64	0,75	0,8	1,15	0,00672	6	51	24,7

Fonte: (WEG, 2020)

2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA (FY17)

Inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que controlam a velocidade de motores de indução. A Figura 4 exibe os principais componentes de um inversor. A interface do inversor com o sistema de automação pode ser feita via serial (ex.: RS485), interface analógica (0-10 VCC), entradas/saídas discretas (I/O digital) ou via protocolos industriais (*DeviceNet*, *Profibus*, *Ethernet* etc). A programação do inversor pode ser feita via software do fabricante via um computador ou manualmente por uma IHM, que também fornece dados como tensões, correntes, frequência e *status* de falhas. A CPU armazena os parâmetros do inversor, trata todos os dados das interfaces, realiza as lógicas de proteção do equipamento e do motor e faz o controle de geração de pulsos para os IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) (FRANCHI, 2009).

Figura 4 – Principais componentes do inversor de frequência

Fonte: (FRANCHI, 2009)

A Figura 5 mostra o circuito elétrico de potência do inversor, composto por retificador, *link* DC e inversor. A primeira parte se trata de um circuito retificador de onda completa formada por diodos, que transformam a tensão alternada da rede em tensão retificada. O *link* DC é composto por filtros capacitivos que transformam a tensão retificada em tensão contínua (barramento CC). Por fim, o circuito inversor é composto geralmente por transistores IGBT, que convertem a tensão do barramento CC em um sinal alternado com tensão e frequência variáveis. Os inversores mais modernos usam a técnica intitulada Modulação por Largura de Pulso ou PWM (*Pulse Width Modulation*) (WEG, 2005).

A Figura 6 mostra as formas de onda da tensão desde a entrada do inversor até a saída para o motor de indução trifásico.

O inversor de frequência usado na Planta Piloto de Vazão é o SINAMICS G110 da Siemens, com potência de saída de 2,2kW e tensão de alimentação monofásica em 220V_{AC} (ver Figura 7). Ele controla a frequência de alimentação do motor da bomba e, assim, a sua velocidade de rotação, possibilitando controlar a vazão de água. É possível enviar um sinal analógico de referência para o inversor proveniente do SDCCD.

Figura 5 – Circuito elétrico do inversor de frequência

Fonte: (FRANCHI, 2009)

Figura 6 – Formas de onda da tensão no inversor

Fonte: (DIAS, 2020)

Figura 7 - Inversor de frequência Siemens SINAMICS G110

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

2.3 ENCODER INCREMENTAL (ST17)

Encoders são sensores eletromecânicos que convertem posição em sinal elétrico digital. Com os *encoders* é possível quantificar distâncias, controlar velocidades, medir ângulos, número de rotações, realizar posicionamentos, rotacionar braços robóticos etc.

2.3.1 Tecnologias de detecção

Há diferentes componentes usados como emissor e receptor de um *encoder*. Os *encoders* ópticos usam LED e fotodetector e os *encoders* magnéticos usam ímãs e sensores de efeito Hall em várias configurações. Os magnéticos são mais usados em condições não ideais, como alta temperatura, poeira, umidade e vibração (HITECNO-LOGIA, 2020).

2.3.2 *Encoder* óptico

O *encoder* óptico é composto basicamente por um disco com marcações, um componente emissor e um receptor – ver Figura 8. Ele utiliza o LED como componente emissor e um sensor fotodetector como o receptor.

Figura 8 - Partes de um *encoder* incremental

Fonte: (HITECNOLOGIA, 2020)

As marcações no disco bloqueiam e desbloqueiam o feixe de luz do LED para o fotodetector, assim, à medida que o disco vai girando, o fotodetector junto com um circuito eletrônico repassa para as saídas do *encoder* um sinal em forma de onda quadrada, proporcional ao número de marcações do *encoder*. Logo, a resolução do *encoder* é o número de marcações presentes no disco do dispositivo, que equivale à quantidade de ondas quadradas, ou *clock*, gerado em uma volta do *encoder*, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Disco de encoder incremental, segundo o número de pulsos

2.3.3 Tipos de *encoder*

Há vários tipos de *encoder* com diferentes tecnologias. Os *encoders* mais comuns são o incremental e o absoluto.

2.3.3.1 Encoder Incremental

O *encoder* incremental indica a posição relativa ao ponto onde o *encoder* foi ativado. Ele usualmente tem três sinais de saída: *A*, *B* e *O* (ou *Z*) e a inversa de cada um dos sinais: $\bar{A}$, $\bar{B}$ e $\bar{O}$ (ou $\bar{Z}$), como na Figura 10. Com esses sinais mede-se o ângulo de rotação, o sentido da rotação e o início/fim de uma volta. O sinal *A* é o sinal principal, que gera os pulsos (ou *clock*) quando o *encoder* gira. O sinal *B* equivale ao sinal *A* defasado de $\pm 90^\circ$ para indicar o sentido da rotação e o sinal *O* (ou *Z*) indica o início de uma revolução.

Quando o sinal *B* estiver adiantado de 90° do sinal *A*, o *encoder* gira no sentido anti-horário, neste caso a borda de subida de um sinal *A* se encontra com o sinal *B* no estado 1; analogamente, quando *B* estiver em 0 durante a borda de subida do sinal *A*, o *encoder* estará girando no sentido horário. A Figura 11 mostra as formas de ondas citadas.

Figura 11 - Formas de onda para indicação do sentido de giro

Fonte: (HITECNOLOGIA, 2020)

O terceiro sinal do *encoder*, o sinal *O* ou *Z*, indica a posição "0" (zero), assim pode-se medir o número de voltas que o dispositivo acoplado ao *encoder* deu. A Figura 12 mostra a forma de um disco com e sem o sinal *O*.

Figura 12 - Disco com e sem sinal de volta completa

Disco de resolução de 32 pulsos/volta, **sem** sinal de sincronismo

Disco de resolução de 32 pulsos/volta, **com** sinal de sincronismo

Fonte: (HITECNOLOGIA, 2020)

2.3.3.2 Encoder Absoluto

Os *encoders* absolutos são mais complexos e mais caros. Eles indicam a posição absoluta através de saídas digitais codificadas em um valor binário ou código *gray*. A re-

solução é representada em *bits*, que equivale ao número de faixas disponíveis no sensor, por exemplo com um *encoder* absoluto de 4 bits se gera uma representação de posição absoluta de 16 valores – ver exemplos da Figura 13. A grande vantagem do *encoder* absoluto é que, em qualquer momento, independente, por exemplo, de uma queda de energia, é possível saber a posição do dispositivo sem precisar ressincronizar a posição.

Figura 13 - Discos de *Encoders* Absolutos

Fonte: (HITECNOLOGIA, 2020)

2.3.4 *Encoder* aplicado na Planta Piloto de vazão

O *encoder* usado é o modelo incremental DFS60B-THPA10000 da Sick, ajustado para 500 pulsos por volta, com eixo vazado de 15 mm de diâmetro. Usa-se um conector M23 (vide Figura 14) para ligar o *encoder* ao SDCD. Listam-se os sinais na Figura 15. Foi utilizado um cabo de dois pares, com a ligação conforme a Tabela 1.

Figura 14 - Conector M23

View of M23 male device connector on encoder

Fonte: (SICK, 2016)

Tabela 1 - Ligação do *encoder*

	Sinal	Pino	TU810
Par 1 – Branco	Sinal A	5	C1
Par 1 – Preto	Sinal $\bar{A}$	6	A1
Par 2 – Branco	24VDC	12	L2+
Par 2 – preto	0V	10	L2-

Fonte: Autor

Figura 15 - Sinais do encoder

PIN, 12-pin, M23 male connector	Color of the wires for encoders with cable outlet	TTL/HTL signal	Sin/cos 1.0 V _{ss}	Explanation
6	Brown	$\bar{A}$	COS-	Signal wire
5	White	A	COS+	Signal wire
1	Black	$\bar{B}$	SIN-	Signal wire
8	Pink	B	SIN+	Signal wire
4	Yellow	$\bar{Z}$	$\bar{Z}$	Signal wire
3	Violet	Z	Z	Signal wire
10	Blue	GND	GND	Ground connection of the encoder
12	Red	+U _s	+U _s	Supply voltage (volt-free to housing)
9	-	n.c.	n.c.	Not assigned
2	-	n.c.	n.c.	Not assigned
11	-	n.c.	n.c.	Not assigned
7 ¹⁾	-	O-SET ¹⁾	n.c.	Set zero pulse ¹⁾
Screen	Screen	Screen	Screen	Screen connected to housing on encoder side. Connected to ground on control side.

Fonte: (SICK, 2016)

2.3.5 Cartão DP820

O *encoder* foi ligado ao cartão DP820 da ABB, que tem dois canais independentes para leitura de sinais de 0,25 a 1,5 MHz. Na Figura 16 se vê um exemplo de ligação, que é feita através de um terminal ABB TU810.

Figura 16 - Diagrama de interligação do encoder

Fonte: (ABB, 2013)

2.3.5.1 Configuração do cartão DP820

O motor possui rotação nominal de 1725 RPM ou 28,75 rev/s [Hz]. Nesta condição o cartão irá receber uma frequência de:

$$f = 500 \cdot 28,75 = 14375 \text{ Hz ou } 14,375 \text{ kHz} \quad (1)$$

Conforme recomenda o manual do cartão, deve ser ajustada a escala da frequência de leitura da seguinte maneira:

$$\min = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{F_2 - F_1} * (F_{\min} - F_1) \quad (2)$$

$$\max = A_2 + \frac{A_2 - A_1}{F_2 - F_1} * (F_{\max} - F_2) \quad (3)$$

Em que

A_1 = valor mínimo da unidade de processo em valores de engenharia. $A_1 = 0$ RPM

A_2 = valor máximo da unidade de processo em valores de engenharia. $A_2 = 1725$ RPM

F_1 = Frequência na entrada do cartão em A_1 . $F_1 = 0$ Hz

F_2 = Frequência na entrada do cartão em A_2 . $F_2 = 14375$ Hz

$F_{\min}$ = Frequência de entrada mínima do cartão. $F_{\min} = -1,5$ MHz

$F_{\max}$ = Frequência de entrada máxima do cartão. $F_{\max} = 1,5$ MHz

Substituindo os valores, $\min = -180000$ e $\max = 180000$. Estes valores são inseridos na configuração do cartão através do *software* de programação *Control Builder*.

2.4 COMPRESSOR DE AR

O compressor de ar tipo pistão, modelo Bravo CSL10 do fabricante Schulz, visto na Figura 17, fornece ar comprimido para o acionamento das válvulas de controle. Há um reservatório com capacidade de 100 litros que acumula ar comprimido e uma válvula que controla a partida e a parada do compressor, garantindo um valor de pressão adequado.

Figura 17 - Compressor da Schulz

Fonte: Autor

2.5 MEDIDORES DE VAZÃO INSTALADOS NA PLANTA PILOTO DE VAZÃO

2.5.1 Medidor de vazão mássica (FIT-10B)

O medidor de vazão mássica (FIT-10B) da Figura 18, é o modelo Proline Promass 83F da Endress+Hauser. Ele usa o princípio de medição por efeito Coriolis, que permite a medição direta da vazão mássica. Ele possui tubos internos que oscilam continuamente mediante um sistema de excitação. Quando há escoamento de fluido, cria-se um torque de torção nos tubos e sensores instalados no início e fim do tubo captam a diferença de fase do movimento, a qual é função da vazão mássica do fluido. Há um terceiro sensor que mede a frequência das oscilações, que é uma função da densidade do fluido (ENDRESS+HAUSER, 2020). A Figura 19 ilustra o funcionamento desse medidor.

Figura 18 - Medidor de vazão mássica Coriolis

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

Figura 19 - Funcionamento do medidor de vazão Coriolis

FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO → DENSIDADE DO FLUÍDO

DEFASAGEM → VAZÃO MÁSSICA

Fonte: (MARQUES, 2017)

O transmissor de vazão Coriolis indica em seu display a vazão mássica de água que passa pelo tubo, bem como a temperatura e a densidade do fluido. A partir dessas informações, ele calcula a vazão volumétrica. Ele também envia as medições para a tela de controle no computador (vide Figura 20) através da rede Fieldbus Foundation. Sua precisão da medição de vazão é de $\pm 0,1\%$, podendo chegar a $\pm 0,05\%$ em alguns modelos. Ele também realiza a medição de temperatura para compensar o efeito da temperatura na medição. (ENDRESS+HAUSER, 2009).

Figura 20 - Informações do medidor de vazão Coriolis no supervisório

FIT-10M	14418.8 kg/h
FIT-10V	14.45 m ³ /h
DIT-20	0.997 g/cm ³
TIT-20	21.8 °C

Fonte: Autor

2.5.2 Placa de orifício (FE-10)

A vazão também pode ser medida por um elemento deprimogênio de vazão: uma placa de orifício (FE-10) fornecida pela Digitrol, tipo concêntrico com orifício de 36,32 mm de diâmetro, como na Figura 21. Ela está instalada entre flanges, como na Figura 22.

Figura 21 - Placa de orifício

Fonte: (MORA, 2014)

Figura 22 - Placa de orifício entre flanges com tomadas de pressão

Fonte: (MORA, 2014)

Como o fluido que escoar na tubulação é água em condições ambiente, podemos considerá-la incompressível (sua massa específica é constante). Assim, a vazão mássica e a vazão volumétrica são as mesmas antes da placa, na placa e após ela, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Princípio da conservação de massa

Fonte: (MARQUES, 2017)

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \stackrel{\rho \text{ cte}}{\implies} Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (4)$$

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = v_3 \cdot S_3 \quad (5)$$

em que $\dot{m}_i$ representa a vazão mássica, Q_i é a vazão volumétrica, S_i é a seção transversal e v_i é a velocidade média do fluido.

A placa de orifício aumenta a velocidade do fluido, reduzindo a área da seção para criar uma diferença de pressão ΔP (vide Figura 24). Este diferencial de pressão é lido por um transmissor de pressão diferencial.

Figura 24 - Funcionamento da placa de orifício

Fonte: (HARAOKA; KAWAMORITA, 2017)

2.5.3 Transmissores de pressão diferencial da Yokogawa (FIT-10A e FIT10D)

Os transmissores de pressão diferencial da Yokogawa (FIT-10A e FIT-10D) medem a diferença de pressão à montante e à jusante da placa de orifício FE-10. Uma vez inseridos os dados da placa nos transmissores, eles estimam a vazão pelo valor da diferença de pressão, de acordo com a Equação de Bernoulli, descrita de forma simplificada pela Equação (6), em que a vazão é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial.

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (6)$$

Os transmissores medem a vazão pelos tubos em seus displays e enviam esse dado para a tela de supervisão. Eles aparecem na Figura 25, onde o da esquerda é o modelo Yokogawa DPHarp EJX110A Type S1, que envia um sinal de 4-20 mA e o da direita é o modelo Yokogawa DPHarp EJA110A Type S, que usa a rede Fieldbus Foundation.

Figura 25 - Transmissores de pressão diferencial da placa de orifício

Fonte: (MESQUITA; RIOS, DESVAGES, 2018)

2.6 VÁLVULAS DE CONTROLE E SOLENÓIDES E SEUS ACESSÓRIOS

2.6.1 Válvulas de controle ET da Fisher (FV-11 e FV-12)

Uma válvula com haste deslizante tem 2 partes principais: atuador e corpo. Há dois tipos de corpo: globo e angular, como ilustrado na Figura 26. Corpos globo têm a entrada/saída no mesmo eixo e corpos angulares têm a entrada/saída em eixos perpendiculares (FISHER, 2020a).

Figura 26 – Corpos do tipo globo (*globe*) e angular (*angle*)

Fonte: (FISHER, 2020a)

Interno às válvulas há gaxetas (anéis de vedação) para impedir que o fluido do processo vazze pelo orifício de passagem da haste da válvula. Válvulas com gaxetas de grafite são indicadas para aplicações com radiação, com temperatura acima de 232°C ou temperaturas criogênicas abaixo de -198°C . São menos suscetíveis a vazamento, mas seu problema é produzir um alto atrito na haste, gerando histerese. As válvulas com gaxetas de teflon operam na faixa de temperatura de -40°C a 232°C e geram pouco atrito com a haste (EMERSON, 2019).

As válvulas de controle FV-11 e FV-12 são do tipo globo de 2", modelo ET da Fisher/Emerson. Elas são movimentadas através de atuadores modelo 657 da Emerson, que são atuadores de diafragma de ação direta opostos por mola. A ação do atuador é explicada na Figura 27 e as partes que compõem o atuador são mostradas na Figura 28.

Figura 27 – Modo de operação do atuador 657 da Fisher

Fonte: (FISHER, 2018)

A Figura 29 mostra as possíveis características de entrada de uma válvula de controle: porcentagem linear, igual porcentagem ou abertura rápida. Esta característica representa a relação entre o *Set Point* enviado para válvula e a posição desejada da válvula. Neste trabalho são utilizadas válvulas com característica igual porcentagem.

Figura 28 – Componentes do atuador 657 da Fisher

Fonte: (FISHER, 2018)

Figura 29 – Características de entrada de uma válvula de controle

Fonte: (FISHER, 2009)

Figura 30 - Válvulas de controle, de perturbação e válvulas manuais

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

À direita da Figura 30 são exibidas as válvulas manuais de três vias, que selecionam se a válvula é operada pelo conversor I/P, pelo posicionador digital ou ainda pelo posicionador eletropneumático. O curso da haste das válvulas é de 1 1/8", isto é, 28,58 mm.

2.6.2 Válvula GLS da Valtek (FV-13)

A válvula FV-13 (Figura 30 ao centro) é modelo GLS da Valtek usada para inserir perturbações no sistema, para que possam ser feitos estudos de rejeição de perturbação na malha de controle de vazão. É operada com sinais de pressão de 3 a 15 psi com um atuador do tipo cilindro e pistão de dupla ação com mola para retorno em caso de falha.

2.6.3 Transmissores de pressão diferencial da Yokogawa (PDT-15A e PDT-15B)

Cada uma das válvulas de controle é equipada com um transmissor de pressão diferencial (PDT-15A e PDT-15B) da Yokogawa, que medem a diferença de pressão à montante e à jusante da válvula, como visto nas Figuras 31 e 32. Esta informação é útil para calcular a perda de carga nas válvulas de controle.

