

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Química

RODOLPHO RODRIGUES FONSECA

MONITORAMENTO E CONTROLE AVANÇADO APLICADOS À FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

CAMPINAS
2017

RODOLPHO RODRIGUES FONSECA

MONITORAMENTO E CONTROLE AVANÇADO APLICADOS À FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO RODOLPHO RODRIGUES FONSECA E ORIENTADA PELO PROF. DR. FLÁVIO VASCONCELOS DA SILVA.

CAMPINAS
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 140474/2015-3; FAPESP, 2015/05207-8

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Fonseca, Rodolpho Rodrigues, 1987-
F733m Monitoramento e controle avançado aplicados à flotação por ar dissolvido / Rodolpho Rodrigues Fonseca. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Automação. 2. Controle de processo. 3. Lógica fuzzy. 4. Tratamento de água. 5. Flotação. I. Silva, Flávio Vasconcelos da,1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Monitoring and advanced control applied to dissolved air flotation
Palavras-chave em inglês:
Automation
Process control
Fuzzy logic
Water treatment plants
Flotation
Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática
Titulação: Doutor em Engenharia Química
Banca examinadora:
Flávio Vasconcelos da Silva [Orientador]
Luís Cláudio Oliveira Lopes
Luís Fernando Novazzi
Edson Aparecido Abdul Nour
Guilherme José de Castilho
Data de defesa: 11-04-2017
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado defendida por Rodolpho Rodrigues Fonseca e aprovada em 11 de abril de 2017 pela Comissão Examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva
Faculdade de Engenharia Química
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes
Faculdade de Engenharia Química
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Luís Fernando Novazzi
Departamento de Engenharia Química
Centro Universitário FEI

Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour
Faculdade de Engenharia Civil
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho
Faculdade de Engenharia Química
Universidade Estadual de Campinas

A ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Examinadora encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Agradecimentos

A Deus por me inspirar sabedoria, guiar o meu caminho e conceder tantas bençãos em minha vida.

À minha querida esposa Mariana que esteve sempre ao meu lado, me incentivando, dividindo seu conhecimento e me apoiando incondicionalmente com paciência, amor e carinho. Você foi essencial ao longo desta caminhada.

A meus pais, alicerce da minha vida, pelo seu amor e esforço para que eu pudesse ter uma educação de qualidade, fundamental para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Flávio V. da Silva pelos anos de parceria na realização deste e de outros projetos.

A todos os amigos do LCAP que de alguma forma me ajudaram durante os 4 anos do doutorado, em especial a Rafael Sêncio, Ivan Franco e Pedro Thompson pela inestimável contribuição neste trabalho.

À CAPES, CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro.

Resumo

A flotação por ar dissolvido é empregada principalmente em tratamento de águas para consumo. Consiste em separar partículas em suspensão através da sua adesão a micro-bolhas de ar de 30-100 μm de diâmetro, provocando uma diminuição na densidade aparente destas partículas pela formação de um aglomerado partícula/micro-bolha. Para isto, ar é dissolvido sob pressão em água clarificada dentro de um vaso saturador e em seguida injetado no tanque de flotação após uma rápida queda de pressão que permite a nucleação das micro-bolhas de ar. No vaso saturador é preciso regular o nível de água para não ocorrer seu esgotamento, a pressão para manter a qualidade das micro-bolhas geradas e não causar sobre-pressão no sistema, e a fração de reciclo para garantir a separação do material suspenso com o fornecimento adequado de micro-bolhas no flotador. Este trabalho é um dos primeiros a explorar o controle e automação do processo de tratamento de água empregando flotação por ar dissolvido. Foi construído um protótipo totalmente automatizado deste processo de tratamento, iniciando uma nova linha de pesquisa com a investigação da relação de variáveis manipuladas no controle do processo. Foram implementadas malhas de controle utilizando recursos de inteligência artificial para manipular as condições de operação do sistema de flotação visando regular a turbidez da água na saída do flotador e, com isto, buscando também menor consumo de energia nos equipamentos e menor esforço de controle nos atuadores. Atuando na fração de reciclo para corrigir a turbidez pós-flotação, a estratégia *Fuzzy* permitiu uma melhoria de 70,6 % no critério IAE em relação à estratégia utilizando a pressão do vaso saturador para regular a turbidez com um controlador PI. Embora não tenha sido observada redução no consumo de energia da planta em relação à malha aberta, a implementação de malha de controle para regulação da turbidez possibilita menor contaminação do filtro de areia com flocos não flotados, melhorando a carreira de filtração do sistema e sem penalizar os atuadores com elevado esforço de controle.

Palavras-chave: Automação; Controle de processo; Lógica *Fuzzy*; Tratamento de água; Flotação.