Figura 31 - Tomadas de pressão à montante e à jusante nas válvulas de controle

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

Figura 32 - Transmissores de pressão diferencial das válvulas de controle

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

2.6.4 Conversores I/P 846 da Emerson (FY-11 e FY-12)

Os conversores I/P convertem sinais em corrente em sinais pneumáticos. Eles são usados para operar diretamente as válvulas de controle ou prover um sinal pneumático para um posicionador. As válvulas de controle têm um conversor I/P modelo 846 da Emerson (FY-11 e FY-12) e seu funcionamento é descrito em (FISHER, 2020b). O sinal de corrente é aplicado em uma armadura, que gera um campo eletromagnético que move uma haste. Ligada à haste, há uma palheta que pressiona um bico. Quando a corrente cresce, o magnetismo faz a haste se mover mais próximo à armadura e faz a palheta se aproximar do bico, aumentando a pressão de saída. A Figura 33 mostra a sua operação.

Figura 33 - Funcionamento do conversor I/P

Fonte: (FISHER, 2005)

O conversor I/P da Figura 34 tem seus detalhes citados em (FISHER, 2015). Ele converte um sinal de entrada de 4 a 20 mA em um sinal de saída de 6 a 30 psi.

Figura 34 - Conversor I/P modelo 846 da Fisher

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

2.6.5 Posicionadores Eletropneumáticos 3528i da Fisher (ZC11E e ZC12E)

Posicionadores são dispositivos que permitem regular com precisão as válvulas de controle em um ponto de ajuste desejado. Todos os posicionadores requerem dois sinais para operar: entrada e realimentação. A entrada é o sinal de controle que provê o *set point* e a realimentação indica a posição atual da válvula (FISHER, 2020c).

A primeira parte do posicionador é um conversor I/P que converte o sinal elétrico (4-20 mA) em um sinal de pressão (6-30 psi). A segunda parte recebe como entrada o sinal pneumático que é conduzido para um fole. À medida que a entrada cresce, o fole se expande e movimenta uma barra que faz uma palheta se aproximar do bico. Isto provoca um aumento da pressão na saída para o atuador que faz a haste se mover. O movimento da haste é realimentado à barra por uma came que faz a barra girar de modo a mover a palheta para fora do bico. O movimento da haste cessa quando ocorre um equilíbrio entre as forças sobre a barra (FISHER, 2012).

O posicionador concede à válvula a capacidade de superar o atrito da válvula e outras forças que causam desvios de posição. Outros benefícios são acomodar sinais de controle não compatíveis, garantir o fechamento apropriado da válvula e mudar as características de ganho da válvula de controle (FISHER, 2020c).

Cada uma das válvulas de controle possui um posicionador eletropneumático modelo 3582i da Fisher-Emerson (ZC11E e ZC12E), o qual pode ser visto na Figura 35 e seus principais elementos são descritos na Figura 36.

Figura 35 - Posicionador eletropneumático modelo 3582i da Fisher-Emerson

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

Figura 36 - Descrição do posicionador eletropneumático modelo 3582i da Fisher-Emerson

Fonte: (FISHER, 2012)

A operação do posicionador eletropneumático pode ser descrito por quatro ganhos: o ganho do conversor I/P, o ganho de conversão da pressão em deslocamento no fole, o ganho de conversão do deslocamento da haste em deslocamento da cames e o ganho de controle. O diagrama da Figura 37 ilustra o comportamento do posicionador eletropneumático, o qual efetua um controle do tipo proporcional da posição da haste da válvula.

Figura 37 - Diagrama de blocos do posicionador eletropneumático

Fonte: (DESVAGES; RIOS, 2018)

2.6.6 Posicionadores Digitais DVC6000 da Fisher (ZT-11D e ZT-12D)

Posicionadores digitais de válvulas, assim como posicionadores eletropneumáticos, incorporam um conversor I/P. No entanto, o posicionador digital usa um microprocessador para gerar um controle mais preciso da válvula, que elimina alguns componentes mecânicos de um posicionador tradicional, pois compara os sinais de entrada e realimentação

eletronicamente. Ele pode usar protocolos de comunicação como *Hart*, *Foundation Fieldbus* e *Profibus* (FISHER, 2020d). O *set point* é enviado diretamente ao microprocessador. A realimentação da posição da válvula é enviada ao microprocessador por um sensor eletrônico (*Travel Sensor*). Os sinais de entrada e realimentação são comparados para definir o erro e o microprocessador calcula a saída para corrigir o erro (*Drive Signal*). O relé pneumático envia ar para mover a haste da válvula (FISHER, 2005; FISHER, 2009).

As válvulas de controle têm um posicionador digital DVC-6000f da Fisher/Emerson (ZT-11D e ZT-12D) operando com protocolo de comunicação FF (vide Figura 38).

Figura 38 - Posicionador digital DVC6010f da Fisher-Emerson

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

A estrutura dos posicionadores é exibida na Figura 39 e o diagrama de blocos é apresentado na Figura 40.

Figura 39 - Diagrama funcional do posicionador digital DVC6000

Fonte: (FISHER, 2005)

Figura 40 - Diagrama de blocos do posicionador digital DVC6000

Fonte: (FISHER, 2005)

O sinal enviado ao atuador é composto pelos seguintes componentes:

- Um sinal proporcional ao erro de posicionamento, de ganho K .
- Um sinal integral do erro de posicionamento, de ganho K_i , moderado por uma zona morta.
- Um sinal proporcional à velocidade da haste, de ganho K_x .
- Um sinal proporcional à pressão enviada ao atuador da válvula K_{ml} .

Para que o posicionador digital funcione corretamente, é necessário escolher dentre doze sintonias de fábrica ou escolher os parâmetros de acordo com a experiência do usuário (modo expert). A Tabela 2 mostra o valor dos ganhos de cada sintonia.

A Tabela 3 exibe o ajuste básico recomendado para cada tipo de atuador. Como nas válvulas de controle da planta são utilizados atuadores tipo mola e diafragma, modelo 657, com 40" de tamanho, a sintonia recomendada e utilizada neste trabalho é a "K".

Tabela 2 – Ganhos para sintonias do posicionador digital

Tuning Set	Travel			Pressure		
	Proportional Gain	Velocity Gain	Minor Loop Feedback Gain	Proportional Gain	Integrator Gain	Minor Loop Feedback Gain
B	2.0	3.0	35	0.5	0.3	35
C	4.4	3.0	35	2.2	0.1	35
D	4.8	3.0	35	2.4	0.1	35
E	5.5	3.0	35	2.8	0.1	35
F	6.2	3.1	35	3.1	0.1	35
G	7.2	3.6	34	3.6	0.1	34
H	8.4	4.2	31	4.2	0.1	31
I	9.7	4.8	27	4.8	0.1	27
J	11.3	5.6	23	5.6	0.1	23
K	13.1	6.0	18	6.6	0.1	18
L	15.5	6.0	12	7.8	0.1	12
M	18.0	6.0	12	9.0	0.1	12
X (Expert)	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: (FISHER, 2009)

Tabela 3 – Informação do atuador para ajuste básico

Actuator Model	Actuator Size	Actuator Style	Starting Tuning Set	Feedback Connection	Travel Sensor Motion (Relay A or C) ⁽¹⁾
585C & 585CR	25 50, 60 68, 80 100, 130	Piston Dbl w/ or w/o Spring. See actuator instruction manual and nameplate.	F J L M	SSstem Pot for travels up to 4 inches. SSstem Roller Pot for longer travels	Depends upon pneumatic connections. See description for Travel Sensor Motion
657	30 34, 40 45, 50 46, 60, 70, 76, & 80-100	Spring & Diaphragm	H K L M	SSstem Pot	Clockwise

Fonte: (FISHER, 2009)

2.6.7 Sensores de posição LVDT (ZT-11A e ZT-12A)

Para medir a posição da haste das válvulas de controle, são usados sensores de posição do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) (ZT-11A e ZT-12A). Esses sensores, Figura 41, alocados na parte traseira das válvulas FV-11 e FV-12, indicam a posição da haste das mesmas. O corpo do sensor LVDT é preso ao corpo da válvula, enquanto um núcleo ferromagnético é preso à parte móvel da válvula (haste). O núcleo penetra mais ou menos no corpo do sensor de acordo com a posição da haste. O sensor possui três bobinas, onde apenas uma é energizada com uma tensão AC, chamada de bobina primária. Nas outras duas bobinas são induzidas tensões pelo campo gerado pela bobina primária. A diferença entre as tensões das bobinas varia em amplitude e fase, dependendo da posição do núcleo ferromagnético. Estes sensores são ligados a transmissores específicos, pois recebem e enviam sinais AC de alta frequência e cabe a estes transmissores fornecer a alimentação na frequência correta e converter o sinal referente à posição para um sinal de 0 a 10 V_{CC} (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018).

Figura 41 - Sensor de posição LVDT

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

Para interfacear com os sensores de posição, utilizam-se condicionadores de sinais modelo LVC2500 da Macro Sensors, conforme Figura 42. Estes condicionadores usam a alimentação de 24 V_{CC} para criar uma senoide com baixa distorção para excitar o sensor LVDT. Ao mesmo tempo eles convertem o sinal AC que retorna deste sensor para 0 a 10 V_{CC}. Em sua parte frontal, há dois parafusos para realizar ajuste de zero e *span* do medidor, de forma que todo o curso da haste fique dentro da faixa de 0 a 10 V_{CC}.

Figura 42 - Condicionadores de sinais LVC2500

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

2.6.8 Medidores de Pressão S-10 da Wika (PT-11 e PT-12)

Para medir a pressão no atuador das duas válvulas de controle, usam-se medidores de pressão modelo S-10 da Wika (PT-11 e PT-12), alocados na linha de entrada do ar para o atuador, como mostrado na Figura 43. Sua faixa de medição é de 0 a 2,5 bar com sinal de 0 a 10 V_{CC}. Vale lembrar que as válvulas operam de 6 a 30 psi e, por isso, o sensor indica um sinal de 1,655 a 8,274 V. Em casos em que se deseje trabalhar com valores de 0 a 100%, uma conversão no *software* do SDCD é necessária.

Figura 43 - Medidor de pressão no atuador das válvulas de controle - modelo S-10 da Wika

Fonte: Autor

2.6.9 Válvulas Solenoides 8210-100 da Ascova (FV-14, FV-15, FV-16)

Há três válvulas de bloqueio na planta, do tipo válvulas solenoide modelo 8210-100 da Ascova (FV-14, FV-15, FV-16). A válvula solenoide, Figura 44, tem uma armadura em forma de cilindro envolvida por uma bobina que gera um campo eletromagnético quando uma corrente elétrica circula por ela. Este campo gera uma força no centro da válvula, fazendo com que o êmbolo seja acionado, abrindo assim a válvula. Ao interromper a corrente, o êmbolo retorna pela força de uma mola, fechando a válvula (MINDSET, 2020).

Figura 44 - Válvula solenoide FV-16

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

Na Figura 45 se vê o diagrama interno da válvula nas posições fechado e aberto e indica a simbologia usada. As válvulas são do tipo 2/2 vias normalmente fechadas (NF).

Figura 45 – Partes constituintes e simbologia da válvula solenoide

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

As três válvulas solenoides presentes na planta são apresentadas na Tabela 4. Em operação normal, as válvulas FV-14 e FV-16 devem ficar abertas e a FV-15 fechada. A válvula FV-15 só deve ser aberta em caso de substituição da água do circuito hidráulico.

Tabela 4 - Válvulas solenoide da Planta Piloto de Vazão

Válvula	Função
FV-14	Válvula de entrada
FV-15	Válvula de dreno
FV-16	Válvula de saída

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

Os dispositivos da planta piloto são conectados através de tubulações de PVC da Tigre com diâmetro nominal de 2 polegadas. A planta tem 34,53m de trecho reto de tubulação e também conexões de linha tipo T, curvas e joelhos, intituladas singularidades.

2.7 SISTEMAS DE CONTROLE, DE PROTEÇÃO E DE MONITORAÇÃO

2.7.1 SDCCD ABB 800xA

O controle da Planta Piloto de Vazão é feito pelo Sistema 800xA da ABB, que é um SDCCD – Sistema Digital de Controle Distribuído. É uma plataforma de automação com comissionamento e estratégia de operação para o processo, geração de energia, sistemas elétricos e segurança em um único, redundante e confiável sistema, facilitando a colaboração pré-integrada de aplicações como historiador, gerenciamento de alarmes, ativos e batelada, sendo um sistema de alta confiabilidade para processos industriais (ABB, 2019).

A Figura 46 mostra o *hardware* do SDCCD, que é composto por:

- 1 módulo Foundation Fieldbus CI860
- 1 CPU AC 800M PM861
- 1 módulo de saída analógica com 8 canais - AO810 0..20mA
- 1 módulo de entrada analógica com 8 canais - AI810 0..20mA ou 0..10V
- 1 módulo de saída digital com 16 saídas - DO810 24V
- 1 módulo de entrada digital com 16 entradas - DI810 24V
- 1 módulo de contagem rápida com 2 canais – DP820

Figura 46 - SDCCD 800xA da ABB

Fonte: Autor

O Apêndice D mostra as telas de operação criadas no Sistema 800xA.

2.7.2 CLP Rockwell SLC500

Na década de 1960, os circuitos integrados permitiram desenvolver minicomputadores para controlar processos industriais. Em 1968 surgiram os primeiros controladores especificados pela General Motors. Na década de 1970, os controladores passaram a ter microprocessadores e foram intitulados Controladores Lógicos Programáveis (CLP) (MORAES; CASTRUCCI, 2013). As principais características dos atuais CLPs são:

- Várias linguagens de programação, segundo a norma IEC1131-3, tais como Linguagem Escada (*Ladder*), Lista de instruções (*Instruction List*), Texto estruturado (*Structured Text*), Diagrama de Blocos de Função (*Function Block Diagram*) e Diagrama Sequencial (*SFC - Sequential Flow Chart/Grafcet*). Tal diversidade significa um sistema bastante amigável com o programador.
- Simplificação dos painéis elétricos, pois toda fiação do comando fica resumida a um conjunto de entradas e saídas.
- Confiabilidade operacional, já que modificações não requerem alterações da fiação elétrica, reduzindo chance de erros e grandes paradas no processo produtivo.

A Planta Piloto de Vazão contém o CLP modelo SLC 500 da Rockwell Automation, visto na Figura 47, o qual é responsável pelas funções de segurança da planta, como:

- Evitar que a bomba opere sem água na caixa d'água. Esta possui uma chave de nível que indica para o CLP se tem água na mesma.
- Evitar a planta operar com as válvulas solenoide bloqueando o fluxo de água.
- Caso o inversor envie um sinal de falha ou sobrecarga, o motor é desligado.
- Caso as válvulas de controle reduzam a vazão para um valor inferior a 4,5 m³/h, o motor é desligado, evitando uma pressão excessiva na tubulação.

Figura 47 - CLP modelo SLC 500 da Rockwell

Fonte: Autor

A configuração de *hardware* do CLP consiste em:

- 1 chassi com 4 slots - 1746-A4;
- 1 fonte de alimentação - 1746-P2;
- 1 CPU SLC 5/04 1747-L541;
- 1 módulo com 16 entradas digitais - 1746-IB16;
- 1 módulo com 16 saídas digitais - 1746-OB16;
- 1 módulo com 2 entradas e 2 saídas analógicas - 1746-NIO4I 4-20mA ou 0-10V.

2.7.3 Placa de Aquisição da NI PCI6229

Um modo de coletar dados do processo é pela placa de aquisição de dados modelo PCI6229 da NI, como se vê na Figura 48, na qual são ligadas entradas e saídas analógicas de 0 a 10 Vcc. Esta placa é ligada na placa mãe de um computador por um *slot PCI Express*. Para conectar os sinais de campo ao computador, é necessário utilizar um bloco de conexão CB-68LPR e cabos seriais SHC68-68-EPM, ambos visíveis na Figura 49.

Figura 48 - Placa de aquisição de dados PCI6229 da NI

Fonte: (ARTISAN, 2020)

Figura 49 - Bloco de conexão da placa de aquisição de dados da National Instruments

Fonte: (MESQUITA; RIOS; DESVAGES, 2018)

No computador deve ser instalado o *software NI-DAQmx*, que tem os *drivers* requeridos para o correto funcionamento da placa. Uma aplicação criada em *Simulink* permite a leitura e armazenamento dos sinais ligados na placa (ver Apêndice B), na qual a taxa de leitura foi ajustada em 100 ms. Demais características da placa são vistas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características da placa National PCI-6229

Family	Bus	Analog Inputs	Analog Input Resolution (bits)	Analog Outputs (AO)	AO Resolution (bits)	Max AO Rate (kS/S)	AO Range (V)	Digital I/O	Correlated (clocked) DIO
NI 6229	PCI, PXI, USB	32	16	4	16	833	±10	48	32, up to 1 MHz

Fonte: (NI, 2014)

A placa de aquisição foi utilizada para alguns ensaios degrau. Porém, a maioria dos experimentos se utilizou o *PI System*.

2.7.4 Sistema PIMS Osisoft PI

O *PI System* é uma aplicação historiadora de dados em tempo real desenvolvido pela Osisoft, muito usado na indústria e recentemente adquirido pela AVEVA (AVEVA, 2020). Ele é um sistema PIMS (*Plant Information Management System*) que visa coletar, armazenar e disponibilizar dados históricos do processo (GODOY, 2011). Esta ferramenta é amplamente usada em indústrias do mundo todo, com eficiência comprovada ao longo de 40 anos em mais de 19000 aplicações (OSISOFT, 2020).

Esse sistema apresenta quatro vantagens principais em relação ao conjunto *MATLAB®* - Placa de aquisição da *National Instruments*:

- Registra todos os dados acessíveis do SDCD, enquanto a placa de aquisição é limitada em 32 entradas analógicas e 4 saídas analógicas.
- Garante o tempo real da aquisição, o que o *MATLAB®* não consegue garantir.
- Os dados apresentam pouco ruído, ao contrário dos dados medidos a partir da placa da *NI*.
- Os dados de todos os ensaios são registrados automaticamente e guardados por um tempo indefinido (até que se ocupe um espaço configurado no HD, instante no qual os dados mais antigos passam a ser excluídos).

Os dados do SDCD são coletados via protocolo OPC (*Open Platform Communications*) com taxa de *scan* de 200ms.

3 MODELO APROXIMADO DA PLANTA PILOTO DE VAZÃO E SINTONIA DO CONTROLADOR PI

3.1 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

O conhecimento do comportamento dinâmico de um processo é útil para escolher o tipo de controlador mais adequado. Este conhecimento se traduz na forma de um modelo de processo, a partir do qual se pode analisar o sistema de controle. Baseado no modelo, alguns métodos são aplicáveis para analisar o desempenho do sistema (GARCIA, 2017).

Existem duas formas de se obter o modelo matemático de um sistema. A primeira é a modelagem fenomenológica, a qual é baseada em modelos teóricos baseados na química e na física do sistema. Este trabalho irá abordar a segunda forma, que é um modelo empírico a partir de dados experimentais, chamado de modelo “caixa preta”. A técnica para obter tais modelos é chamada Identificação de Sistemas (GARCIA, 2005).

A identificação de sistemas pode ser dividida em identificação paramétrica e não paramétrica (AGUIRRE, 2015). Optou-se pela identificação não paramétrica, que gera bons modelos aproximados de baixa ordem, que descrevem o comportamento dinâmico do processo e servem para efetuar a pré-sintonia de controladores PID (GARCIA, 2017). Os sinais de teste comumente usados para definir os modelos empíricos são impulso, degrau, rampa, senoide, PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) e GBN (*Generalized Binary Noise*) (GARCIA, 2017). Neste trabalho, foi usada a resposta ao degrau, caso em que os parâmetros do modelo são estimados a partir da resposta em malha aberta e a estimação dos parâmetros é feita via análise gráfica da curva e cálculos simples (SMITH, 1972). A resposta do processo ao degrau é intitulada curva de reação do processo.

3.2 MODELOS APROXIMADOS DA PLANTA

A obtenção do modelo aproximado da planta foi feita a partir de sua reação à aplicação de uma entrada em degrau no sinal de saída do controlador em manual. A partir da análise da resposta ao degrau foi possível obter um modelo aproximado de primeira ordem com tempo morto. Os três parâmetros do modelo são:

- O tempo morto θ : calculado como o tempo entre o instante do degrau e o instante que a vazão começa a mudar de valor.
- O ganho K é a razão:

$$K = \frac{\text{variação saída}/\text{span saída}}{\text{variação entrada}/\text{span entrada}} \quad (7)$$

- A constante de tempo τ : corresponde ao instante em que a variação na saída atinge $1 - e^{-1} \approx 63,2\%$ do seu valor total.

Obtém-se a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{1 + \tau s} \quad (8)$$

em que o sinal de entrada é o *setpoint* para fechamento das válvulas de controle ou referência para o inversor de frequência e a saída é a vazão de água.

Também foi calculado o fator de incontrolabilidade F_c , definido como θ/τ . O fator F_c é uma indicação da qualidade do controle que se pode esperar. Quanto maior F_c , mais difícil é controlar o processo (GARCIA, 2017).

3.2.1 Medição de vazão

A Planta Piloto de Vazão dispõe de três instrumentos para a medição de vazão:

- Uma placa de orifício ligada a um transmissor de pressão diferencial com saída analógica 4 a 20mA (FIT-10A).
- Uma placa de orifício ligada a um transmissor de pressão diferencial com saída via protocolo FF (FIT-10D).
- Um medidor mássico por efeito Coriolis com saída via protocolo FF (FIT-10B).

Este último é mais preciso e em (DESVAGES; RIOS, 2018) se mostra que a constante de tempo da curva de reação ao degrau aumenta quando se considera a vazão medida pela placa de orifício, como mostra a Tabela 6. Por isso, o medidor de vazão mássico foi usado nos experimentos. Para a válvula de teflon com posicionador EP, a constante de tempo aumenta 423% quando se considera o valor da vazão indicado na placa de orifício.

Tabela 6 – Constante de tempo para a válvula de teflon – medidor Coriolis x placa de orifício

	Coriolis τ (s)	Placa de orifício τ (s)
Posicionador EP	0,95	3,07
Posicionador FF	1,36	3,24
Conversor I/P	0,73	3,32

Fonte: (DESVAGES; RIOS, 2018)

Uma das razões para o transmissor ligado à placa de orifício ser mais lento é a presença de filtros em sua configuração. Para uma melhor avaliação, é necessária uma assistência técnica do fabricante do instrumento.

3.2.2 Elementos finais de controle

Os elementos finais de controle são:

- A motobomba acionada por um inversor de frequência (FY-17).
- A válvula globo com gaxetas de teflon (FV-12)
- A válvula globo com gaxetas de grafite (FV-11)

Com relação às duas válvulas, estas podem ser acionadas através de:

- Um conversor corrente para pressão (IP) com entrada 4 a 20 mA (FY11 e FY12).
- Um posicionador eletropneumático (EP) com entrada 4 a 20 mA (ZC11E e ZC12E).
- Um posicionador digital com entrada via protocolo (FF) (ZC11D e ZC12D).

3.2.3 Ensaio degrau das válvulas

O ensaio degrau é iniciado ligando-se a bomba com uma rotação fixa e inserindo um sinal de abertura da válvula de 50%. Após a estabilização do valor da vazão, é aplicado um degrau de 10% para abrir a válvula em $t=100$ s, outro de retorno a 50% em $t=200$ s, um terceiro para o fechamento da válvula em 10% em $t=300$ s, seguido de um último de retorno a 50% em $t=400$ s. O teste é finalizado em $t=500$ s. Para cada experimento com posicionadores foram gerados três gráficos: da vazão da planta, da posição da haste medida pelo *LVDT* junto com a referência e da pressão no atuador da válvula, como mostram as Figuras 50 a 55. O período de amostragem usado foi de 100 ms. Estimou-se um modelo para cada conjunto (válvula + posicionador) e os parâmetros encontrados em cada experimento foram inseridos nas Tabelas 7 a 12. Esses parâmetros foram obtidos através do método gráfico ou análise gráfica da resposta ao degrau e o resultado é uma média dos parâmetros encontrados nos quatro degraus aplicados.

3.2.3.1 Ensaio degrau no posicionador EP da válvula de grafite

Figura 50 – Vazão, posição e pressão: válvula com gaxetas de grafite e posicionador EP

Fonte: Autor

Tabela 7 – Parâmetros do modelo – válvula de grafite com posicionador EP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K	θ/τ
Média	0,95	0,77	-0,97	1,24

Fonte: Autor

3.2.3.2 Ensaio degrau no posicionador FF da válvula de grafite

Figura 51 - Vazão, posição e pressão: válvula com gaxetas de grafite e posicionador FF

Fonte: Autor

Tabela 8 – Parâmetros do modelo – válvula de grafite com posicionador FF

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K	θ/τ
Média	1,13	0,84	-0,88	1,35

Fonte: Autor

3.2.3.3 Ensaio degrau no conversor IP da válvula de grafite

Nos testes com o conversor I/P foi preciso aplicar degraus maiores, pois a válvula de grafite não se movimentava com degraus inferiores a 23%. A sequência de degraus aplicada na válvula de grafite com conversor IP foi de 50% para 20%, 20% para 50%, 50% para 80% e 80% para 50% ao invés de 50% para 40%, 40% para 50%, 50% para 60%, 60% para 50%. Diferente dos posicionadores, a referência para o conversor IP é a pressão no atuador, não a posição da haste. O ensaio é mostrado na Figura 52.

Figura 52 – Ensaio degrau: válvula com gaxetas de grafite e conversor I/P

Fonte: Autor

Tabela 9 – Parâmetros do modelo – válvula de grafite com conversor IP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K	θ/τ
Média	1,28	4,71	-0,58	0,27

Fonte: Autor

3.2.3.4 Ensaio degrau no posicionador EP da válvula de teflon

Figura 53 - Ensaio degrau: válvula com gaxetas de teflon e posicionador EP

Fonte: Autor

Tabela 10 – Parâmetros do modelo – válvula de teflon com posicionador EP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K	θ/τ
Média	1,02	0,95	-0,92	1,07

Fonte: Autor

3.2.3.5 Ensaio degrau no posicionador FF da válvula de teflon

Figura 54 – Ensaio degrau: válvula com gaxetas de teflon e posicionador FF

Fonte: Autor

Tabela 11 – Parâmetros do modelo – válvula de teflon com posicionador FF

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K	θ/τ
Média	1,5	1,36	-0,86	1,1

Fonte: Autor

3.2.3.6 Ensaio degrau no conversor IP da válvula de teflon

Figura 55 – Ensaio degrau: válvula com gaxetas de teflon e conversor I/P

Fonte: Autor

Tabela 12 – Parâmetros do modelo – válvula de teflon com conversor IP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K	θ/τ
Média	1,63	0,73	-0,85	2,24

Fonte: Autor

3.2.3.7 Avaliação dos resultados dos degraus das válvulas

É possível notar uma não linearidade acentuada no comportamento da válvula de grafite com conversor IP. O primeiro degrau de 10% gerou uma variação absoluta de 0,62 m³/h na vazão, enquanto no terceiro degrau a variação na vazão foi de 7,85 m³/h. O tempo de acomodação do terceiro degrau foi próximo de 26s, enquanto do primeiro degrau ficou próximo a 1,3s. O patamar de 0 a 100s com 50% de abertura da válvula mostra 12 m³/h de vazão enquanto com a mesma abertura após 400s, a vazão medida foi cerca de 7,5m³/h. Este comportamento se deve ao atrito característico da válvula de grafite.

No caso da válvula de teflon com conversor IP também identificou-se uma não linearidade, porém menos expressiva. O primeiro degrau de 10% implicou em uma variação de 1,24 m³/h na vazão, contra 2,44 m³/h no terceiro degrau. O tempo de acomodação do terceiro degrau foi 3,6s, enquanto o do primeiro degrau foi 1,1s. O patamar de 0 a 100s com 50% de fechamento da válvula gera 12 m³/h de vazão e após 400s é de 7,5m³/h. Conclui-se que a válvula de teflon também apresenta atrito, porém inferior ao da válvula de grafite.

Todos os ensaios com posicionadores mostraram que não há alteração no valor do patamar de vazão em 50% (instantes 0 a 100s, 200 a 300s e 400 a 500s). É interessante comparar o comportamento da posição e da pressão. Nos patamares, os posicionadores buscam manter a posição fixa e para isso, podem variar a pressão consideravelmente. Os degraus em 300s e 400s provocam uma variação na vazão maior que os degraus em 100s e 200s. Este fato se deve à característica “igual porcentagem” das válvulas, ou seja, não há uma relação linear entre posição das válvulas e vazão de processo.

Os parâmetros dos modelos aproximados de primeira ordem com tempo morto de todas as configurações de válvulas estão agrupados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros obtidos nos ensaios degrau

		θ	τ	K	θ/τ
Válvula grafite	Posicionador EP	0,95	0,77	-0,97	1,24
	Posicionador FF	1,13	0,84	-0,88	1,35
	Conversor I/P	1,28	4,71	-0,58	0,27
Válvula teflon	Posicionador EP	1,02	0,95	-0,92	1,07
	Posicionador FF	1,50	1,36	-0,86	1,10
	Conversor I/P	1,63	0,73	-0,85	2,24

Fonte: Autor

O ganho negativo indica que há uma relação inversa entre posição da haste/pressão no atuador e vazão. Quanto maior o valor da posição/pressão, menor a vazão.

3.2.4 Ensaio degrau da motobomba

O ensaio degrau da motobomba inicia ao ligar a motobomba com uma referência de 70% para o inversor e todas as válvulas 100% abertas. Após a vazão estabilizar, aplica-se um degrau de 70% para 80% em $t=100$ s, outro de retorno a 70% em $t=200$ s, um terceiro de 70% para 60% em $t=300$ s, seguido de um de retorno a 70% em $t=400$ s.

Deferentemente das válvulas, em que o degrau foi aplicado em torno de 50% do sinal de abertura, o degrau na motobomba foi executado em torno de 70%, pois esta é considerada a região de operação para a bomba quando acionada pelo inversor.

Para este experimento foram gerados dois gráficos: da vazão da planta e da referência para o inversor junto com a rotação lida pelo encoder. O período de amostragem utilizado foi de 200 ms e o resultado do experimento é visto na Figura 56.

Figura 56 – Ensaio degrau: motobomba acionada pelo inversor

Fonte: Autor

Foi calculada a média dos parâmetros encontrados para os quatro degraus e o resultado se encontra na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros do modelo – motobomba acionada por inversor

	θ (s)	τ (s)	K	θ/τ
Média	1,55	1,1	0,846	1,41

Fonte: Autor

O comportamento do inversor se mostrou linear. Os ganhos foram muito similares, bem como a constante de tempo e o tempo morto. O valor de vazão com referência de 70% (instantes 0 a 100s, 200 a 300s e 400 a 500s) foi sempre próximo a 10,2 m³/h.

Notou-se que uma parte do tempo morto – em torno de 0,5 s – se deve ao inversor. Nele, há um parâmetro de 10 s de rampa de aceleração e 0 s de desaceleração do motor, que visa evitar altas correntes na rede durante partidas, paradas e alterações de velocidade do motor. O ganho positivo indica que há uma reação direta entre a rotação da bomba e a vazão. Quanto maior a rotação da bomba, maior a vazão.

3.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Após a identificação dos modelos da planta, é importante avaliar o quanto eles podem representar o sistema real. Para tanto, é utilizada a função *goodnessOfFit* do software *MATLAB*[®], a qual proporciona uma comparação entre os dados reais e de validação através das funções custo (MATHWORKS, 2020). A função custo adotada é a *Normalized root mean squared error* (NRMSE) a qual possui a seguinte equação:

$$custo = \frac{||xref(i) - x(i)||}{||xref(i) - mean(x(i))||} \quad (9)$$

em que $xref(i)$ é o vetor que contém os dados reais de processo, $x(i)$ é o vetor que contém o modelo de validação, $mean(x(i))$ é a função que extrai a média dos valores de $x(i)$, i representa cada elemento da amostra, com $i=1, \dots, N$, sendo N o número de amostras.

Para se obter um valor em porcentagem, no qual 100% representa um modelo perfeito e 0% representa um modelo ruim, é adotado o índice *fit* como:

$$fit = 100. (1 - custo) \quad (10)$$

Para realizar o experimento de validação, foi desenvolvido um programa em ambiente *Simulink* conforme mostra a Figura 57. Este programa permite trabalhar com a variável manipulada de forma incremental, aplicá-la à função de transferência e depois retornar à variável de processo em unidades de engenharia.

Figura 57 – Diagrama de blocos do modelo sendo validado

A Figura 58 mostra o processo feito no *Simulink* que transforma a variável manipulada em uma variável incremental. Primeiramente, divide-se o valor em unidades de engenharia pelo *span* e, em seguida é subtraído um valor para que a *MV* inicie em zero.

Figura 58 – *MV* incremental

Fonte: Autor

Para a validação, são propostos dois modelos: o primeiro é o modelo médio (em que os parâmetros são obtidos pela média dos valores encontrados nos quatro degraus) que será utilizado para a sintonia do controlador; o segundo é um modelo que utiliza parâmetros diferentes para os dois primeiros degraus e para os dois últimos degraus, denominado aqui modelo *split*. O resultado é mostrado de forma gráfica nas Figuras 59 a 65 e os parâmetros utilizados são indicados nas Tabelas 15 a 21.

Figura 59 – Validação do modelo da válvula de grafite com posicionador EP

Fonte: Autor

Tabela 15 – Parâmetros usados nos modelos da válvula de grafite com posicionador EP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 50-40-50	0,93	0,80	-0,80
Degraus 50-60-50	0,97	0,74	-1,14
Média	0,95	0,77	-0,97

Fonte: Autor

Figura 60 – Validação do modelo da válvula de grafite com posicionador FF

Fonte: Autor

Tabela 16 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de grafite com posicionador FF

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 50-40-50	1,13	0,83	-0,73
Degraus 50-60-50	1,13	0,85	-1,03
Média	1,13	0,84	-0,88

Fonte: Autor

Figura 61 – Validação do modelo da válvula de grafite com conversor IP

Fonte: Autor

Tabela 17 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de grafite com conversor IP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 50-20-50	1,1	1,7	-0,13
Degraus 50-80-50	1,5	7,7	-1,04
Média	1,28	4,71	-0,58

Fonte: Autor

Figura 62 – Validação do modelo da válvula de teflon com posicionador EP

Fonte: Autor

Tabela 18 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de teflon com posicionador EP

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 50-40-50	1,02	0,94	-0,72
Degraus 50-60-50	1,02	0,96	-1,13
Média	1,02	0,95	-0,92

Fonte: Autor

Figura 63 – Validação do modelo da válvula de teflon com posicionador FF

Fonte: Autor

Tabela 19 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de teflon com posicionador FF

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 50-40-50	1,5	1,35	-0,70
Degraus 50-60-50	1,5	1,36	-1,02
Média	1,5	1,36	-0,86

Fonte: Autor

Figura 64 – Validação do modelo da válvula de teflon com conversor I/P

Fonte: Autor

Tabela 20 – Parâmetros utilizados nos modelos da válvula de teflon com conversor I/P

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 50-40-50	1,64	0,73	-0,63
Degraus 50-60-50	1,62	0,73	-1,08
Média	1,63	0,73	-0,85

Fonte: Autor

Figura 65 – Validação do modelo da motobomba

Fonte: Autor

Tabela 21 – Parâmetros utilizados nos modelos da motobomba

	$\theta(s)$	$\tau(s)$	K
Degraus 70-80-70	1,70	1,1	0,86
Degraus 70-60-70	1,40	1,0	0,83
Média	1,55	1,1	0,85

Fonte: Autor

O índice *fit* dos modelos, obtido a partir da Equação 10, é visto na Tabela 22.

Tabela 22 – Índice fit dos modelos das curvas de reação

		Fit med (%)	Fit split (%)
Válvula grafite	Posicionador EP	80,85	89,44
	Posicionador FF	81,99	93,26
	Conversor I/P	7,72	29,62
Válvula teflon	Posicionador EP	77,35	91,45
	Posicionador FF	80,90	90,80
	Conversor I/P	63,07	72,09
Motobomba		91,04	91,57

Fonte: Autor

Em todos os casos testados, o modelo *split* teve um maior índice *fit* que o modelo médio, principalmente para as válvulas. É possível notar que o ganho do degrau de 50% para 60% nas válvulas é maior que o ganho do degrau de 50 para 40%, comportamento já esperado em razão da não linearidade das válvulas com característica igual porcentagem. Para os posicionadores, foi possível obter um *fit* do modelo *split* próximo a 90% ou maior que 90%. Os piores casos foram das válvulas com conversores IP, devido ao atrito das válvulas, mais acentuado na válvula com gaxetas de grafite.