Abstract

Dissolved air flotation is a water treatment process widely applied to produce drinking water. Rely on suspended particles removement by attachment to air micro-bubbles from 30-100 μm, hence reducing particles density by particle/microbubble aglomerate formation. In order to achieve that, air is dissolved in clean water inside a vessel pressured with air and then injected in flotation tank after an abrupt pressure drop that allows microbubbles generation. At saturator vessel some variables such as liquid level, pressure, and recycle ratio must be regulated. The liquid level must be controlled to avoid drying-out, the pressure must be regulated to keep air dissolution and avoid system overpressure, and the recycle ratio to guarantee suspended material separation by adequate microbubbles supply to flotation tank. This work is pionner in investigating dissolved air flotation process control and an automated flotation system was assembled on this work. The aim of this research was to investigate the relationship between manipulated variables in control and automation of dissolved air flotation process. Control loops with artificial intelligence techniques were designed to control dissolved air flotation operate conditions aiming clarified water turbidity control and, thus, lower energy consumption and control efforts. Using recycle ratio as manipulate variable, Fuzzy control strategy allowed an improvement of 70,6 % on IAE criteria in comparison to the control strategy using PI controller and saturator pressure as manipulate variable. Although the Fuzzy control strategy did not reduced the power consumption compared to open loop strategy, turbidity control enables less filter contamination with flocs not floatted, improving filter cleaning procedure and not affecting actuators control efforts.

Keywords: Automation; Process control; Fuzzy logic; Water treatment plants; Flotation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Possível estrutura química do biopolieletrólito Tanfloc®. 25
Figura 2 – Formação de aglomerado micro-bolhas/partícula na flotação. 27
Figura 3 – Típico sistema FAD com corrente de recirculação pressurizada. 31
Figura 4 – Funções de pertinência para a variável temperatura. 35
Figura 5 – Mecanismo de inferência *Fuzzy*. 37
Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema com malha em *override* para proteção do atuador. Adaptado de Seborg (2004). 39
Figura 7 – Exemplo de um sistema de controle de vazão sem e com malha em *override* para o nível do tanque. Adaptado de Smith e Corripio (2008). 39
Figura 8 – Diagrama de blocos de sistema com malha em *override* para proteção da variável Y_2. 40
Figura 9 – PFD do sistema de FAD com recirculação pressurizada. 42
Figura 10 – P&ID do sistema de FAD com recirculação pressurizada. 43
Figura 11 – Blocos funcionais no programa de aplicação. 45
Figura 12 – Interface de configuração do controlador do *driver* do MP. 46
Figura 13 – Malha para controle de Q_t. 50
Figura 14 – Protótipo de flotação por ar dissolvido. 57
Figura 15 – Floculador em acrílico. 58
Figura 16 – Flotador em acrílico. 59
Figura 17 – Remoção do material flotado pelo raspador. 60
Figura 18 – Detalhe da camada de material flotado formada acima da zona de contato. . 60
Figura 19 – Filtro de areia e tanque de armazenamento de água tratada (TQ04). 61
Figura 20 – Sistema de saturação da água. 62
Figura 21 – Vaso de saturação instrumentado. 63
Figura 22 – Válvula agulha de C_v igual a 0,03. 64
Figura 23 – Quadro de comando da planta de FAD. 65
Figura 24 – Disjuntores, contatora e *cooler* do quadro de comando. 66
Figura 25 – Fontes de alimentação de corrente contínua e barramento terra. 66
Figura 26 – Bornes do quadro de comando. 67
Figura 27 – Controlador lógico programável utilizado no protótipo. 67
Figura 28 – Controlador do *driver* do motor de passo que atua na válvula agulha. 69
Figura 29 – Conjunto motor de passo e válvula agulha. 70
Figura 30 – Inversores de frequência da planta de FAD. 71
Figura 31 – Bombas P01, P02 e P03. 72
Figura 32 – Bombas P04 e P05 e seus respectivos PWMs. 72
Figura 33 – Válvulas reguladoras de pressão e de fluxo do vaso saturador. 73

Figura 34 – Ajuste dos atuadores do sistema de FAD. 74
Figura 35 – Módulo indicador e transmissor de pH. 75
Figura 36 – Turbidímetros *online* e *offline* do sistema de FAD. 75
Figura 37 – Medidores de vazão empregados no protótipo de FAD. 76
Figura 38 – Transmissores de temperatura, pressão absoluta e pressão diferencial. 77
Figura 39 – Transdutor de potência ativa. 77
Figura 40 – Calibração dos sensores conectados ao cartão AI8321. 78
Figura 41 – Calibração dos sensores conectados ao cartão AI4622. 79
Figura 42 – Tela de navegação principal do sistema SCADA da planta de FAD. 80
Figura 43 – Tela de navegação secundária do sistema SCADA da planta de FAD, para visualização do vaso saturador e suas variáveis de processo. 81
Figura 44 – Tela de navegação secundária do sistema SCADA da planta de FAD, para visualização do flotador e suas variáveis de processo. 81
Figura 45 – Aplicação de filtro digital no sinal de pH. 84
Figura 46 – Aplicação do filtro digital no sinal de Q_t. 85
Figura 47 – Aplicação do filtro digital no sinal de Q_r. 86
Figura 48 – Melhoria no cálculo de F_r com o uso de filtros nas leituras de Q_t e Q_r. . . . 86
Figura 49 – Aplicação do filtro digital no sinal do nível. 87
Figura 50 – Aplicação do *Noise Spike Filter* no sinal da turbidez. 88
Figura 51 – Alíquotas do efluente nas diferentes etapas da planta de FAD. 89
Figura 52 – Identificação da FOPDT para a vazão de efluente por curva de resposta. . . . 90
Figura 53 – Malha de controle da vazão de efluente. 91
Figura 54 – Malha de controle da abertura e fechamento da válvula agulha. 92
Figura 55 – Estratégia de acionamento do motor de passo. 92
Figura 56 – Malha de controle do nível de água no vaso saturador. 93
Figura 57 – Malhas em *override* para controle da pressão no vaso saturador. 94
Figura 58 – Atuação das malhas *override* para a pressão do vaso. 95
Figura 59 – Malha em *override* para controle da vazão de reciclo. 96
Figura 60 – Atuação da malha *override* para a vazão de reciclo. 97
Figura 61 – Comportamento dinâmico das variáveis do protótipo de FAD em malha aberta. 98
Figura 62 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 em malha aberta (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b). 101
Figura 63 – Identificação da FOPDT para a turbidez em função da pressão por curva de resposta. 103
Figura 64 – Malha de controle da turbidez na estratégia SISO I. 104
Figura 65 – Variação da vazão de reciclo em função da abertura da válvula V01a e da pressão do vaso TQ05. 104
Figura 66 – Malha para controle da fração de reciclo na estratégia SISO I. 104
Figura 67 – Comportamento dinâmico das variáveis com a estratégia SISO I. 106