Para a motobomba, ambos os modelos tiveram *fits* superiores a 90% e o aumento do *fit* foi muito pequeno no caso do *split*, o que mostra um comportamento mais linear.

3.4 CONTROLE PI DA VAZÃO

A equação do PID analógico clássico ou PID ISA é (GARCIA, 2017):

$$m(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) + m_0 \quad (11)$$

em que $m(t)$ é o sinal de saída do controlador, m_0 é o valor de $m(0)$, $e(t)$ é o erro de controle. Os parâmetros do PID são K_c = ganho proporcional, T_i = tempo integral e T_d = tempo derivativo. Sua função de transferência é:

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D \cdot s \right) \quad (12)$$

Segundo (GARCIA, 2017), o controlador PI é o mais usado na indústria de processos para controlar vazão. Os processos de vazão são geralmente muito rápidos e ruidosos, então a ação D de um controlador PID poderia amplificar o ruído em altas

frequências e atuações bruscas nos elementos finais de controle quando houvesse variações rápidas na variável controlada. Assim, optou-se por usar controladores PI.

Como dito anteriormente, a identificação da planta serve de base para se sintonizar um controlador. Na Tabela 13 nota-se que para todos os casos:

$$\theta/\tau \geq 0,2 \quad (13)$$

A Subseção 8.2.12 de (GARCIA, 2017) sugere que, nesse caso, o Método da Síntese Direta (ou Sintonia Lambda) é a melhor opção para sintonizar um controlador PI. Este método é eficiente para malhas de controle rápidas e auxilia na supressão de oscilações. Ele usa um modelo inverso do processo e cancelamento de polos e zeros para buscar o desempenho desejado em malha fechada, a mesma teoria em que se baseia o método IMC (*Internal Model Control*). No caso de modelo de 1ª ordem com tempo morto, a Síntese Direta fornece os mesmos parâmetros K_c e T_i que o método IMC. O controlador PI tem o ganho K_c e o tempo integral T_i exibidos na Tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros do controlador PI obtidos pela Síntese Direta

Modelo do processo $G(s)$	K_c	T_i
$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{1 + \tau s}$	$\frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)}$	τ

Fonte: (GARCIA, 2017)

Os parâmetros θ , τ e K são os já encontrados na curva de reação ao degrau. Na Síntese Direta, a velocidade de resposta da malha fechada é selecionável através do parâmetro τ_c . Se τ_c for pequeno, o controle será mais agressivo. Se τ_c for grande, o controle será mais suave. Neste trabalho, inicialmente foram escolhidos 3 valores de τ_c proporcionais a τ , utilizados em (GARCIA et al., 2012):

- controle mais agressivo: $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$
- controle mediano: $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$
- controle mais suave: $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$

As sintonias encontradas estão nas Tabelas 24 a 26. É possível ver que τ_c influencia apenas K_c . Quanto maior τ_c , menor K_c . O valor de T_i é sempre igual a τ .

Tabela 24 – Sintonias propostas de controladores PI – válvula de grafite

	x	$\tau_c = x\tau$	T_i	K_c
Posicionador EP	0,3	0,23	0,77	0,67
	0,5	0,38	0,77	0,60
	0,8	0,61	0,77	0,51
Posicionador FF	0,3	0,25	0,84	0,69
	0,5	0,42	0,84	0,62
	0,8	0,67	0,84	0,53
Conversor IP	0,3	1,41	4,71	3,02
	0,5	2,36	4,71	2,24
	0,8	3,77	4,71	1,61

Fonte: Autor

Tabela 25 - Sintonias propostas de controladores PI – válvula de teflon

	x	$\tau_c = x\tau$	T_i	K_c
Posicionador EP	0,3	0,29	0,95	0,86
	0,5	0,48	0,95	0,75
	0,8	0,76	0,95	0,63
Posicionador FF	0,3	0,41	1,36	0,83
	0,5	0,68	1,36	0,73
	0,8	1,09	1,36	0,61
Conversor IP	0,3	0,22	0,73	0,46
	0,5	0,36	0,73	0,43
	0,8	0,58	0,73	0,39

Fonte: Autor

Tabela 26 - Sintonias propostas de controladores PI – motobomba

	x	$\tau_c = x\tau$	T_i	K_c
Motobomba	0,3	0,33	1,10	0,69
	0,5	0,55	1,10	0,62
	0,8	0,88	1,10	0,54

Fonte: Autor

Sabe-se que um controlador é dito de ação direta quando um aumento de sinal da variável medida (variável controlada) provoca um aumento do seu sinal de saída. Já um controlador é dito de ação inversa quando um aumento de sinal da variável medida (variável controlada) provoca uma diminuição do seu sinal de saída (GARCIA, 2017).

Uma vez que as válvulas são do tipo ar para fechar, o PID das válvulas é de ação direta. Por outro lado, o PID da motobomba será de ação reversa, pois quando a vazão cresce em relação ao *Set Point*, o PID deve atuar para reduzir a rotação do motor.

4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS CONTROLADORES

Uma vez propostas as sintonias do controlador, deve-se analisar o desempenho das malhas e determinar as seguintes características (GARCIA, 2017):

- Estabilidade absoluta
- Condição da estabilidade relativa e comportamento da resposta transitória
- Desempenho em regime permanente

Um sistema é absolutamente estável se permanecer em repouso, a não ser quando excitado por fonte externa e retornará ao repouso se as excitações forem removidas.

A estabilidade relativa está relacionada com o comportamento da resposta transitória, que pode ser avaliada através dos seguintes critérios (OGATA, 2000):

- Sobressinal máximo (*maximum overshoot*, M_P): é o máximo valor de pico da curva de resposta medido a partir do valor final.
- Instante de pico (*peak time*, t_p): é o tempo para a resposta alcançar o primeiro pico do sobressinal.
- Tempo de subida (*rise time*, t_r): é o tempo para a resposta ir de 0% a 100% do valor final.
- Tempo de acomodação (*settling time*, t_s): é definido como o tempo requerido para a curva alcançar e permanecer dentro de uma faixa – em geral de 2 a 5% - em torno do valor final.
- Tempo de atraso t_d – é o tempo necessário para que a resposta alcance, pela primeira vez, a metade do valor final.

Graficamente, estas especificações podem ser visualizadas na Figura 66.

Para analisar o desempenho em regime permanente, pode-se utilizar o erro em regime estacionário e_{ss} , definido pela diferença entre o *set point* e o valor medido.

As seções seguintes mostram ensaios propostos em modo servo e regulatório, para avaliar os controladores propostos na Seção 3.4.

4.1 ENSAIOS NO MODO SERVO

Um sistema projetado para seguir um valor de referência que muda com certa frequência é chamado servo ou controle de rastreamento (CAMPOS, 2020). Neste trabalho foi proposto um ensaio em modo servo para avaliar o desempenho do controlador quando se altera o *set point*. O teste se inicia com o *set point* em $9 \text{ m}^3/\text{h}$. Após 100s é aplicado um degrau no *set point* para $8 \text{ m}^3/\text{h}$. No tempo $t=500\text{s}$, o *set point* retorna para $9\text{m}^3/\text{h}$. Em $t = 900\text{s}$, gera-se um terceiro degrau para $10\text{m}^3/\text{h}$ e em $t = 1300\text{s}$, ocorre o quarto degrau

retornando a $9\text{m}^3/\text{h}$. O teste é encerrado em $t = 1400\text{s}$. Para os ensaios em que o elemento de controle é a válvula, a rotação da bomba é mantida fixa em 80%, visando proporcionar uma vazão e pressão na tubulação menores e mais seguras para o laboratório. Para os ensaios usando o inversor de frequência, as válvulas são mantidas abertas.

Figura 66 – Curva de resposta ao degrau unitário mostrando t_d, t_r, t_p, M_p e t_s

Fonte: (OGATA, 2000)

Não foi possível ensaiar:

- a válvula de grafite com conversor IP com a sintonia $\tau_c = 0,3.\tau$
- a válvula de grafite com posicionador FF com as sintonias $\tau_c = 0,3.\tau$, $\tau_c = 0,5.\tau$ e $\tau_c = 0,8.\tau$
- a válvula de teflon com posicionador FF com as sintonias $\tau_c = 0,3.\tau$, $\tau_c = 0,5.\tau$ e $\tau_c = 0,8.\tau$

A razão é que a malha ficou muito oscilatória e, por segurança, esses testes foram interrompidos. No caso da válvula de teflon com posicionador FF, reduziu-se o ganho K_c até se obter uma baixa variabilidade do processo. Foram feitos ensaios com as sintonias $\tau_c = 2,0.\tau$ e $\tau_c = 2,8.\tau$ e a sintonia $\tau_c = 2,8.\tau$ foi usada também em todos os posicionadores de válvula para comparar o seu desempenho com uma sintonia igual. Esta sintonia gerou um $K_c=0,30$ e $T_i=1,36$ e está representada com um “*” nas Tabelas 27 e 28.

Para a válvula de grafite com posicionador FF, foi usada a mesma sintonia da válvula de teflon com posicionador FF. Além da sintonia com $\tau_c = 2,8.\tau$, foi também testada $\tau_c = 3,7.\tau$, a qual está indicada na Tabela 27 com “***”. Muitos SDCDs têm a

opção *auto tuning*, em que o sistema aplica degraus no processo e estima os parâmetros do controlador via algoritmos próprios do fabricante. Foi realizado o *auto tuning* no PID da motobomba e feitos testes com essa sintonia. A Tabela 29 exibe a sintonia do *auto tuning*. As Tabelas 27 a 29 mostram as sintonias usadas nos testes.

Tabela 27 - Sintonias testadas de controladores PI – válvula de grafite

	x	$\tau_c = x\tau$	T_i	K_c
Posicionador EP	0,3	0,23	0,77	0,67
	0,5	0,38	0,77	0,60
	0,8	0,61	0,77	0,51
	*	*	1,36	0,30
Posicionador FF	*	*	1,36	0,30
	**	**	1,36	0,24
Conversor IP	0,5	2,36	4,71	2,24
	0,8	3,77	4,71	1,61
	*	*	1,36	0,30

Fonte: Autor

Tabela 28 - Sintonias testadas de controladores PI – válvula de teflon

	x	$\tau_c = x\tau$	T_i	K_c
Posicionador EP	0,3	0,29	0,95	0,86
	0,5	0,48	0,95	0,75
	0,8	0,76	0,95	0,63
	*	*	1,36	0,30
Posicionador FF	2,0	2,72	1,36	0,37
	2,8	3,81	1,36	0,30
Conversor IP	0,3	0,22	0,73	0,46
	0,5	0,36	0,73	0,43
	0,8	0,58	0,73	0,39
	*	*	1,36	0,30

Fonte: Autor

Tabela 29 - Sintonias testadas de controladores PI – motobomba

	x	$\tau_c = x\tau$	T_i	K_c	T_d
Motobomba	0,3	0,33	1,10	0,69	
	0,5	0,55	1,10	0,62	
	0,8	0,88	1,10	0,54	
	Auto Tuning		5,69	1,09	0,91

Fonte: Autor

As subseções a seguir exibem os resultados gráficos dos experimentos em modo servo. Os ensaios com as válvulas contêm: gráficos de vazão, pressão no atuador, posição da haste e instante dos degraus de vazão com destaque para o tempo de acomodação. Os ensaios com a motobomba contêm: gráficos de vazão, referência para o inversor, leitura de rotação pelo *encoder* e instante dos degraus de vazão com destaque para o tempo de acomodação.

4.1.1 Válvula de Grafite com Posicionador EP

Figura 67 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Figura 68 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Figura 69 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Figura 70 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.1.2 Válvula de Grafite com Posicionador FF

Figura 71 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Figura 72 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.1.3 Válvula de Grafite com Conversor IP

Figura 73 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$

Fonte: Autor

Figura 74 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$

Fonte: Autor

Figura 75 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.1.4 Válvula de Teflon com Posicionador EP

Figura 76 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

Figura 77 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

Figura 78 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

Figura 79 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.1.5 Válvula de Teflon com Posicionador FF

Figura 80 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Figura 81 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.1.6 Válvula de Teflon com Conversor IP

Figura 82 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$

Fonte: Autor

Figura 83 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$

Fonte: Autor

Figura 84 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$

Fonte: Autor

Figura 85 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.1.7 Motobomba acionada por inversor

Figura 86 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

Figura 87 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

Figura 88 – Ensaio servo – motobomba com inversor - $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

Figura 89 – Ensaio servo – motobomba com inversor – $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$

Fonte: Autor

4.1.8 Resultados – Ensaio Servo

Definiram-se quatro critérios para avaliar o desempenho da malha de controle em modo servo (GARCIA, 2017):

- A variabilidade da vazão em porcentagem (%), definida pela Equação (14):

$$var PV = 100 \cdot 2\sigma_{PV}/\rho_{PV} \quad (14)$$

em que σ_{PV} é o desvio padrão e ρ_{PV} é o valor médio da vazão. Este índice foi calculado para cada um dos patamares de vazão: 8, 9 e 10 m³/h e nomeado como *var PV8*, *var PV9* e *var PV10*. O índice *var PV med* é a média de *var PV8* a *var PV10*.

- A variabilidade da saída do controlador, definido como:

$$var MV = 100 \cdot 2\sigma_{MV}/\rho_{MV} \quad (15)$$

em que σ_{MV} é o desvio padrão e ρ_{MV} é o valor médio da saída de controle. Este índice mede o esforço de controle e se ele gera um desgaste prematuro do elemento final. Este índice foi calculado para cada um dos patamares de vazão e nomeado como *var MV8*, *var MV9* e *var MV10*. O índice *var MV med* é a média dos 3 valores.

- O erro quadrático integrado ou ISE (*Integrated Squared Error*):

$$\int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (16)$$

Em que $e = SP - PV$. Elevar o erro ao quadrado permite que o erro negativo não se cancele com o erro positivo, mas penaliza também os erros grandes. Também é calculado *ISE 8*, *ISE 9* e *ISE 10*, correspondendo a cada patamar de vazão.

- O tempo de acomodação para $\pm 0,1$ m³/h em torno do valor final de vazão.

Ts 9-8 é o tempo de acomodação após o degrau de 9 para 8 m³/h.

Ts 8-9 é o tempo de acomodação após o degrau de 8 para 9 m³/h.

Ts 9-10 é o tempo de acomodação após o degrau de 9 para 10 m³/h.

Ts 10-9 é o tempo de acomodação após o degrau de 10 para 9 m³/h.

Ts med é a média entre *Ts 9-8*, *Ts 8-9*, *Ts 9-10* e *Ts 10-9*.

Para os casos que não estabilizaram dentro desta faixa, foi atribuído um valor de 400s, correspondente ao tempo total de cada patamar.

Quanto menores os valores dos quatro índices, melhores são os controladores. Os resultados dos experimentos estão apresentados nas Tabelas 30 a 36. O controlador da válvula de grafite com posicionador EP ficou agressivo com as sintonias $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ e $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ na vazão de 8 m³/h. A vazão oscilava e não acomodava, mesmo após 400s com o *set point* fixo. Os índices são todos piores em torno de 8 m³/h, mas melhoram com a vazão em 9 ou 10 m³/h. A sintonia $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$, $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ gerou menores valores de variabilidade, de ISE e de tempos médios de acomodação.

Tabela 30 - Parâmetros ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP

Sintonia	$\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ $K_c = 0,6$ e $T_i = 0,77$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
var PV8 (%)	4,19	3,90	1,37	0,71
var PV9 (%)	1,50	0,84	0,77	0,64
var PV10 (%)	0,75	0,73	0,63	0,52
var PV med (%)	2,15	1,82	0,92	0,63
ISE 8	13,62	11,39	3,01	3,66
ISE 9	2,88	1,99	1,42	4,21
ISE 10	1,32	2,33	1,94	4,94
ISE med	5,94	5,24	2,12	4,27
var MV8 (%)	3,17	2,78	1,27	0,83
var MV9 (%)	1,92	1,29	1,19	0,91
var MV10 (%)	1,77	1,58	1,43	0,86
var MV med (%)	2,29	1,88	1,29	0,87
Ts 9-8 (s)	400,0	400	25,8	13,0
Ts 8-9 (s)	400,0	3,4	7,2	13,6
Ts 9-10 (s)	5,2	5,2	7,0	19,2
Ts 10-9 (s)	100,0	26,0	9,1	17,0
Ts med (s)	226,3	108,7	12,3	15,7

Fonte: Autor

Tabela 31 - Parâmetros ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF

Sintonia	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	$K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$
var PV8 (%)	0,97	0,84
var PV9 (%)	0,74	0,58
var PV10 (%)	0,64	0,49
var PV med (%)	0,78	0,64
ISE 8	4,56	5,70
ISE 9	4,86	5,83
ISE 10	4,97	6,14
ISE med	4,80	5,89
var MV8 (%)	0,68	0,68
var MV9 (%)	0,68	0,50
var MV10 (%)	0,84	0,61
var MV med (%)	0,73	0,60
Ts 9-8 (s)	9,8	47,0
Ts 8-9 (s)	11,4	15,2
Ts 9-10 (s)	13,8	19,4
Ts 10-9 (s)	17,0	21,0
Ts med (s)	13,0	25,7

Fonte: Autor

O controlador da válvula de grafite com posicionador FF gerou bons índices de variabilidade da vazão e da saída de controle, abaixo de 1%. Mas o ISE e os tempos de acomodação, em média, foram maiores do que os do posicionador EP com $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$.

Tabela 32 - Parâmetros ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP

Sintonia	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
	$K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$	$K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$	
<i>var PV8 (%)</i>	2,89	1,78	3,53
<i>var PV9 (%)</i>	1,62	0,88	0,73
<i>var PV10 (%)</i>	1,43	1,92	1,43
<i>var PV med (%)</i>	1,98	1,53	1,90
<i>ISE 8</i>	9,26	16,21	27,54
<i>ISE 9</i>	12,32	10,77	18,99
<i>ISE 10</i>	8,76	15,30	20,20
<i>ISE med</i>	10,11	14,09	22,24
<i>var MV8 (%)</i>	26,47	20,12	23,77
<i>var MV9 (%)</i>	30,68	20,01	23,09
<i>var MV10 (%)</i>	30,45	33,85	33,12
<i>var MV med (%)</i>	29,20	24,66	26,66
<i>Ts 9-8 (s)</i>	400,0	129,8	271,0
<i>Ts 8-9 (s)</i>	219,8	29,8	22,6
<i>Ts 9-10 (s)</i>	400,0	12,0	28,0
<i>Ts 10-9 (s)</i>	99,0	100,0	18,0
<i>Ts med (s)</i>	279,7	67,9	84,9

Fonte: Autor

A válvula de grafite acionada pelo conversor IP obteve os piores resultados, quando comparado com os posicionadores EP e FF. Tanto em termos de ISE, quanto de variabilidade na saída de controle e tempos de acomodação, os quais estão elevados.

Tabela 33 - Parâmetros ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP

Sintonia	$\tau_c = 0,3 \cdot \tau$	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
	$K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$	$K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$	$K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$	
<i>var PV8 (%)</i>	5,37	1,47	1,51	0,87
<i>var PV9 (%)</i>	1,39	0,98	0,94	0,75
<i>var PV10 (%)</i>	0,90	0,67	0,74	0,57
<i>var PV med (%)</i>	2,55	1,04	1,06	0,73
<i>ISE 8</i>	18,33	2,77	2,85	3,37
<i>ISE 9</i>	2,49	2,04	1,92	3,43
<i>ISE 10</i>	1,51	1,53	1,82	3,74
<i>ISE med</i>	7,44	2,11	2,20	3,51
<i>var MV8 (%)</i>	4,34	1,18	1,30	0,71
<i>var MV9 (%)</i>	1,59	1,15	1,05	0,72
<i>var MV10 (%)</i>	1,66	1,24	1,30	0,99
<i>var MV med (%)</i>	2,53	1,19	1,22	0,81
<i>Ts 9-8 (s)</i>	400,0	59,8	18,8	11,0
<i>Ts 8-9 (s)</i>	44,2	5,0	5,8	12,0
<i>Ts 9-10 (s)</i>	5,2	4,0	4,2	16,4
<i>Ts 10-9 (s)</i>	6,0	7,0	7,0	15,0
<i>Ts med (s)</i>	113,9	19,0	9,0	13,6

Fonte: Autor

A válvula de teflon acionada pelo posicionador EP gerou menores valores de *ISE* com as sintonias $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ e $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ e, com esta última, o menor tempo de acomodação. A sintonia com $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ gerou as menores variabilidades. A sintonia $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ foi inadequada, principalmente na região em torno de 8 m³/h, onde a resposta ficou oscilatória.

Tabela 34 - Parâmetros ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF

Sintonia	$\tau_c = 2,0 \cdot \tau$ $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$	$\tau_c = 2,8 \cdot \tau$ $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
<i>var PV8 (%)</i>	1,31	0,94
<i>var PV9 (%)</i>	0,96	0,77
<i>var PV10 (%)</i>	0,59	0,59
<i>var PV med (%)</i>	0,95	0,77
<i>ISE 8</i>	3,97	4,05
<i>ISE 9</i>	4,19	4,12
<i>ISE 10</i>	3,94	4,28
<i>ISE med</i>	4,03	4,15
<i>var MV8 (%)</i>	0,59	0,35
<i>var MV9 (%)</i>	0,52	0,36
<i>var MV10 (%)</i>	0,57	0,55
<i>var MV med (%)</i>	0,56	0,42
<i>Ts 9-8 (s)</i>	34,4	13,4
<i>Ts 8-9 (s)</i>	10,8	11,0
<i>Ts 9-10 (s)</i>	11,4	14,6
<i>Ts 10-9 (s)</i>	12,0	18,0
<i>Ts med (s)</i>	17,2	14,3

Fonte: Autor

A válvula de teflon acionada pelo posicionador FF teve melhores resultados de variabilidade da *PV* e *MV* e tempo médio de acomodação com a sintonia $\tau_c = 2,8 \cdot \tau$. O *ISE* esteve próximo de 4,0% em todos os casos.

A válvula de teflon acionada pelo conversor I/P teve variabilidade alta na vazão, mais expressiva nas sintonias $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$, $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ e $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$. A sintonia com $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ gerou menores variabilidades na *PV* e na *MV*, além de menores tempos médios de acomodação.

Tabela 35 - Parâmetros ensaio servo – válvula de teflon – conversor IP

Sintonia	$\tau_c = 0,3. \tau$ $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$	$\tau_c = 0,5. \tau$ $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$	$\tau_c = 0,8. \tau$ $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
var PV8 (%)	3,14	2,95	2,98	1,08
var PV9 (%)	1,36	0,71	1,30	0,87
var PV10 (%)	0,79	1,70	0,54	0,61
var PV med (%)	1,76	1,79	1,61	0,86
ISE 8	9,44	7,55	7,79	5,64
ISE 9	3,45	3,64	3,45	4,33
ISE 10	3,26	5,14	1,98	5,39
ISE med	5,38	5,44	4,41	5,12
var MV8 (%)	6,25	6,14	6,10	6,05
var MV9 (%)	6,28	6,36	5,89	5,92
var MV10 (%)	4,37	6,68	6,08	3,73
var MV med (%)	5,63	6,39	6,02	5,24
Ts 9-8 (s)	400,0	400,0	400,0	13,0
Ts 8-9 (s)	88,0	31,2	156,6	10,0
Ts 9-10 (s)	10,8	13,0	20,8	14,2
Ts 10-9 (s)	96,0	79,0	21,0	12,0
Ts med (s)	73,3	130,8	149,6	12,3

Fonte: Autor

Tabela 36 - Parâmetros ensaio servo - motobomba

Sintonia	$\tau_c = 0,3. \tau$ $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$	$\tau_c = 0,5. \tau$ $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$	$\tau_c = 0,8. \tau$ $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$	Auto Tun $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$
var PV8 (%)	0,70	0,62	0,58	0,70
var PV9 (%)	0,68	0,67	0,54	0,67
var PV10 (%)	0,66	0,64	0,57	0,69
var PV med (%)	0,68	0,64	0,56	0,69
ISE 8	1,54	1,20	1,79	5,73
ISE 9	1,74	1,44	2,04	5,70
ISE 10	1,84	1,30	1,90	5,75
ISE med	1,71	1,31	1,91	5,73
var MV8 (%)	0,58	0,50	0,38	0,61
var MV9 (%)	0,37	0,36	0,28	0,55
var MV10 (%)	0,56	0,58	0,62	0,85
var MV med (%)	0,50	0,48	0,43	0,67
Ts 9-8 (s)	6,2	3,4	4,2	24,0
Ts 8-9 (s)	6,2	3,0	4,6	23,6
Ts 9-10 (s)	5,8	3,2	4,0	23,8
Ts 10-9 (s)	6,0	3,0	7,0	24,0
Ts med (s)	6,05	3,15	4,95	23,85

Fonte: Autor

Todas as sintonias do controlador da motobomba obtiveram resultados excelentes quanto à variabilidade da *PV* e da *MV*, ficando sempre abaixo de 0,70%. Os *ISEs* das

sintonias obtidas pelo método da Síntese Direta ficaram muito bons quando comparados com ensaios com válvulas, abaixo de 1,91% e os tempos de acomodação ficaram abaixo de 7s. A sintonia obtida pela função de *auto tuning* teve pior resultado em todos os índices de desempenho.

4.2 ENSAIOS NO MODO REGULATÓRIO

A perturbação em sistemas de controle é um sinal que tende a afetar de forma adversa e imprevisível o valor da saída do sistema (CAMPOS, 2020). O objetivo do controle regulatório é compensar os efeitos de perturbações externas, a fim de manter a saída no seu ponto de ajuste constante (rejeição de distúrbios) (BOJORGE, 2017).

Para avaliar o desempenho das malhas de controle foi proposto perturbar o processo aplicando um sinal de fechamento de 46% na válvula de perturbação. Primeiramente é realizado um ensaio simples para determinar qual o impacto dessa perturbação. Para tanto, foi estabilizada a vazão em 9 m³/h com a saída de controle em manual. Em seguida, é aplicado um degrau na válvula de perturbação e depois de alguns instantes aberta novamente a válvula. Os gráficos das Figuras 90 a 92 mostram o impacto quando a vazão é controlada pela válvula de grafite, de teflon e pela motobomba, respectivamente.

Figura 90 – Ensaio de perturbação em malha aberta: válvula de grafite

Fonte: Autor

Figura 91 – Ensaio de perturbação em malha aberta: válvula de teflon

Fonte: Autor

Figura 92 – Ensaio de perturbação em malha aberta: motobomba acionada pelo inversor

Fonte: Autor

Os resultados da análise estão na Tabela 37. A coluna delta de vazão exibe a diferença do valor de vazão antes e após a perturbação e a coluna variação percentual mostra o valor conforme a expressão:

$$var (\%) = 100. \frac{vazão\ final - vazão\ inicial}{vazão\ inicial} \quad (17)$$

A perturbação afeta de modo praticamente igual as válvulas mas ela provoca um impacto 52% maior na motobomba.

Tabela 37 – Efeito da perturbação nos diferentes elementos finais de controle

	Delta de vazão (m³/h)	Variação percentual (%)
Válvula Grafite	-0,65	-7,22
Válvula Teflon	-0,64	-7,11
Bomba	-0,99	-11

Fonte: Autor

Após este teste preliminar, foi elaborado o experimento em modo regulatório da seguinte maneira: para todos os controladores, foi ajustado o *set point* de vazão em 9 m³/h; em t=100s, foi alterada a abertura da válvula de perturbação para 46%; em t=250s, a válvula de perturbação foi completamente aberta. O teste foi encerrado em 400s. Os experimentos são mostrados de forma gráfica nas Figuras 93 a 114. O primeiro gráfico de cada figura mostra o comportamento da vazão; o segundo gráfico mostra o comportamento da pressão, da saída do controlador “ZC” e da posição indicada pelo *LVDT*; e o terceiro gráfico mostra em destaque o instante que a vazão acomodou.

Para o ensaio com a motobomba, o segundo gráfico mostra a saída do controlador para o inversor (Referência) e o valor lido pelo *encoder*.

4.2.1 Válvula de Grafite com Posicionador EP

Figura 93 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Figura 94 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Figura 95 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

4.2.2 Válvula de Grafite com Posicionador FF

Figura 96 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Figura 97 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador FF - $K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.2.3 Válvula de Grafite com Conversor IP

Figura 98 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$

Fonte: Autor

Figura 99 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$

Fonte: Autor

Figura 100 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.2.4 Válvula de Teflon com Posicionador EP

Figura 101 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

Figura 102 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

Figura 103 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

Figura 104 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.2.5 Válvula de Teflon com Posicionador FF

Figura 105 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Figura 106 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador FF - $K_c = 0,30$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.2.6 Válvula de Teflon com Conversor I/P

Figura 107 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$

Fonte: Autor

Figura 108 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$

Fonte: Autor

Figura 109 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$

Fonte: Autor

Figura 110 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

4.2.7 Motobomba acionada por inversor

Figura 111 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

Figura 112 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

Figura 113 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

Figura 114 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor – $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$

Fonte: Autor

4.2.8 Resultados – Ensaio Regulatório

Para os ensaios em modo regulatório, foram definidos os seguintes indicadores de desempenho:

- Sobressinal após inserir a perturbação: M_{P1}
- Sobressinal após remover a perturbação: M_{P2}
- Tempo de acomodação após inserir a perturbação: T_{S1}
- Tempo de acomodação após remover a perturbação: T_{S2}

$M_p \text{ med}$ é a média entre M_{P1} e M_{P2} . $T_s \text{ med}$ é a média entre T_{S1} e T_{S2} . Quanto menores os indicadores, melhor é a resposta do controlador à perturbação. Os resultados dos ensaios são mostrados nas Tabelas 38 a 44.

Tabela 38 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador EP

Sintonia	$\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ $K_c = 0,6$ e $T_i = 0,77$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
$M_{p1} (m^3/h)$	0,62	0,69	0,56	0,59
$M_{p2} (m^3/h)$	0,83	0,82	0,88	0,85
$M_p \text{ med} (m^3/h)$	0,73	0,76	0,72	0,72
$T_{s1} (s)$	5,40	5,60	6,40	16,80
$T_{s2} (s)$	81,60	8,60	4,20	18,00
$T_s \text{ med} (s)$	43,50	7,10	5,30	17,40

Fonte: Autor

Das sintonias usadas para o controlador da válvula de grafite com posicionador EP, o que gerou melhor resultado – menor sobressinal e menor tempo de acomodação - foi o de $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$.

Tabela 39 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de grafite – posicionador FF

Sintonia	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	$K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$
$M_{p1} (m^3/h)$	0,70	0,75
$M_{p2} (m^3/h)$	0,83	0,86
$M_p \text{ med} (m^3/h)$	0,76	0,81
$T_{s1} (s)$	17,60	20,20
$T_{s2} (s)$	18,40	15,00
$T_s \text{ med} (s)$	18,00	17,60

Fonte: Autor

Para o controlador da válvula de grafite com posicionador FF, os resultados das sintonias foram bem próximos. A sintonia $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ gerou sobressinal pouco menor e a sintonia $K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$ gerou menor tempo de acomodação médio.

Tabela 40 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de grafite – conversor I/P

Sintonia	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
	$K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$	$K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$	
$M_{p1} (m^3/h)$	0,61	0,78	0,77
$M_{p2} (m^3/h)$	0,86	0,92	0,93
$M_p \text{ med } (m^3/h)$	0,73	0,85	0,85
$T_{s1} (s)$	12,80	23,80	24,60
$T_{s2} (s)$	150,00	150,00	150,00
$T_s \text{ med } (s)$	81,40	86,90	87,30

Fonte: Autor

Todas as sintonias do controlador da válvula de grafite com conversor IP não conseguiram fazer a vazão entrar na região de $\pm 0,1 \text{ m}^3/h$ em torno do valor final após a remoção da perturbação e, portanto, não acomodaram. Foi atribuído um valor de 150 s, como penalização do indicador.

Tabela 41 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador EP

Sintonia	$\tau_c = 0,3 \cdot \tau$	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
	$K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$	$K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$	$K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$	
$M_{p1} (m^3/h)$	0,43	0,58	0,63	0,58
$M_{p2} (m^3/h)$	0,82	0,81	0,86	0,81
$M_p \text{ med } (m^3/h)$	0,63	0,69	0,74	0,69
$T_{s1} (s)$	8,00	8,00	4,40	19,40
$T_{s2} (s)$	82,80	93,80	3,40	14,00
$T_s \text{ med } (s)$	45,40	50,90	3,90	16,70

Fonte: Autor

As sintonias $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ e $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ geraram excessivas oscilações ao se remover a perturbação, gerando elevados tempos de acomodação. Devido ao valor de K_c baixo, a sintonia $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ gerou tempos maiores de acomodação, se comparada à sintonia $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$. Esta, apesar de ter um sobressinal maior, produziu o menor tempo de acomodação para os ensaios em modo regulatório.

Tabela 42 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de teflon – posicionador FF

Sintonia	$\tau_c = 2,0 \cdot \tau$	$\tau_c = 2,8 \cdot \tau$
	$K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
$M_{p1} (m^3/h)$	0,63	0,65
$M_{p2} (m^3/h)$	0,85	0,86
$M_p \text{ med } (m^3/h)$	0,74	0,75
$T_{s1} (s)$	11,80	16,60
$T_{s2} (s)$	11,00	17,60
$T_s \text{ med } (s)$	11,40	17,10

Fonte: Autor

O controlador da válvula de teflon com posicionador FF obteve menor sobressinal e tempo de acomodação com a sintonia $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$.

Tabela 43 - Parâmetros ensaio regulatório – válvula de teflon – conversor I/P

Sintonia	$\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$	$K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$
$M_{p1} (m^3/h)$	0,62	0,59	0,59	0,70
$M_{p2} (m^3/h)$	0,86	0,87	0,72	0,88
$M_p \text{ med } (m^3/h)$	0,74	0,73	0,66	0,79
$T_{s1} (s)$	4,40	6,00	5,60	16,20
$T_{s2} (s)$	83,40	150,00	59,40	12,80
$T_s \text{ med } (s)$	43,90	78,00	32,50	14,50

Fonte: Autor

Os testes com controladores da válvula de teflon com conversor I/P e método da Síntese Direta se mostraram oscilatórios após a remoção da perturbação e por isso o tempo elevado de acomodação. A sintonia $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ não gerou oscilações e retornou tempos de acomodação menores, apesar de um sobressinal um pouco maior.

Tabela 44 - Parâmetros ensaio regulatório - motobomba

Sintonia	$\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$	$\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$	$\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$	Auto Tuning $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$
$M_{p1} (m^3/h)$	0,90	0,78	0,87	0,73
$M_{p2} (m^3/h)$	1,06	1,14	1,07	0,86
$M_p \text{ med } (m^3/h)$	0,98	0,96	0,97	0,80
$T_{s1} (s)$	5,60	6,40	7,80	26,40
$T_{s2} (s)$	7,20	7,40	6,40	22,20
$T_s \text{ med } (s)$	6,40	6,90	7,10	24,30

Fonte: Autor

Os sobressinais do controlador da motobomba se mostraram maiores do que os encontrados nos controladores das válvulas. A sintonia encontrada com *auto tuning* provocou um sobressinal menor que o da sintonia da Síntese Direta, provavelmente devido à presença de um componente derivativo no PID.

Os tempos médios de acomodação dos controladores da motobomba com $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$, $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ e $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ se mostraram muito bons, quando comparados com os resultados dos experimentos com as válvulas de controle.

5 MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ATRITO CONTROL FREEZE E CR2

5.1 DEFINIÇÃO DE STICTION

Em (CHOUDHURY *et al.*, 2008) é definido o efeito *stiction*, o qual é traduzido por Cuadros (2011) como:

Stiction é uma propriedade de um elemento de tal forma que sua movimentação suave, em resposta a uma entrada variável, seja precedida 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 da faixa de saída. Sua origem em um sistema mecânico é o atrito estático, o qual excede o atrito dinâmico (CHOUDHURY, JAIN, SHAH, 2008, p. 233).