Figura 68 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com SISO I (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b). 107
Figura 69 – Comportamento dinâmico da MV e do sinal de controle da V02 na estratégia SISO I em comparação com F_r. 108
Figura 70 – Identificação da FOPDT para a turbidez em função da vazão de reciclo por curva de resposta. 109
Figura 71 – Malha de controle da turbidez na estratégia SISO II. 110
Figura 72 – Comportamento dinâmico das variáveis com a estratégia SISO II. 111
Figura 73 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com SISO II (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b). 112
Figura 74 – Abertura da válvula V01a na estratégia SISO II em comparação com F_r. . . 113
Figura 75 – MFs das variáveis de entrada e saída do *Fuzzy* I projetado para a malha MISO. 115
Figura 76 – Superfície de resposta do controlador *Fuzzy*. 116
Figura 77 – Malha de controle da turbidez na estratégia MISO. 117
Figura 78 – Comportamento dinâmico das variáveis do protótipo de FAD com a estratégia MISO usando o controlador *Fuzzy* I. 118
Figura 79 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com *Fuzzy* I (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b). 119
Figura 80 – Abertura da válvula V01a na estratégia MISO com *Fuzzy* I em comparação com F_r. 120
Figura 81 – Comportamento dinâmico das variáveis do protótipo de FAD com a estratégia MISO usando o controlador *Fuzzy* II. 121
Figura 82 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com *Fuzzy* II (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b). 122
Figura 83 – Abertura da válvula V01a na estratégia MISO com *Fuzzy* II em comparação com F_r. 123
Figura 84 – P&ID no modo Pressurização Total. 135
Figura 85 – P&ID no modo Pressurização Parcial. 136
Figura 86 – Mapa de conexão elétrica para energização do protótipo de FAD. 138
Figura 87 – Mapa de conexão elétrica para instrumentação do protótipo de FAD. (Parte I) 140
Figura 88 – Mapa de conexão elétrica para instrumentação do protótipo de FAD. (Parte II) 141
Figura 89 – Programa de aplicação do CLP. (Parte I) 142
Figura 90 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte II) 143
Figura 91 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte III) 144
Figura 92 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte IV) 145
Figura 93 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte V) 146
Figura 94 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte VI) 147
Figura 95 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte VII) 148
Figura 96 – Determinação de L para o filtro do sinal de pH. 155
Figura 97 – Determinação de L para o filtro do sinal de nível. 156

Figura 98 – Determinação de L para o filtro do sinal de vazão de reciclo. 157
Figura 99 – Determinação de L para o filtro do sinal de vazão de efluente. 158
Figura 100 – Determinação de Δy para o filtro do sinal de turbidez. 159

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Coeficientes para predição de concentração mássica de ar dissolvido em água usando vaso saturador não empacotado (BAHADORI *et al.*, 2013). 30
Tabela 2 – Exemplo de base de regras de controlador *Fuzzy*. 36
Tabela 3 – Lista de atuadores, equipamentos e instrumentos da planta de FAD. 44
Tabela 4 – Lista de alarmes da planta de FAD. 82
Tabela 5 – Resultados do *Jar Test* para efluente com turbidez inicial de aproximadamente 40 NTU. 88
Tabela 6 – Parâmetros do controlador PI e do modelo FOPDT para a vazão de efluente. 91
Tabela 7 – Parâmetro dos controladores PI das malhas *override* para pressões alta e baixa no saturador. 94
Tabela 8 – Parâmetros do controlador PI da malha *override* para vazão de reciclo. . . . 97
Tabela 9 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada em malha aberta. . . 100
Tabela 10 – Parâmetros do controlador PI e do modelo FOPDT para turbidez em função da pressão. 103
Tabela 11 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia SISO I. 107
Tabela 12 – Critérios de desempenho IAE e ISE e esforços de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha SISO I. 108
Tabela 13 – Parâmetros do controlador PI e do modelo FOPDT para a turbidez em função da vazão de reciclo. 110
Tabela 14 – Critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha SISO II. 113
Tabela 15 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia SISO II. 114
Tabela 16 – Base de regras do controlador *Fuzzy* da estratégia MISO. 114
Tabela 17 – Critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha *Fuzzy* I. 117
Tabela 18 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia MISO com *Fuzzy* I. 119
Tabela 19 – Critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha *Fuzzy* II. 123
Tabela 20 – Redução dos critérios de desempenho e esforços de controle em relação a SISO I. 124
Tabela 21 – Consumos de energia Pot_t e Pot_l nos ensaios. 124
Tabela 22 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia MISO com *Fuzzy* II. 124
Tabela 23 – Mapa de memórias do CLP. (Parte I) 149