A Figura 115 mostra o comportamento de uma válvula de controle afetada pelo efeito *stiction*. Esta curva é chamada de curva de assinatura da válvula.

Figura 115 – Comportamento típico de uma válvula de controle afetada pelo *stiction*

Fonte: (CUADROS, 2011)

Partindo-se do ponto A com a válvula parada, incrementa-se a saída do controlador. A válvula só vai alterar a sua posição quando o sinal do controlador superar a banda morta (A-B) e a banda de agarramento (B-C). Neste instante, ocorre um movimento abrupto denominado *slip-jump* (J), pois o atrito dinâmico é menor que o atrito estático. Após isso, a válvula se movimenta de forma linear. Em caso de reversão na entrada da válvula, o processo se repete no sentido contrário (MORA, 2015).

O parâmetro S corresponde à banda morta mais a banda de agarramento. Haraoka e Kawamorita (2017) observaram em seus experimentos na Planta Piloto de Vazão que J pode ser considerado desprezível e o parâmetro S pode ser obtido a partir do valor da banda morta da curva de assinatura.

5.2 CURVA DE ASSINATURA

Para se quantificar o *stiction*, foi realizado um teste aplicando ao posicionador EP um sinal triangular de período $T=60s$, amplitude de 0 a 100% e com três ciclos completos. O ensaio na válvula de grafite está representado na Figura 116 e na válvula de teflon, na Figura 117. O primeiro gráfico das Figuras 115 e 116 mostra o sinal ZC aplicado à válvula e o valor da posição ZT da válvula lido pelo *LVDT*. O segundo gráfico mostra a pressão no atuador da válvula e o terceiro gráfico, a curva de assinatura.

Os valores de S foram encontrados a partir da distância das retas de posição da haste – distância entre os pontos A e B, conforme Figura 115 - com seu valor em porcentagem da pressão (eixo x). Os resultados estão indicados na Tabela 45 e comparados com os valores encontrados em outros trabalhos.

Tabela 45 – Parâmetro S da curva de assinatura

Válvula	Grafite	Teflon
S proposto	25,96%	4,03%
(SILVA, 2013)	19,82%	4,14%
(MORA, 2014)	16,01%	4,51%
(HIDALGO, 2015)	18,38%	--
(HARAOKA e KAWAMORITA, 2017)	18,20%	--

Fonte: Diversos

Figura 116 – Curva de assinatura – válvula de grafite – posicionador EP

Fonte: Autor

Figura 117 – Curva de assinatura – válvula de teflon – posicionador EP

Fonte: Autor

5.3 O MÉTODO CR

O compensador CR (*Constant Reinforcement*) foi apresentado em (HÄGGLUND, 2007). Este método busca eliminar a banda morta, adicionando um sinal de compensação cada vez que a ação de controle mude de sentido. O sinal de compensação total (MV) é a soma da saída do controlador PID (u_c) com o sinal de compensação (u_k) da banda morta (B_m). A Equação (18) representa o algoritmo de compensação CR.

$$u_k = \frac{B_m}{2} * \operatorname{sgn}\left(\frac{du_c}{dt}\right) \quad (18)$$

Em (IVAN; LAKSHMINARAYANAN, 2009), foi usado o mesmo método de Hägglund (2007) para compensar a banda morta mais a banda de agarramento quando há inversão no sentido de movimento da válvula. Esse método considera o parâmetro S do modelo de Kano, como indicado na Equação (19).

$$u_k = \frac{S}{2} * \operatorname{sgn}\left(\frac{du_c}{dt}\right) \quad (19)$$

Além disso, nesse mesmo trabalho também foi analisado o método que havia sido proposto por Hägglund (2007), em que se sugeriu considerar o sinal do erro e não o sinal da derivada do sinal de saída do controlador no tempo. Nesse caso, a Equação (19) é chamada de método CR1 e a Equação (20) de método CR2. O diagrama de blocos do método CR2 é mostrado na Figura 118.

$$u_k = \frac{S}{2} * \operatorname{sgn}(e(t)) \quad (20)$$

Figura 118- Estrutura da malha de controle de vazão com compensador CR2

Fonte: (SILVA, 2013)

Cuadros (2011) propõe um algoritmo, visto na Figura 119, que desabilita a ação do controlador PID e do compensador CR2, caso a vazão estabilize próximo ao valor do *set point*. Se o módulo da derivada do erro for menor que um valor δ_1 durante um tempo T_p , o controlador é desabilitado e a sua saída permanecerá fixa. Caso o módulo do erro seja

maior que um valor δ_2 por um tempo igual a $4T_s$ – em que T_s é o tempo de amostragem – o controlador é reabilitado. Este algoritmo é chamado de desabilitação de controle.

Figura 119 – Algoritmo de desabilitação de controle

Fonte: (CUADROS, 2011)

O algoritmo proposto por Cuadros (2011) poderia desabilitar o controle em uma situação em que a haste da válvula permanecesse parada (de/dt seria baixo) mas com módulo elevado do erro.

Silva (2013) propõe uma alteração no algoritmo de desabilitação de controle. Ao invés de considerar a derivada do erro, é usado um erro aceitável δ . Neste caso, se a vazão exibir um erro inferior a δ por T_i segundos, o controlador é desabilitado. Para reabilitar o controlador, o erro deve ser maior que o erro aceitável δ por um intervalo de tempo T_o .

A proposta desta seção é aplicar o método CR2 com desabilitação de controle ao posicionador EP, FF e conversor IP para reduzir a variabilidade da vazão da Planta Piloto

de Vazão. A Tabela 46 mostra os parâmetros da desabilitação de controle proposto e comparado com os parâmetros de outros trabalhos.

Tabela 46 – Parâmetros da desabilitação de controle

Válvula	δ (%)	T_i (s)	T_o (s)
Proposta 1	1,1	2	2
Proposta 2	0,5	2	2
(SILVA, 2013)	0,5	10	2
(HIDALGO, 2015)	0,5	2	5

Fonte: Diversos

Os valores de δ correspondem a uma porcentagem do *span* de vazão, que é 18 m³/h. Logo, neste trabalho são adotados dois valores propostos de δ : $\delta=1,1\%$ que corresponde a um erro aceitável de 0,2m³/h e $\delta=0,5\%$ que corresponde a 0,09 m³/h.

Foi adotado um valor conservador para o parâmetro S a ser utilizado nos ensaios da válvula de alto atrito com o algoritmo do CR2 de 17,2%. Este valor é uma média entre os valores encontrados por Mora (2014) e Hidalgo (2015). O valor utilizado para a válvula de baixo atrito foi de 4%, extraído da Tabela 45.

Também é proposto um método chamado de *Control Freeze* (CF), o qual é composto pelo controlador PI com desabilitação de controle, mas sem utilizar o compensador de atrito CR2. O método *Control Freeze* consiste em uma banda morta de valor δ em torno do *set point* na qual o controlador mantém a sua saída congelada.

As Subseções 5.3.1 e 5.3.2 mostram os ensaios nos modos servo e regulatório com os algoritmos CR2 e CF, segundo os mesmos formatos de ensaio das Seções 4.1 e 4.2. Foi realizado ao menos um ensaio para cada válvula, posicionador e bomba para comprovar a eficácia dos métodos propostos.

5.3.1 Experimentos No Modo Servo

5.3.1.1 Válvula de Grafite com Posicionador EP

Na Figura 120 apresenta-se o experimento realizado com a válvula de grafite com posicionador EP – CF utilizando $\delta=1,1\%$ (0,2m³/h), $K_c=0,60$ e $T_f=0,77$.

Figura 120 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CF $\delta=1,1\%$ (0,2m³/h) - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Na Figura 121 mostra-se o experimento feito com a válvula de grafite com posicionador EP – CF empregando $\delta=0,5\%$ (0,09m³/h), $K_c=0,60$ e $T_i=0,77$.

Figura 121 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Na Figura 122 mostra-se o experimento feito com a válvula de grafite com posicionador EP – CF empregando $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,51$ e $T_i=0,77$.

Figura 122 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Na Figura 123 exibe-se o experimento feito com a válvula de grafite com posicionador EP – CR2, $S=17,2\%$, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,60$ e $T_i=0,77$.

Figura 123 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CR2 - $S=17,2\%$ - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

O teste usando CR2 com $S=17,2\%$ foi interrompido, pois causou oscilações elevadas. Foi feito um novo teste para avaliar se utilizando um S menor poderia dar bons resultados, utilizando-se então $S=2\%$. Os resultados são vistos na Figura 124.

Figura 124 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador EP – CR2 - S=2% - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,60$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

Novamente, o teste foi interrompido devido a altas oscilações. É possível ver que ao desligar o algoritmo CR2 após 60s, a planta começou a estabilizar. Este comportamento mostra que o algoritmo CR2 de compensação de atrito é inapropriado para ser usado com o posicionador EP. Mesmo se reduzindo o valor de S, a adição do valor de $\pm S/2$ na posição produziu resultado oposto ao desejado: aumentou a variabilidade, ao invés de reduzi-la.

5.3.1.2 Válvula de Grafite com Posicionador FF

Na Figura 125 mostra-se o experimento feito com a válvula de grafite com posicionador FF – CF, $\delta=0,5\%$ (0,09m³/h), $K_c=0,30$ e $T_f=1,36$.

Figura 125 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Na Figura 126 mostra-se o experimento feito com a válvula de grafite com posicionador FF – CR2, $S=17,2$, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,30$ e $T_i=1,36$.

Figura 126 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF – CR2 - $S=17,2$ - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Semelhante ao ocorrido com o posicionador EP, o teste do CR2 com posicionador FF foi interrompido devido a oscilações elevadas e realizada a seguir uma nova tentativa com $S=2,5$.

Figura 127 – Ensaio servo – válvula de grafite – posicionador FF – CR2 - $S=2,5$ - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Analisando o comportamento da vazão na Figura 127, é possível ver que mesmo com um valor baixo de S , o CR2 causou oscilações indesejadas e, portanto, é inadequado para ser utilizado também com o posicionador FF.

5.3.1.3 Válvula de Grafite com Conversor IP

Na Figura 128 apresenta-se o experimento feito com a válvula de grafite com conversor I/P – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,30$ e $T_i=1,36$.

Figura 128 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Na Figura 129 vê-se o resultado do experimento feito com a válvula de grafite com conversor I/P – CR2, $\delta=0,5\%$ (0,09m³/h), $K_c=0,30$ e $T_i=1,36$.

Figura 129 – Ensaio servo – válvula de grafite – conversor IP – CR2 - $S=17,2$ - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

5.3.1.4 Válvula de Teflon com Posicionador EP

Na Figura 130 mostra-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com posicionador EP – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,75$ e $T_i=0,95$.

Figura 130 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador EP – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

5.3.1.5 Válvula de Teflon com Posicionador FF

Na Figura 131 mostra-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com posicionador FF – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 131 – Ensaio servo – válvula de teflon – posicionador FF – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

5.3.1.6 Válvula de Teflon com Conversor I/P

Na Figura 132 apresenta-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com conversor I/P – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 132 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor I/P – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Na Figura 133 exibe-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com conversor I/P – CR2, $S=4\%$, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 133 – Ensaio servo – válvula de teflon – conversor I/P – CR2 - $S=4\%$ - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

5.3.1.7 Motobomba acionada por inversor de frequência

Na Figura 134 mostra-se o resultado do experimento feito com a motobomba com inversor de frequência – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,62$ e $T_i=1,1$.

Figura 134 – Ensaio servo – motobomba com inversor – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

5.3.2 Experimentos No Modo Regulatório

5.3.2.1 Válvula de Grafite com Posicionador EP

Na Figura 135 apresenta-se o resultado do experimento feito com a válvula de grafite com posicionador EP – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,51$ e $T_i=0,77$.

Figura 135 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posic. EP – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$

Fonte: Autor

5.3.2.2 Válvula de Grafite com Posicionador FF

Na Figura 136 exibe-se o resultado do experimento feito com a válvula de grafite com posicionador FF – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 136 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – posic. FF – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

5.3.2.3 Válvula de Grafite com Conversor I/P

Na Figura 137 exibe-se o resultado do experimento feito com a válvula de grafite com conversor I/P – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 137 – Ensaio regulatório – válvula de grafite – convers. I/P – CF - $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Na Fig. 138 apresenta-se o resultado do experimento feito com a válvula de grafite com conversor I/P – CR2, $S=17,2\%$, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Fig. 138 – Ensaio regulatório – válv. grafite – conv. I/P – CR2, $S=17,2\%$, $\delta=0,5\%$, $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

5.3.2.4 Válvula de Teflon com Posicionador EP

Na Figura 139 exibe-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com posicionador EP – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,75$ e $T_i=0,95$.

Figura 139 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posic. EP – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$

Fonte: Autor

5.3.2.5 Válvula de Teflon com Posicionador FF

Na Figura 140 mostra-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com posicionador FF – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 140 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – posic. FF – CF $\delta=0,5\%$ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

5.3.2.6 Válvula de Teflon com Conversor I/P

Na Figura 141 apresenta-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com conversor I/P – CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 141 – Ensaio regulatório – válvula de teflon – conv. I/P – CF $\delta=0,5\%$ – $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Fonte: Autor

Na Figura 142 apresenta-se o resultado do experimento feito com a válvula de teflon com conversor I/P – CR2, $S=4\%$, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,3$ e $T_i=1,36$.

Figura 142 – Ensaio regulatório – válv. teflon – conv. I/P – CR2 – $S=4\%$, $\delta=0,5\%$, $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

5.3.2.7 Motobomba acionada por inversor de frequência

Na Figura 143 exibe-se o resultado do experimento feito com a motobomba com inversor de frequência - CF, $\delta=0,5\%$ ($0,09\text{m}^3/\text{h}$), $K_c=0,62$ e $T_i=1,1$.

Figura 143 – Ensaio regulatório – motobomba com inversor - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$

Fonte: Autor

5.3.3 Resultados – Experimentos com CF e CR2

Os resultados dos experimentos com os algoritmos CF e CR2 estão indicados nas Tabelas 47 a 54, onde é feita uma comparação com o controlador PI sem os algoritmos mencionados. É possível ver se os índices de desempenho melhoraram ou pioraram, através da diferença percentual, como mostra o exemplo do *ISE* a seguir.

$$Dif_{ISE}(\%) = 100 \cdot \frac{ISE_{PID+CF} - ISE_{PID}}{ISE_{PID}} \quad (21)$$

No caso, um valor positivo da diferença percentual indica que o índice aumentou (piorou) e um valor negativo significa que o índice abaixou (melhorou) com a introdução do algoritmo CF ou CR2. Nas Tabelas 48 a 54 já constam os índices tanto dos ensaios no modo servo quanto os no modo regulatório.

Como pode ser visto nas Figuras 123, 124, 126 e 127, o CR2 não foi adequado para os posicionadores FF e EP. Para a motobomba o método CR2 não é aplicável, uma vez que é um método concebido para atuar em malhas com *stiction*, o qual não está presente no sistema do inversor + motobomba. Então, o CR2 foi considerado somente para os controladores dos conversores I/P.

Inicialmente, é mostrado na Tabela 47 um comparativo de testes do método *Control Freeze* com diferentes erros aceitáveis, no caso $\delta=1,1\%$ e $\delta=0,5\%$ do *span* de vazão.

Tabela 47 – Comparativo do controle PI, PI+CF – válvula de grafite – posic. EP, $\tau_c = 0,5$, $\tau, K_c = 0,6$ e $T_i = 0,77$

Sintonia	PI	PI + CF $\delta=1,1\%$	PI + CF $\delta=0,5\%$	PI + CF $\delta=1,1\%$ Dif. (%)	PI + CF $\delta=0,5\%$ Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	3,9	1,28	0,58	-67,2	-85,1
<i>var PV9 (%)</i>	0,84	0,61	0,57	-27,4	-32,1
<i>var PV10 (%)</i>	0,73	0,52	0,80	-28,8	9,6
<i>var PV med (%)</i>	1,82	0,80	0,65	-56,0	-64,3
<i>ISE 8</i>	11,39	9,46	4,43	-16,9	-61,1
<i>ISE 9</i>	1,99	9,10	5,56	357,3	179,4
<i>ISE 10</i>	2,33	2,54	3,65	9,0	56,7
<i>ISE med</i>	5,24	7,04	4,55	34,4	-13,2
<i>var MV8 (%)</i>	2,78	0,59	0,30	-78,8	-89,2
<i>var MV9 (%)</i>	1,29	0,00	0,00	-100,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	1,58	0,00	1,51	-100,0	-4,4
<i>var MV med (%)</i>	1,88	0,20	0,60	-89,4	-68,1
<i>T_s 9-8 (s)</i>	400	400,0	22,2	0,0	-94,5
<i>T_s 8-9 (s)</i>	3,4	400,0	13,0	11664,7	282,4
<i>T_s 9-10 (s)</i>	5,2	4,4	5,0	-15,4	-3,8
<i>T_s 10-9 (s)</i>	26,0	100,0	10,0	284,6	-61,5
<i>T_s med (s)</i>	108,7	226,1	12,6	108,0	-88,4

Fonte: Autor

Como pode ser visto, o método CF com $\delta=1,1\%$ para a válvula de grafite com posicionador EP gerou um aumento de 34,4% do ISE médio e 108% do tempo de acomodação médio. Este fato mostra que usar valores mais elevados de erros aceitáveis no algoritmo do CF pode provocar o efeito indesejado da vazão não se acomodar dentro da faixa $\pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$ do *set point* e gerar valores elevados de ISE. Por isso, decidiu-se realizar os demais testes somente com $\delta=0,5\%$.

A sintonia $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$ com *control freeze* obteve uma variabilidade na PV 64% menor que a sintonia sem *control freeze*, além de um ISE 13,2% menor, uma variabilidade na MV 68,1% menor e um tempo de acomodação 88% menor.

As Tabelas 46 e 47 exibem os resultados de se implantar o método CF para a válvula de grafite com posicionador EP com sintonia $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ e com posicionador FF com sintonia $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$. Em ambos os casos, o método provocou uma redução na variabilidade, porém penalizou o ISE, os tempos de acomodação e o sobressinal M_p .