Tabela 24 – Mapa de memórias do CLP. (Parte II) 150
Tabela 25 – Mapa de memórias do CLP. (Parte III) 151
Tabela 26 – Mapa de endereçamento da entradas do CLP. 152
Tabela 27 – Mapa de endereçamento das saídas do CLP. 152

Lista de abreviaturas e siglas

CFD	*Computational fluid dynamic*
CLP	Controlador lógico programável
CoA	Centro-da-Área
ETA	Estação de tratamento de águas
ETE	Estação de tratamento de efluentes
FAD	Flotação por ar dissolvido
FOPDT	*First order plus dead time*
IAE	*Integral of absolut error*
IHM	Interface homem-máquina
ISE	*Integral of squared error*
LCAP	Laboratório de Controle e Automação de Processos
MC	Modo de controle
MF	Função de pertinência
MISO	*Multiple-input-single-output*
MP	Motor de passo
MPC	*Model predictive control*
MV	Variável manipulada
NPSH	Altura líquida positiva de sucção
NTU	*Nephelometric turbidity unit*
OLE	*Object link embendding*
OPC	*Open plataform of communication*
P&ID	*Piping and Instrumentation Diagram*
PFD	*Process Flow Diagram*
POA	Processos oxidativos avançados

PV	Variável de processo
PWM	*Pulse Width Modulation*
RFB	Realimentação de restauro
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition*
SISO	*Single-input-single-output*
SP	*Setpoint*

Lista de símbolos

Δe_{tu}	Variação do erro da turbidez no período de 3 min [NTU]
ΔH_{diss}	Entalpia de dissolução de gás [$\mathrm{J/mol}$]
Δu	Variação do sinal de controle [unid. saída]
$\Delta V01a_{ref}$	Sinal de saída dos controladores *Fuzzy* [$\%$]
Δy	Variação máxima no *Noise spike filter* [NTU]
$\mu_{OUT}(u_i)$	Área da MF [unid. área]
τ_I	Tempo integral de um controlador PID [s]
τ_p	Constante de tempo de uma FOPDT [s]
τ_t	*Tracking time constant* da ação *anti-reset wind-up* [s]
A_f	Área do flotador [$\mathrm{m^2}$]
Ca_{max}	Concentração de ar na água pela Lei de Henry [$\mathrm{mg/L}$]
Ca_p	Concentração predita de ar na água [$\mathrm{mg/L}$]
C_v	Coeficiente de vazão da válvula agulha
$e(t)$	Erro da variável de processo [unid. de PV]
e_{tu}	Erro instantâneo da turbidez [NTU]
F_r	Fração de reciclo [$\%$]
H_a	Constante adimensional da Lei de Henry
K_c	Ganho de um controlador PID [unid. saída/unid. entrada]
K_d	Constante adimensional de dissolução do gás
K_p	Ganho de uma FOPDT [unid. saída/unid. entrada]
L	Número de pontos para cálculo da média no filtro digital
N	Nível do filtro do cartão de entrada analógica
P	Pressão interna do saturador [bar]

Pot_i	Potência ativa instantânea [kW]
Pot_t	Consumo de energia [kWh]
Pot_l	Consumo de energia por litro de água tratada [$\mathrm{kWh/L}$]
$V01a_{\%}$	Grau de abertura da válvula V01a [$\%$]
v_f	Velocidade de flotação [$\mathrm{m/h}$]
V_t	Volume total de água tratada [L]
Q_r	Vazão de reciclo [$\mathrm{mL/min}$]
Q_t	Vazão de efluente [$\mathrm{L/min}$]
R	Constante universal dos gases [$\mathrm{J/(molK)}$]
T	Temperatura do gás [K]
t_d	Tempo morto de uma FOPDT [s]
u	Saída do controlador [unid. saída]
u_i	Centróide da área individual das MFs [unid. universo de discurso]
x_k	Valor filtrado de saída do cartão analógico [bits]
x_{k-1}	Valor filtrado de saída analógica atrasada em uma amostragem [bits]
Y_a	Concentração do componente no meio gasoso [$\mathrm{mg/L}$]
y_k	Valor digital de entrada em cartão analógico [bits]
y_{k-1}	Valor digital de entrada analógica atrasada em uma amostragem [bits]

Sumário

1 Introdução 21

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica 23

2.1 Floculação 23

2.2 Flotação 26

2.2.1 Flotação por ar dissolvido (FAD) 28

2.3 Controle e automação em sistemas de flotação 32

2.3.1 Controle em FAD 34

2.3.2 Técnicas de Controle Avançado 34

2.3.2.1 Controle baseado em lógica *Fuzzy* 35

2.3.2.2 Controle em *override* 38

2.4 Hipótese 41

2.5 Objetivos 41

3 Materiais e Métodos 42

3.1 Montagem e Automação do protótipo de FAD 42

3.1.1 Controlador Lógico Programável 43

3.1.2 Controlador do *driver* do motor de passo 46

3.1.3 Ajuste dos atuadores 47

3.1.4 Calibração dos sensores 47

3.2 Preparação e tratamento do efluente 48

3.2.1 Preparo do efluente 48

3.2.2 *Jar Test* 48

3.2.3 *Start-up* do protótipo de FAD 49

3.2.4 Limpeza do filtro de areia 50

3.3 Estratégias de controle aplicados a FAD 50

3.3.1 Vazão de efluente (Q_t) 50

3.3.2 Posição da válvula agulha 51

3.3.3 Nível de água no vaso saturador 51

3.3.4 Proposta de malhas em *override* 52

3.3.4.1 Pressão no vaso saturador 52

3.3.4.2 Vazão de reciclo 52

3.3.5 Controle da turbidez 53

3.3.5.1 Estratégias SISO 53

3.3.5.1.1 SISO I - Pressão no Saturador (P) 53

3.3.5.1.2 SISO II - Fração de Reciclo (F_r) 54

3.3.5.2 Estratégia MISO 54

3.4 Performance de controle e consumo energético 55

4 Resultados e Discussão 57
4.1 Montagem do protótipo de FAD 57
4.1.1 Floculador 58
4.1.2 Flotador 59
4.1.3 Filtro de areia 60
4.1.4 Vaso de saturação 62
4.1.5 Válvula agulha 63
4.2 Automação do protótipo de FAD 64
4.2.1 Quadro de comando 65
4.2.1.1 Disjuntores e contatora 65
4.2.1.2 Fontes de alimentação, bornes e barramento 66
4.2.1.3 Controlador Lógico Programável 67
4.2.1.4 Controlador do *driver* do motor de passo 68
4.2.2 Atuadores 69
4.2.2.1 Dados de ajuste dos atuadores 73
4.2.3 Sensores 74
4.2.3.1 Dados de calibração dos sensores 77
4.2.4 SCADA 79
4.2.4.1 Telas de supervisão 79
4.2.4.2 Comunicação entre CLP, SCADA e MatLab® 82
4.3 Filtros de sinais 83
4.4 Padronização do tratamento físico-químico do efluente 88
4.5 Controle aplicado ao processo FAD 89
4.5.1 Controle da vazão de efluente 90
4.5.2 Controle de posição da válvula agulha 91
4.5.3 Controle do nível de água no vaso saturador 92
4.5.4 Malhas em *override* 93
4.5.4.1 Controle *override* da pressão no vaso saturador 93
4.5.4.2 Controle *override* da vazão de reciclo 96
4.5.5 Operação da planta em malha aberta para a turbidez 97
4.5.6 Controle da turbidez 102
4.5.6.1 Estratégia SISO I 102
4.5.6.2 Estratégia SISO II 109
4.5.6.3 Estratégia MISO 114
5 Conclusão 125
5.1 Sugestões para trabalhos futuros 127
Referências Bibliográficas 129
APÊNDICE A P&IDs da planta de FAD 134
APÊNDICE B Mapa de conexão elétrica - Fornecimento de energia . 137
APÊNDICE C Mapa de conexão elétrica - Instrumentação 139

APÊNDICE D Programa de aplicação do CLP 142
APÊNDICE E Mapa de memórias do CLP 149
APÊNDICE F Mapa de endereçamento das I/Os do CLP 152
APÊNDICE G Algoritmo do *driver* para controle de posição 153
APÊNDICE H Avaliação dos filtros digitais e *Noise Spike Filter* . . . 154

1 Introdução

Essencial à vida em todas as suas formas conhecidas na natureza, a água é uma substância em abundância no ecossistema terrestre, uma vez que cobre aproximadamente $2/3$ do nosso planeta na forma de rios, lagos, mares e oceanos. Entretanto, nos mares e oceanos, a água é inviável ao consumo humano já que possui elevada concentração de microrganismos, sólidos em suspensão e, principalmente, sais inorgânicos, caracterizando-a como água salgada.

Já nos rios e lagos, é encontrada na forma de água doce, denominação decorrente da menor concentração de sais inorgânicos, mas que ainda assim normalmente apresenta elevada concentração de microrganismos e sólidos em suspensão. Também podem ser encontradas substâncias químicas contaminantes e matéria orgânica decorrentes de poluição causada pelo despejo de efluentes não tratados nos corpos d'água.

A água encontrada na natureza deve, deste modo, ser adequadamente tratada para o consumo humano, caso contrário é via de enfermidades, quer seja por conter produtos químicos tóxicos ou microrganismos patogênicos. Também deve ser tratada para uso industrial, a fim de evitar diversas perdas em processos e equipamentos devido à formação de incrustações e corrosão, por exemplo.

Diversas técnicas têm sido utilizadas em estações de tratamento de águas (ETA) e de efluentes (ETE) com o objetivo de remover estes contaminantes a níveis aceitáveis para o consumo humano e devolução à natureza, respectivamente. Entre estas técnicas existentes, podemos citar o tratamento biológico com o uso de lodo ativado para degradação de matéria orgânica biodegradável, tratamentos químicos como processos oxidativos avançados (POA) para degradação de matéria orgânica não biodegradável e os tratamentos físicos como filtração, decantação e flotação para remoção de sólidos.