Tabela 48 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta=0,5\%$ – válvula de grafite – posicionador EP
- $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$, $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$

Sintonia	PI	PI + CF	Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	1,37	1,39	1,5
<i>var PV9 (%)</i>	0,77	0,55	-28,6
<i>var PV10 (%)</i>	0,63	0,48	-23,8
<i>var PV med (%)</i>	0,92	0,81	-12,0
<i>ISE 8</i>	3,01	5,89	95,7
<i>ISE 9</i>	1,42	5,51	288,0
<i>ISE 10</i>	1,94	3,46	78,4
<i>ISE med</i>	2,12	4,96	134,0
<i>var MV8 (%)</i>	1,27	0,92	-27,6
<i>var MV9 (%)</i>	1,19	0,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	1,43	0,0	-100,0
<i>var MV med (%)</i>	1,29	0,31	-76,0
<i>T_s 9-8 (s)</i>	25,8	62,8	143,4
<i>T_s 8-9 (s)</i>	7,2	12,6	75,0
<i>T_s 9-10 (s)</i>	7,0	5,6	-20,0
<i>T_s 10-9 (s)</i>	9,1	13	42,9
<i>T_s med (s)</i>	12,3	23,5	91,1
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,56	0,66	17,9
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	0,88	0,89	1,1
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,72	0,78	8,3
<i>T_{s1} (s)</i>	6,4	9,0	40,6
<i>T_{s2} (s)</i>	4,2	37,4	790,5
<i>T_s med reg (s)</i>	5,3	23,2	337,7

Fonte: Autor

Tabela 49 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta=0,5\%$ – válvula de grafite – posicionador FF
- $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Sintonia	PI	PI + CF	Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	0,97	0,6	-38,1
<i>var PV9 (%)</i>	0,74	0,65	-12,2
<i>var PV10 (%)</i>	0,64	0,48	-25,0
<i>var PV med (%)</i>	0,78	0,58	-25,6
<i>ISE 8</i>	4,56	4,85	6,4
<i>ISE 9</i>	4,86	5,41	11,3
<i>ISE 10</i>	4,97	6,03	21,3
<i>ISE med</i>	4,8	5,43	13,1
<i>var MV8 (%)</i>	0,68	0,0	-100,0
<i>var MV9 (%)</i>	0,68	0,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	0,84	0,0	-100,0
<i>var MV med (%)</i>	0,73	0,0	-100,0
<i>T_s 9-8 (s)</i>	9,8	9,8	0,0
<i>T_s 8-9 (s)</i>	11,4	13,2	15,8
<i>T_s 9-10 (s)</i>	13,8	15,4	11,6
<i>T_s 10-9 (s)</i>	17,0	14,0	-17,6
<i>T_s med (s)</i>	13,0	13,1	0,8
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,7	0,76	8,6
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	0,83	0,81	-2,4
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,76	0,79	3,9
<i>T_{s1} (s)</i>	17,6	21,6	22,7
<i>T_{s2} (s)</i>	18,4	18,6	1,1
<i>T_s med reg (s)</i>	18,0	20,1	11,7

Fonte: Autor

A Tabela 50 mostra o resultado comparativo dos métodos CF e CR2 para a válvula de grafite com conversor IP. O método CF, com exceção da variabilidade da *PV*, causou redução em todos os demais índices, com destaque para 67,8% e 52,3% de redução nos tempos médios de acomodação dos ensaios nos modos servo e regulatório, respectivamente. O método CR2 gerou expressiva melhora em todos os indicadores, com 97,1% de redução na variabilidade da saída do controlador, 81,2% e 75,9% no tempo médio de acomodação dos ensaios servo e regulatório, respectivamente, 67,1% no *ISE* e 11,8% no sobressinal.

Tabela 50 – Comparativo do controle PI, PI + CF e PI + CR2 com $\delta=0,5\%$ – válvula de grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Sintonia	PI	PI + CF	PI + CR2	PI + CF Dif. (%)	PI + CR2 Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	3,53	3,34	0,55	-5,4	-84,4
<i>var PV9 (%)</i>	0,73	2,17	0,48	197,3	-34,2
<i>var PV10 (%)</i>	1,43	2,27	0,43	58,7	-69,9
<i>var PV med (%)</i>	1,9	2,59	0,49	36,3	-74,2
<i>ISE 8</i>	27,54	15,77	4,7	-42,7	-82,9
<i>ISE 9</i>	18,99	26,89	11,2	41,6	-41,0
<i>ISE 10</i>	20,2	20,81	6,04	3,0	-70,1
<i>ISE med</i>	22,24	21,16	7,31	-4,9	-67,1
<i>var MV8 (%)</i>	23,77	26,72	0,01	12,4	-100,0
<i>var MV9 (%)</i>	23,09	28,08	2,27	21,6	-90,2
<i>var MV10 (%)</i>	33,12	2,78	0,0	-91,6	-100,0
<i>var MV med (%)</i>	26,66	19,19	0,76	-28,0	-97,1
<i>T_s 9-8 (s)</i>	271,0	18,8	9,8	-93,1	-96,4
<i>T_s 8-9 (s)</i>	22,6	28,2	17,8	24,8	-21,2
<i>T_s 9-10 (s)</i>	28,0	32,0	15,2	14,3	-45,7
<i>T_s 10-9 (s)</i>	18,0	30,0	21	66,7	16,7
<i>T_s med (s)</i>	84,9	27,3	16	-67,8	-81,2
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,77	0,69	0,63	-10,4	-18,2
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	0,93	0,91	0,86	-2,2	-7,5
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,85	0,8	0,75	-5,9	-11,8
<i>T_{s1} (s)</i>	24,6	47,6	22,0	93,5	-10,6
<i>T_{s2} (s)</i>	150,0	35,6	20,0	-76,3	-86,7
<i>T_s med reg (s)</i>	87,3	41,6	21,0	-52,3	-75,9

Fonte: Autor

A Tabela 51 mostra que, para o controlador da válvula de teflon com posicionador EP, o método CF provocou a redução das variabilidades e dos tempos de acomodação, porém houve um acréscimo do *ISE* e do sobressinal.

Tabela 51 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta=0,5\%$ – válvula de teflon – posicionador EP
 - $\tau_c = 0,5$, τ , $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$

Sintonia	PI	PI + CF	Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	1,47	1,3	-11,6
<i>var PV9 (%)</i>	0,98	0,59	-39,8
<i>var PV10 (%)</i>	0,67	0,62	-7,5
<i>var PV med (%)</i>	1,04	0,83	-20,2
<i>ISE 8</i>	2,77	5,1	84,1
<i>ISE 9</i>	2,04	3,42	67,6
<i>ISE 10</i>	1,53	4,44	190,2
<i>ISE med</i>	2,11	4,32	104,7
<i>var MV8 (%)</i>	1,18	1,46	23,7
<i>var MV9 (%)</i>	1,15	0,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	1,24	0,36	-71,0
<i>var MV med (%)</i>	1,19	0,61	-48,7
<i>T_s 9-8 (s)</i>	59,8	17,6	-70,6
<i>T_s 8-9 (s)</i>	5,0	8,2	64,0
<i>T_s 9-10 (s)</i>	4,0	8,4	110,0
<i>T_s 10-9 (s)</i>	7,0	19,0	171,4
<i>T_s med (s)</i>	19,0	13,3	-30,0
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,58	0,58	0,0
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	0,81	0,85	4,9
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,69	0,72	4,3
<i>T_{s1} (s)</i>	8,0	6,6	-17,5
<i>T_{s2} (s)</i>	93,8	25,4	-72,9
<i>T_s med reg (s)</i>	50,9	16,0	-68,6

Fonte: Autor

No caso do controlador da válvula de teflon com posicionador FF (vide Tabela 52), o método CF reduziu as variabilidades e sobressinal, mas aumentou o *ISE* e tempos de acomodação.

Tabela 52 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta=0,5\%$ – válvula de teflon – posicionador FF -
 $\tau_c = 2,8$, $\tau = K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Sintonia	PI	PI + CF	Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	0,94	0,53	-43,6
<i>var PV9 (%)</i>	0,77	0,46	-40,3
<i>var PV10 (%)</i>	0,59	0,51	-13,6
<i>var PV med (%)</i>	0,77	0,5	-35,1
<i>ISE 8</i>	4,05	5,35	32,1
<i>ISE 9</i>	4,12	4,64	12,6
<i>ISE 10</i>	4,28	5,67	32,5
<i>ISE med</i>	4,15	5,22	25,8
<i>var MV8 (%)</i>	0,35	0,0	-100,0
<i>var MV9 (%)</i>	0,36	0,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	0,55	0,0	-100,0
<i>var MV med (%)</i>	0,42	0,0	-100,0
<i>T_s 9-8 (s)</i>	13,4	16,6	23,9
<i>T_s 8-9 (s)</i>	11,0	13,6	23,6
<i>T_s 9-10 (s)</i>	14,6	14,0	-4,1
<i>T_s 10-9 (s)</i>	18,0	17,0	-5,6
<i>T_s med (s)</i>	14,3	15,3	7,0
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,65	0,65	0,0
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	0,86	0,73	-15,1
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,75	0,69	-8,0
<i>T_{s1} (s)</i>	16,6	16,0	-3,6
<i>T_{s2} (s)</i>	17,6	31,0	76,1
<i>T_s med reg (s)</i>	17,1	23,5	37,4

Fonte: Autor

O controlador da válvula de teflon com conversor IP teve reduções de 33,7% e 43% na variabilidade da *PV* com os métodos CF e CR2, respectivamente. Como a saída de controle se manteve fixa após a vazão acomodar, a variabilidade da *MV* teve valor nulo para os métodos CF e CR2. O método CR2 foi mais eficiente que o CF, pois cinco dos indicadores estão com valores menores (somente o tempo de acomodação do ensaio regulatório do método CF foi menor).

Tabela 53 – Comparativo do controle PI, PI + CF e PI + CR2 com $\delta=0,5\%$ – válvula de teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$

Sintonia	PI	PI + CF	PI + CR2	PI + CF Dif. (%)	PI + CR2 Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	1,08	0,6	0,46	-44,4	-57,4
<i>var PV9 (%)</i>	0,87	0,43	0,54	-50,6	-37,9
<i>var PV10 (%)</i>	0,61	0,66	0,46	8,2	-24,6
<i>var PV med (%)</i>	0,86	0,57	0,49	-33,7	-43,0
<i>ISE 8</i>	5,64	4,72	4,67	-16,3	-17,2
<i>ISE 9</i>	4,33	8,64	8,35	99,5	92,8
<i>ISE 10</i>	5,39	4,96	4,66	-8,0	-13,5
<i>ISE med</i>	5,12	6,1	5,89	19,1	15,0
<i>var MV8 (%)</i>	6,05	0,0	0,0	-100,0	-100,0
<i>var MV9 (%)</i>	5,92	0,0	0,0	-100,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	3,73	0,0	0,0	-100,0	-100,0
<i>var MV med (%)</i>	5,24	0,0	0,0	-100,0	-100,0
<i>T_s 9-8 (s)</i>	13,0	12,6	10,6	-3,1	-18,5
<i>T_s 8-9 (s)</i>	10,0	13,6	14,2	36,0	42,0
<i>T_s 9-10 (s)</i>	14,2	11,2	13,4	-21,1	-5,6
<i>T_s 10-9 (s)</i>	12,0	20,0	17,0	66,7	41,7
<i>T_s med (s)</i>	12,3	14,4	13,8	17,1	12,2
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,7	0,67	0,62	-4,3	-11,4
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	0,88	0,87	0,88	-1,1	0,0
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,79	0,77	0,75	-2,5	-5,1
<i>T_{s1} (s)</i>	16,2	18,0	21,4	11,1	32,1
<i>T_{s2} (s)</i>	12,8	15,2	16,0	18,8	25,0
<i>T_s med reg (s)</i>	14,5	16,6	18,7	14,5	29,0

Fonte: Autor

A Tabela 54 mostra que o método CF para a motobomba reduz apenas a variabilidade da saída de controle, mas aumenta os demais índices em uma magnitude considerável. Portanto, neste caso em particular, não seria recomendado utilizar o método CF.

Tabela 54 – Comparativo do controle PI e PI + CF com $\delta=0,5\%$ – motobomba - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$

Sintonia	PI	PI + CF	Dif. (%)
<i>var PV8 (%)</i>	0,62	0,69	11,3
<i>var PV9 (%)</i>	0,67	0,51	-23,9
<i>var PV10 (%)</i>	0,64	0,89	39,1
<i>var PV med (%)</i>	0,64	0,7	9,4
<i>ISE 8</i>	1,2	3,34	178,3
<i>ISE 9</i>	1,44	3,69	156,3
<i>ISE 10</i>	1,3	3,98	206,2
<i>ISE med</i>	1,31	3,67	180,2
<i>var MV8 (%)</i>	0,5	0,0	-100,0
<i>var MV9 (%)</i>	0,36	0,0	-100,0
<i>var MV10 (%)</i>	0,58	1,06	82,8
<i>var MV med (%)</i>	0,48	0,35	-27,1
<i>T_s 9-8 (s)</i>	3,4	8,0	135,3
<i>T_s 8-9 (s)</i>	3,0	8,0	166,7
<i>T_s 9-10 (s)</i>	3,2	7,8	143,8
<i>T_s 10-9 (s)</i>	3,0	8,0	166,7
<i>T_s med (s)</i>	3,15	7,95	152,4
<i>M_{p1} (m³/h)</i>	0,78	1,02	30,8
<i>M_{p2} (m³/h)</i>	1,14	1,19	4,4
<i>M_p med (m³/h)</i>	0,96	1,11	15,6
<i>T_{s1} (s)</i>	6,4	7,2	12,5
<i>T_{s2} (s)</i>	7,4	9,8	32,4
<i>T_s med reg (s)</i>	6,9	8,5	23,2

Fonte: Autor

A fim de se efetuar um comparativo entre todos os controladores propostos neste trabalho, foi proposto criar uma pontuação única, composta pelos valores dos índices médios dos ensaios servo e regulatório através dos pesos mostrados na Tabela 55.

Tabela 55 – Pesos dos índices para pontuação final do controlador

Índices	Peso (%)
<i>var PV med (%)</i>	20
<i>ISE med</i>	20
<i>var MV med (%)</i>	20
<i>T_s med serv (s)</i>	20
<i>M_p med (m³/h)</i>	10
<i>T_s med reg (s)</i>	10

Fonte: Autor

Os índices foram normalizados, de modo que a nota 0 representa o controlador que teve o pior desempenho e 10 é atribuído ao melhor controlador. Foi dada nota 0 para os controladores que obtiveram um tempo médio de acomodação maior ou igual a 150s.

A pontuação final é composta de uma nota única que varia de 0 a 10, sendo 0 um péssimo controle e 10 um controle ideal. O resultado é mostrado na Tabela 56.

Tabela 56 – Pontuação final dos controladores

Controlador	Nota
Motobomba - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$	9,09
Válvula de Grafite - posicionador EP - $\tau_c = 0,8$. τ - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$	9,08
Válvula de Teflon – posicionador FF - $\tau_c = 2,8$. τ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ + CF	9,08
Válvula de Teflon – posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	9,07
Motobomba - $\tau_c = 0,8$. τ - $K_c = 0,54$ e $T_i = 1,1$	9,06
Válvula de Grafite - posicionador EP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	9,00
Válvula de Teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ + CR2	8,98
Válvula de Teflon – posicionador EP - $\tau_c = 0,8$. τ - $K_c = 0,63$ e $T_i = 0,95$	8,96
Motobomba - $\tau_c = 0,3$. τ - $K_c = 0,69$ e $T_i = 1,1$	8,93
Válvula de Teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ + CF	8,86
Válvula de Teflon – posicionador EP - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$ + CF	8,86
Válvula de Grafite - posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ + CF	8,86
Válvula de Teflon – posicionador FF - $\tau_c = 2,8$. τ - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	8,86
Válvula de Grafite - posicionador FF - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	8,75
Válvula de Grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ + CR2	8,75
Válvula de Teflon – posicionador FF - $\tau_c = 2,0$. τ - $K_c = 0,37$ e $T_i = 1,36$	8,74
Válvula de Grafite - posicionador FF - $K_c = 0,24$ e $T_i = 1,36$	8,54
Válvula de Grafite - posicionador EP - $\tau_c = 0,8$. τ - $K_c = 0,51$ e $T_i = 0,77$ + CF	8,50
Motobomba – Auto tuning - $K_c = 1,09$, $T_i = 5,69$ e $T_d = 0,91$	8,46
Motobomba - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 0,62$ e $T_i = 1,1$ + CF	8,43
Válvula de Teflon – posicionador EP - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 0,75$ e $T_i = 0,95$	8,40
Válvula de Teflon – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	8,34
Válvula de Grafite - posicionador EP - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 0,6$ e $T_i = 0,77$	6,51
Válvula de Teflon – conversor IP - $\tau_c = 0,3$. τ - $K_c = 0,46$ e $T_i = 0,73$	6,36
Válvula de Teflon – conversor IP - $\tau_c = 0,8$. τ - $K_c = 0,39$ e $T_i = 0,73$	5,86
Válvula de Teflon – posicionador EP - $\tau_c = 0,3$. τ - $K_c = 0,86$ e $T_i = 0,95$	5,30
Válvula de Grafite - posicionador EP - $\tau_c = 0,3$. τ - $K_c = 0,67$ e $T_i = 0,77$	5,14
Válvula de Teflon – conversor IP - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 0,43$ e $T_i = 0,73$	5,12
Válvula de Grafite – conversor IP - $\tau_c = 0,8$. τ - $K_c = 1,61$ e $T_i = 4,71$	3,77
Válvula de Grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ + CF	3,66
Válvula de Grafite – conversor IP - $\tau_c = 0,5$. τ - $K_c = 2,24$ e $T_i = 4,71$	2,58
Válvula de Grafite – conversor IP - $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$	2,28

Fonte: Autor

5.4 COMPARATIVO ENTRE BOMBA COM INVERSOR E VÁLVULA DE CONTROLE

Viana (2019) define perda de carga, em hidráulica como

A perda de energia que um fluido, em uma tubulação sob pressão, sofre em razão de vários fatores como o atrito deste com uma camada estacionária aderida à parede interna do tubo ou em razão da turbulência devida às mudanças de direção do traçado.