O uso de técnicas eficientes no tratamento de água é de extrema importância, já que a água a ser tratada pode apresentar diferentes variedades e concentrações de poluentes. Nos anos de 2013 e 2014 ocorreu um longo período de estiagem na região metropolitana de São Paulo, diminuindo drasticamente os níveis de água dos reservatório do sistema Cantareira, tendo sido necessário captar água de sua reserva técnica, também denominada volume morto. Por se tratar de água proveniente da parte mais profunda do reservatório, sua qualidade é inferior devido à sedimentação de impurezas ao longo de décadas. Neste caso, a eficiência das etapas de tratamento posteriores à captação da água são de extrema importância para se garantir os padrões de potabilidade necessários à distribuição na rede.

Atualmente, este cenário de estiagem que ocorreu em São Paulo se repete porém no Distrito Federal, afetando o nível da barragem do Rio Descoberto. Foram inclusive anunciados o

racionamento de água, redução da pressão nas redes de distribuição e tarifa de contingência pela concessionária de abastecimento.

A flotação, principalmente por ar dissolvido (FAD), é um dos processos tipicamente empregados no tratamento de água na etapa de clarificação. Consiste na injeção de micro-bolhas de ar no efluente, promovendo o arraste de materiais em suspensão que são menos densos que a água e têm facilidade de acumular na superfície do líquido, normalmente sólidos de baixa granulometria, óleos e gorduras. Para se ter uma máxima remoção de sólidos em suspensão é preciso que os equipamentos empregados na etapa de flotação sejam projetados adequadamente para cada aplicação, de acordo com a concentração de sólidos e vazão de água a ser tratada.

Entretanto, o processo, em geral, opera continuamente e está sujeito a grandes variações em suas condições de projeto. É o caso, por exemplo, de uma ETA que capta água de rios. Naturalmente, as condições climáticas interferem na carga de sólidos em suspensão, pois a chuva provoca o arraste de materiais sólidos próximos às encostas dos rios. Outro exemplo é a captação para uso industrial, que pode requerer diferentes demandas de água tratada ao longo do dia, em decorrência da particularidade dos processos da empresa. Deste modo, se subdimensionado, um sistema de flotação não será eficiente na remoção de sólidos em suspensão frente a essas variações, por outro lado, se super-dimensionado, será capaz de absorver as perturbações no processo, porém impactando o consumo de energia.

Em termos de qualidade, quanto mais padronizado um processo, maior a garantia de que o produto não se encontre fora da especificação. No caso de tratamento de água, este princípio também é válido. E uma forma de se obter padronização do produto é promover a automação do processo com sistemas de controle que o regulem para operar de modo desejável, independentemente das pertubações impostas ao longo do processo.

Portanto, este trabalho se propôs a iniciar uma nova linha de pesquisa no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) com a montagem e automação de uma planta de flotação por ar dissolvido, assim como também desenvolver sistemas de controle aplicados a este processo. O diferencial da estratégia de controle desenvolvida foi a tentativa de se manter condições específicas pré-definidas de clarificação da água e buscando reduzir o consumo energético da planta de flotação, atuando em diferentes elementos finais de controle concomitantemente, e empregando técnica de inteligência artificial na malha de controle.

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

A automação e controle de um processo de tratamento de águas por floculação seguida de flotação por ar dissolvido requer conhecimentos em instrumentação, automação e lógicas de controle, como também dos fundamentos e técnicas de floculação e flotação. Neste contexto, faz-se necessária uma revisão bibliográfica sobre tais assuntos de forma a elucidar os temas mais importantes para o entendimento do projeto, destacando-se os últimos avanços tecnológicos na área.

2.1 Floculação

De acordo com von Sperling (1996), os componentes que alteram a pureza da água podem ser diferenciados em função das suas características físicas, químicas e biológicas. No âmbito deste trabalho de doutorado, é importante conhecer as características físicas para a carga de sólidos, isto é, a classificação pelo tamanho da partícula. Tem-se que os sólidos dissolvidos são aqueles com diâmetro inferior a $10^{-3}\mu\mathrm{m}$, sólidos coloidais com diâmetro entre 10^{-3} e $1\mu\mathrm{m}$, e sólidos em suspensão aqueles com diâmetro superior a $1\mu\mathrm{m}$.

Os sólidos suspensos, tanto de origem natural (partículas de rocha, argila, algas) quanto de origem antropogênica (efluentes domésticos, industriais e erosão), interferem na passagem de luz através da água, reduzindo a clareza da água. Esta propriedade ótica que faz com que a luz seja dispersada e absorvida ao invés de transmitida sem mudança de direção ou nível de fluxo através da amostra é denominada Turbidez (STANDARD METHODS, 2005).

As análises de turbidez requerem uma fonte de luz que pode ser uma lâmpada incandescente ou um diodo emissor de luz, e um receptor para medir a luz dispersa. O receptor de luz espalhada é localizado a um ângulo de 90º da fonte de luz, e a turbidez tem seu valor aumentado à medida que a dispersão da luz também aumenta, sendo sua unidade expressa em NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). As medidas de turbidez são utilizadas em ETAs como forma de avaliação da água a ser tratada, e também no controle dos processos de tratamento.

Normalmente em lagos, a turbidez da água é estável ao longo do tempo, variando entre 1 a 20 NTU. Por sua vez águas captadas de rios são mais propensas a variações na turbidez por conta das condições climáticas, mudanças na vazão do rio, variando de menos de 10 a mais de 4000 NTU. Rios onde a turbidez varia centenas de NTUs em curtos períodos de tempo são denominados intermitentes e o monitoramento cuidadoso da turbidez torna-se crítico para o sucesso do tratamento de água. Alguns poluentes em efluentes e águas superficiais são difíceis de

serem removidos por processos convencionais como filtração e decantação. É o caso de sólidos suspensos, corantes de indústria têxtil, surfactantes, metais pesados entre outros resíduos. Por isto, em sistemas de tratamento de águas e efluentes se faz necessária a etapa denominada de floculação que visa a remoção de contaminantes por mecanismos de coagulação das partículas contaminantes e, em seguida, sua floculação (TCHOBANOGLOUS, 1991).

A coagulação é a desestabilização das partículas pela redução de sua carga eletrostática através da adição de um agente coagulante no efluente, como por exemplo aluminato de sódio ($NaAlO_2$), sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)$), cloreto férrico ($FeCl_3$) entre outros (HAMEED *et al.*, 2016).

Os principais coagulantes inorgânicos são sais de íons férrico e alumínio e sais pré-hidrolisados destes metais, e a sua escolha e dosagem no processo de floculação dependem das características do coagulante, da concentração e tipo de partículas a serem removidas, principalmente. Devido aos muitos mecanismos de reação concorrentes durante a coagulação, essa escolha e dosagem são realizadas de forma empírica através de testes de bancada, denominados de *Jar Test* (TCHOBANOGLOUS, 1991).

A floculação por sua vez trata-se do aumento das partículas coaguladas através de colisões, resultando em flocos macroscópicos que são facilmente separados por decantação ou flotação.

Além do uso dos agentes coagulantes, para melhorar a eficiência na floculação, são comumente utilizados polieletrólitos que são estruturas poliméricas que auxiliam na estabilização química e mecânica do floco.

Muitos polieletrólitos empregados em sistemas de tratamento de água são sintéticos, como a polietilamina, derivados de poliacrilamidas e poliestirenos e diferentes tipos de poliaminas. Porém, a sua utilização é restringida em alguns países como a Suíça e o Japão, pois ainda não existem evidências científicas sobre os seus efeitos a longo prazo na saúde humana. Assim, nos últimos anos vem aumentando o emprego de biopolieletrólitos à base de taninos no tratamento de águas devido a sua biodegradabilidade, baixo custo e também por ser de fonte renovável (GRAHAM *et al.*, 2008; SÁNCHEZ-MARTÍN; BELTRÁN-HEREDIA; SOLERA-HERNÁNDEZ, 2010; BACELO; SANTOS; BOTELHO, 2016; HAMEED *et al.*, 2016).

Taninos são polifenóis encontrados em plantas como a *Schinopsis balancae* e a *Acasia mearrnsii de wild*. Esta última, popularmente conhecida como Acácia negra, é facilmente encontrada no Brasil e possui a maior concentração de taninos entre as plantas e é empregada industrialmente para produção do biopolieletrólito Tanfloc® [1] que possui massa molecular de 1,7 kDa (HAMEED *et al.*, 2016).

[1] Tanfloc® é uma marca da empresa TANAC®, especializada na produção de taninos para aplicação em tratamento de águas.

A estrutura química deste biopolieletrólito é de difícil determinação por ser produzido com diferentes polifenóis que são metabólitos secundários na célula vegetal. Porém sua provável estrutura química foi apresentada por Graham *et al.* (2008) e segue representada na Figura 1.

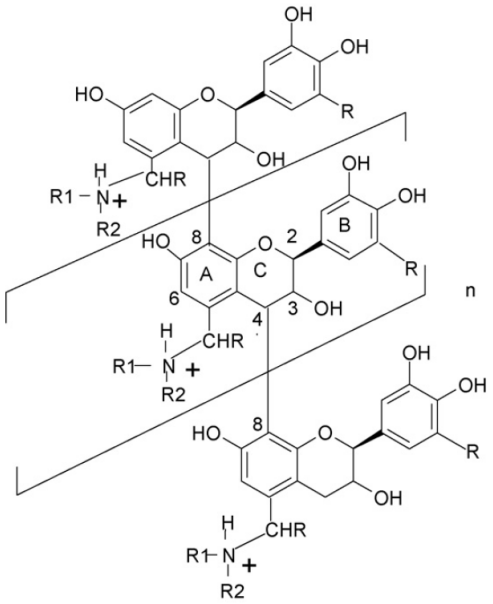


Figura 1 – Possível estrutura química do biopolieletrólito Tanfloc®.

Hameed *et al.* (2016) investigaram o uso de tanino no tratamento de efluente doméstico em comparação a outros agentes coagulantes inorgânicos e perceberam que com o gradativo aumento da dosagem de ambos coagulantes, era possível aumentar a porcentagem de remoção de turbidez do efluente. Porém, acima de 35 $\mathrm{mg/L}$ de tanino para um efluente com turbidez inicial de 47 NTU e pH de 7,87, o biopolieletrólito tornava-se em excesso e passava a conferir coloração ao efluente, deteriorando a remoção de sua turbidez, o que não é observado com os coagulantes inorgânicos. Entretanto, com o tanino foi observado maior remoção da turbidez e produção de flocos maiores, o que auxiliava na separação destas partículas. Hameed *et al.* (2016) também avaliaram a interferência do tempo de mistura e da velocidade do eixo agitador na performance de floculação e constataram melhor redução na turbidez com 10 min de agitação a 100 rpm.