Há dois tipos de perdas de carga: as distribuídas e as localizadas. A distribuída ocorre em trechos retos de tubulação com diâmetro fixo. Já a localizada ocorre em componentes como válvulas, curvas, derivações, conexões, placas de orifício etc. Ocorre que

quanto maior a perda de carga no sistema hidráulico, maior a energia necessária para ser suprida pela bomba, a qual é chamada de altura manométrica (MATOS e FALCO, 1989).

A curva que relaciona a altura manométrica com a vazão fornecida pela bomba é chamada de curva característica da bomba, a qual pode ser vista na Figura 144. A curva 202 representa a bomba utilizada na Planta Piloto de Vazão.

Figura 144 – Curva característica da bomba KSB Megabloc 32-200

Fonte: (KSB, 2009)

As Figuras 145 e 146 mostram os valores de pressão diferencial lidos pelos transmissores de pressão diferencial das válvulas de grafite (PdIT15A) e teflon (PdIT15B) durante um experimento no modo servo.

Figura 145 – Perda de carga na válvula de grafite – PdIT15A

Fonte: Autor

Figura 146 – Perda de carga na válvula de Teflon – PdIT15B

Fonte: Autor

Quando controlando a vazão próximo a 8 m³/h, a válvula de grafite chega a gerar uma perda de carga próximo a 0,85 kgf/cm², enquanto a válvula de teflon alcança 0,78 kgf/cm². Esta perda de carga introduzida pelas válvulas de controle gera um esforço maior da bomba, se comparado ao controle feito usando um inversor de frequência para reduzir a rotação da bomba. O controle feito por válvulas demanda maior energia do motor, logo maior consumo de energia elétrica. A Figura 147 mostra um comportamento típico de consumo de energia elétrica para diferentes métodos de controle de vazão.

Figura 147– Consumo de energia em função dos métodos de controle de vazão

Fonte: (TSUTIYA, 2006)

Outro benefício de se usar o inversor de frequência é a redução da corrente de partida, como exibe a Figura 148. Um motor com partida direta tipicamente demanda uma corrente de partida de 6 a 8 vezes a corrente nominal I_n , enquanto que no inversor a corrente cresce em forma de rampa até um valor limite que pode ser parametrizável.

Figura 148 – Corrente de partida em sistema de partida direta e com inversor

Fonte: (TSUTIYA, 2006)

Estudos feitos por Tsutiya (2006) mostraram que a instalação de sistemas de controle de vazão por meio de inversores de frequência na empresa Sabesp levaram a:

- Redução do consumo de energia elétrica em 38%
- Redução da demanda de energia em 12%
- Melhoria do fator de potência de 0,85 para 0,98
- Eliminação do pico de corrente de partida de motores
- Retorno do custo da instalação do variador de rotação em 2,5 anos.

6 CONCLUSÃO

O uso do medidor de vazão mássico por efeito Coriolis permitiu tempos de resposta mais rápidos de controle e melhor precisão quando comparado com a medição de vazão por placa de orifício.

Ao se comparar o desempenho dos controladores das válvulas de alto atrito e de baixo atrito, de 14 ensaios realizados (contando todas as combinações de sintonias, posicionadores e compensadores de atrito), a válvula de baixo atrito foi superior em 13 ensaios e a válvula de alto atrito foi superior em apenas 1 ensaio. Este resultado mostra que o alto atrito insere uma banda morta que aumenta a variabilidade do processo e prejudica o controle.

O controle das válvulas pelo conversor I/P teve os piores resultados se comparado aos posicionadores. O posicionador EP teve melhor desempenho que o posicionador digital para a válvula de alto atrito. Para a válvula de baixo atrito, o posicionador digital só foi melhor que o EP quando foi usado o método CF. Sem este método, o melhor posicionador foi o EP. Era de se esperar que o posicionador digital tivesse resultados melhores que o posicionador EP. Uma das causas do posicionador digital não ter um melhor desempenho pode estar na sua parametrização. Em sua configuração há dezenas de parâmetros e seria necessário um suporte do fabricante para avaliar como obter a melhor parametrização.

A sintonia mais agressiva $\tau_c = 0,3 \cdot \tau$ teve o pior desempenho na maioria dos casos, exceto com a válvula de baixo atrito com conversor I/P. Na válvula de alto atrito com conversor I/P, o teste foi interrompido com esta sintonia, devido a oscilações que poderiam levar a planta a uma condição insegura de operação. As sintonias $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$, $\tau_c = 0,8 \cdot \tau$ e $K_c = 0,3$ e $T_i = 1,36$ tiveram resultados superiores.

Em seis experimentos realizados, o controlador PI com desabilitação de controle (CF) obteve melhor desempenho em 5 casos e teve resultado pior em 1 caso (válvula de alto atrito com posicionador EP) quando comparado com o controlador PI sem o CF. Este resultado mostra que o método tem bom potencial principalmente para redução da variabilidade da vazão e redução do desgaste do elemento final de controle.

O método de compensação de atrito CR2 com desabilitação de controle se mostrou aplicável somente para o conversor I/P. Este método é um reforço ao sinal de saída do controlador PI, que no caso do conversor I/P, o sinal elétrico é transformado em sinal de pressão. Já no caso dos posicionadores, o sinal de saída do controlador é transformado em posição da válvula e adicionar reforço na posição gerou instabilidade no controle. O

método CR2 gerou desempenhos superiores para as duas válvulas, mas a melhora foi mais expressiva na válvula de alto atrito, mostrando que o método conseguiu compensar os efeitos prejudiciais do atrito.

O armazenamento dos dados dos experimentos através do sistema PI permitiu muitas vantagens em relação ao sistema da placa de aquisição como o registro de todos os dados acessíveis do SDCCD, garantia do tempo real da aquisição, dados com pouco ruído, dados de todos os ensaios registrados de forma automática e guardados por um tempo longo.

O controle da vazão realizado pelo inversor de frequência alterando a rotação da bomba obteve excelentes resultados, com baixa variabilidade, ISE e tempos de acomodação, para todas as sintonias encontradas no método da Síntese Direta. O melhor controlador de todos os experimentos realizados com a Planta Piloto de Vazão foi o controlador do inversor com a sintonia $\tau_c = 0,5 \cdot \tau$.

A sintonia encontrada pela função *auto tuning* do SDCCD gerou uma resposta mais lenta do controlador, aumentando o ISE e o tempo de acomodação. Porém, é uma opção rápida de sintonia que pode ser utilizada como ponto de partida para realizar ajustes na sintonia por tentativa e erro, por exemplo. O método CF não melhorou os índices de desempenho deste controlador e o método CR2 não foi aplicado para a motobomba.

O uso do inversor de frequência apresenta inúmeras vantagens em relação ao controle realizado por válvulas. Desde a redução de consumo de energia elétrica, redução de perdas de carga, baixa corrente de partida dos motores até a eliminação de problemas gerados por atrito nas válvulas de controle. Porém, mesmo se empregando inversores de frequência em bombas, as válvulas de controle se mantêm úteis, por exemplo, para serem utilizadas em circuitos de *by-pass* para alívio de pressão do circuito hidráulico.

6.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

São sugeridos como trabalhos futuros para a Planta Piloto de Vazão:

- Criar um PID adaptativo para os posicionadores de válvulas, o qual poderá ter parâmetros mais suaves para baixas vazões e mais agressivos para altas vazões.
- Criar um PID fracionário;
- Testar diferentes sintonias dos parâmetros internos do posicionador digital. Os mesmos devem ser ajustados na interface *Fieldbus Builder*;
- Incluir o *encoder*, os posicionadores digital e eletropneumático no modelo fenomenológico;
- Identificação da planta com modelos não lineares;

- Comparar modelos identificados com modelo fenomenológico;
- Incorporar no gêmeo digital da planta a Identificação dos posicionadores digital e modelar a bomba controlando a vazão;
- Desenvolver uma interface Web que permita a leitura dos dados da planta através de dispositivos móveis como *tablets* e celulares;
- Modelar e propor um controlador PI para a válvula de perturbação. Comparar o desempenho com as demais válvulas.
- Testar o método CR2 para a válvula de alto atrito e conversor I/P com outros valores de S (ex.: $S=25,96\%$) para verificar se é possível melhorar ainda mais os indicadores de desempenho.

REFERÊNCIAS

ABB. **S800 I/O Modules and Termination Units**. 2013.

ABB. **Descrição Sistema 800xA**. Disponível em:

<http://www.abb.com.br/cawp/seitp202/1ba47c3d8d0e051283258005004b4aa1.aspx>

Acesso em: 3 maio 2019.

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas**: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas: teoria e aplicação. 4ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.

ARTISAN, T. G. **National Instruments PCI-6229 Data Acquisition Module**. Disponível em: <https://www.artisan-g.com/TestMeasurement/94040-1/National-Instruments-PCI-6229-Multifunction-Data-Acquisition-Module>. Acesso em: 25 out. 2020.

AVEVA. **AVEVA & OSIsoft combine to accelerate the digital transformation of the industrial world**. Disponível em: <https://www.aveva.com/en/info/aveva-agrees-to-acquire-osisoft/>. Acesso em: 25 out. 2020.

BAEZA, J. R. **Controle Não Linear Aplicado a Malhas de Controle com Válvulas de Alto Atrito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

BOJORGE, N. **Controle Servo e Regulatório**. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Universidade Federal Fluminense, 2017. Disponível em: http://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/Control_Aula11_FB_Servo-Regulatorio_1sem2017.pdf. Acesso em: 30 set. 2020.

CAMPOS, P. R. B. C. **Introdução ao Sistema de Controle**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/brero/controle_1/material-didatico/2_Introducao%20ao%20controle_03.pdf/at_download/file. Acesso em: 30 set. 2020.

CHEREM, L. B. **Avaliação do uso de inversor de frequência em estação elevatória de água**. 2016. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

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

COSTA, C. D. **Controle Digital**: Modos de Controle. Disponível em: http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/2.a%20Aula_CDG_Control

e%20de%20Processo_%20Modos%20de%20Controle.ppthttp://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/2.a%20Aula_CDG_Control%20de%20Processo_%20Modos%20de%20Controle.pptt. Acesso em: 26 set. 2020.

CUADROS, M. A. de S. L. **Quantificação e Compensação de Atrito em Válvulas de Controle Pneumáticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico. Universidade Federal de Espírito Santo, 2011.

CUI J., CHEN Y., LIU T. **Discrete-time domain IMC-based PID control design for industrial processes with time delay**. Dalian University of Technology, 2016

DESVAGES, H. P. M.; RIOS, M. A. A. **Modelagem e estudo de métodos de compensação de atrito para uma válvula de controle com posicionador eletropneumático**. Orientador: Claudio Garcia. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase Automação e Controle) - Universidade de São Paulo, 2018.

DIAS, P. **Partida de Motores NBR IEC**. São Paulo: ETEC, 2020.

DREKE, V. D. R. **Modelado y simulación de la planta piloto de flujo**. Projeto de Formatura (Ingeniería Automática) – Facultad de Ingeniería Automática y Biomédica, Universidad Tecnológica de la Habana, 2017.

EMERSON. **Control Valve Handbook**. 5th edition. 2019.

ENDRESS+HAUSER. **Proline Promass 80F, 83F**. Coriolis mass flow measuring system: Technical Information. Suíça, 2009.

ENDRESS+HAUSER. **Medição de vazão**. Disponível em: <https://www.br.endress.com/pt/produtos/vaz%C3%A3o>. Acesso em: 25 out. 2020.

FISHER. **Treinamento FieldVue DVC**, 2005.

FISHER. **DVC 6000f Digital Valve Controllers**. Instruction Manual, 2009.

FISHER. **Fisher® 3582 and 3582i Positioners, 582i Electro-Pneumatic Converter, and 3583 Valve Stem Position Transmitter**. Instruction Manual, 2012.

FISHER. **Fisher® 846 Current-to-Pressure Transducer**. Instruction Manual, 2015.

FISHER. **Atuador de diafragma Fisher™ 657 tamanhos 30/30i a 70/70i e 87**. Manual de instruções. 2018.

FISHER. **What are the Components of a Globe Valve?** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8hfvHXhLvGY>. Acesso em: 26 out. 2020.

FISHER. **What are I/P Transducers?** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LdH00Ow4EHg>. Acesso em: 27 out. 2020.

- FISHER. **What are Valve Positioners?** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dNq4H9WfrfE>. Acesso em: 27 out. 2020.
- FISHER. **What is a Digital Valve Controller?** Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Uc0W-j_g2EI. Acesso em: 27 out. 2020.
- FRANCHI, C. M. **Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.
- GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. 2ª ed. São Paulo: Editora da USP - EDUSP, 2005. v. 1. 684p.
- GARCIA, C. Comparison of friction models applied to a control valve. **Control Engineering Practice**, v.16, n.10, pp.1231-1243, 2008.
- GARCIA, C. **Controle de Processos Industriais - volume 1: Estratégias Convencionais**. São Paulo, Editora Blucher, 2017.
- GARCIA, C.; HERRERA, R. M.; SANTOS, R. S.; SOUSA, R. F. Efeito do atrito em válvulas na variabilidade de malhas de controle. **Revista Controle e Instrumentação**, ano 15, n.176, pp.48-52, 2012.
- GODOY, R. J. C. **Adequação de Planta Piloto de Neutralização de pH a Plataforma de Pesquisa e Desenvolvimento**. Projeto de Formatura e Iniciação Tecnológica. São Paulo, 2011.
- HÄGGLUND, T. Automatic on-line estimation of backlash in control loops. **Journal of Process Control**, Elsevier, v.17, n. 6, p. 489-499, 2007.
- HARAOKA, L. Y.; KAWAMORITA, G. K. **Estudo de Diferentes Atuadores em Malhas de Controle de Vazão**. Projeto de Formatura (Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2017.
- HITECNOLOGIA. **O que é encoder**. Disponível em: <https://www.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- HIDALGO, M. C. **Compensação de Atrito em Válvulas de Controle: Técnicas Usuais e Inovações**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2015.
- KANO, M.; MARUTA, H.; KUGEMOTO, H.; SHIMIZU, K. Practical model and detection algorithm for valve stiction. In: **Proceedings of the 7th IFAC DYCOPS**, Boston, USA, 2004.
- KSB. **Manual de curvas características**, N° A2740/42/44.1P/E/S/6, 2009.

- MADDARENA, E. **Aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento**. Workshop sobre eficiência energética. Siemens. Brasília, DF. 2006.
- MARQUES, F. G. **Modeling and automatic friction compensation of pneumatic diaphragm valves with digital positioners**. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2019.
- MARQUES, R. P. **Instrumentação Industrial**. Notas de Aula de PTC3421, 2017.
- MATHWORKS. **Documentação de MATLAB R2014a**, 2014.
- MATHWORKS. **GoodnessOfFit**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html>. Acesso em: 11 out. 2020.
- MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. Rio de Janeiro: JR Editora Técnica, 1989.
- MESQUITA, R. P. **Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- MESQUITA, M. S.; RIOS, M. A. A.; DESVAGES, H. P. M. **Manual da Planta Piloto de Vazão v3.2**. Universidade de São Paulo, 2018.
- MINDSET, T. E. **How solenoid valves work**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=-MLGr1_Fw0c. Acesso em: 25 out. 2020.
- MORA, J. A. A. **Modelagem e simulação de planta-piloto de vazão**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2014.
- MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013.
- NI. **Low-Cost M Series Multifunction Data Acquisition**. Datasheet Manual. 2014.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2000. 808 p.
- OSISOFT. **PI System**. Disponível em: <https://www.osisoft.pt/pi-system/>. Acesso em: 02 nov. 2020.
- PAIOLA, C. E. G. **Técnicas intrusivas de detecção de atrito em válvulas de controle**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

- PEÑALOZA, A. C. V. **Estudo de métodos de compensação de atrito em uma válvula de controle em planta de pH**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Politécnica da USP, 2015.
- SICK. **Incremental Encoders DFS60**: online data sheet, 2016.
- SILVA, B. C. **Avaliação da Eficiência de Compensadores de Atrito Aplicados a Válvulas de Controle**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.
- SMITH, C. L. **Digital computer process control**. Scranton: Intext Educational Publishers, 1972.
- TSUTIYA, M. T. **Utilização de inversores de Frequência para diminuição de consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento**. Apresentação para o VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa, PB. 2006.
- UEHARA, D. **Detecção e quantificação de atrito em válvulas de controle**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2009.
- VIANA, D. **Perda de carga**: entenda o que é. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/perda-carga/>. Publicado em: 14 jan. 2019. Acesso em: 18 out. 2020.
- VIEIRA, T. E. D. **Avaliação de Módulos de IGBTs em Conversores de Frequência Submetidos à Sobretensão Decorrentes de Curtos-Circuitos em Motores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - São João del Rei, UFSJ, 75p, 2018.
- WEG. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. 3ª ed. Jaraguá do sul, SC. 2005
- WEG. **Catálogo de seleção de motores elétricos**. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Acesso em: 12 maio 2020.

APÊNDICE B – PROGRAMA EM SIMULINK PARA LEITURA E ESCRITA DE DADOS NA PLACA DE AQUISIÇÃO PCI6229 DA NI

ENDEREÇO BORNE CARTÃO IDENTIFICAÇÃO SERVIÇO

AO0	J22/J55E	FV-11	Comando valv teflon
AO1	J21/J54E	AI6	AI6 do SDCD
AO2	J22/J55D	FV-13	Comando valv perturb
AO3	J21/J54D	FV-12	Comando valv grafite

AI7	J57/GND E	PdT15A	Trans Pres Dif Teflon
AI15	J23/GND E	PdT15B	Trans Pres Dif Grafite
AI17	J32/J33D	PT-11	PT grafite FV-11
AI18	J64/J65D	ZT-11	LVDT grafite FV-11
AI20	J27/J28D	FT-10A	Medidor vazao analog
AI21	J56/J60D	FT-10V	Medidor vazao Coriolis
AI22	J25/J29D	ZT-12	LVDT teflon FV-12
AI30	J58/J59D	PT-12	PT teflon FV-12

AO0 E AO1, AI0 A AI15 - CONECTOR 0 (DE CIMA)
AO2 E AO3, AI16 A AI31 - CONECTOR 1 (DE BAIXO)

*corrigido de AI31 para AI22 LVDT teflon

Fonte: Autor

APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLANTA DE VAZÃO

Diagrama de Blocos Controle de Vazão (Malha Fechada)