Graham *et al.* (2008) por sua vez analisaram condições que influenciam a floculação de partículas de argila dispersas em água com tanino, como o pH e a degradação do biopolieletrólito devido à ação do tempo. Seus resultados mostraram que o tanino perde mais poder de coagulação em função do tempo quando empregado em efluentes ácidos. Além disto, para efluentes ácidos e neutros (pH ≤ 7), a remoção de turbidez varia de 54 % a até 67,5 % consumindo aproximadamente 0,25 $\mathrm{mg/L}$ de tanino.

Em contrapartida, para efluentes alcalinos foi possível a remoção de até 72,5 % da turbidez, embora consumindo 14 $\mathrm{mg/L}$ de tanino. Mesmo sendo necessário maior consumo de tanino em pH alcalino, observaram que houve uma geração de flocos mais intensa através da

medida do índice de floculação que chegou a ser até 10 vezes maior em relação à condição de pH ácido.

Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Solera-Hernández (2010) utilizaram uma planta piloto de tratamento de efluentes com etapas de floculação, decantação e filtração para avaliar o uso de tanino no tratamento de quatro tipos de efluentes, sendo eles de indústria têxtil, de lavanderia, efluente doméstico e de água captada de rio. Para os efluentes testados, o biopolieletrólito permitiu não apenas a remoção da turbidez, mas até 50 % na remoção de cor e de mais de 75 % de surfactantes. Além disto, confirmaram que o uso de filtro de areia por filtração após a etapa de separação dos flocos, permite a redução de quase 100 % da turbidez da água.

Desta forma, os trabalhos publicados recentemente reforçam a evidente eficácia do uso de tanino no tratamento de efluentes para a remoção de partículas e redução da turbidez. Entretanto, os flocos formados durante a floculação podem ser separados por decantação que requer tempo para ocorrer, ou por flotação que promove a rápida separação dos flocos pela ação de micro-bolhas.

2.2 Flotação

As primeiras aplicações do processo de flotação para tratamento de águas para consumo humano são datadas da década de 1960 na Finlândia e Suécia, porém desde a década de 1920 já se conheciam as propriedades de separação de partículas sólidas em líquidos pela ação de micro-bolhas (EDZWALD, 2010; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Desde então, vários lugares do mundo adotaram o processo de flotação em estações de grande capacidade para o tratamento de águas.

O princípio de flotação pode ser descrito, basicamente, como sendo a adesão de micro-bolhas de ar em partículas sólidas suspensas na água diminuindo sua densidade aparente, fazendo-a acumular na superfície do líquido. É preciso que ocorra a colisão das micro-bolhas com as partículas sólidas de modo a gerar os agregados micro-bolhas/partícula, sendo que inúmeros fatores interferem na formação destes agregados como a carga elétrica líquida das partículas, forças de atração e repulsão entre partículas, seus tamanhos, concentração e diâmetro das micro-bolhas, tendo diversos modelos matemáticos sido propostos para descrever sua formação, trajetória e eficiência na colisão com partículas suspensas (EDZWALD, 1995; LEPPINEN, 1999; LEPPINEN, 2000; HAN, 2002; HAARHOFF; EDZWALD, 2004; EDZWALD, 2010).

A Figura 2 demonstra duas situações durante a formação do agregado micro-bolhas/partícula na flotação, tendo em vista que nem todas as micro-bolhas colidem com a partícula ou se mantêm aderidas à sua superfície após a colisão. Na primeira situação, é possível observar que sem a formação do agregado micro-bolhas/partícula, a densidade da partícula é maior que a da água e naturalmente ocorre sua decantação, pois o peso da partícula é maior

que o empuxo. Já quando ocorre a adesão das micro-bolhas, a densidade aparente da partícula é reduzida e o material flota.

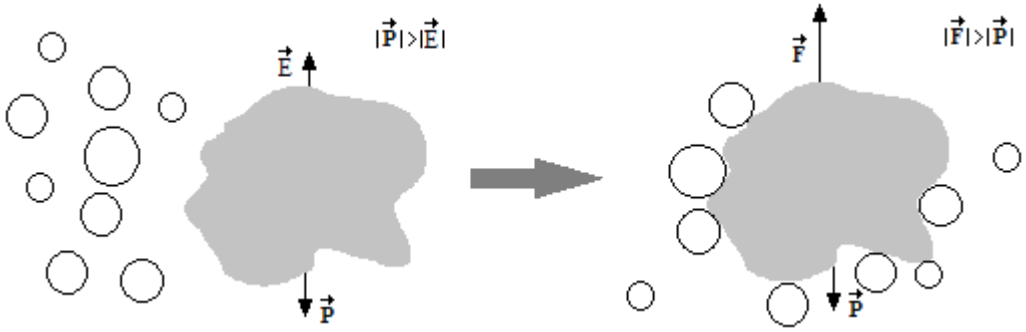


Figura 2 – Formação de aglomerado micro-bolhas/partícula na flotação.

A flotação é uma técnica de separação utilizada atualmente em diversas áreas como separação de proteínas, microrganismos, plásticos, mas, principalmente, no tratamento de minérios e de águas para consumo humano (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Estes últimos respondem pela maior parcela de aplicação do processo de flotação na atualidade, porém apresentam características distintas:

- Tratamento de água requer micro-bolhas para separação dos sólidos enquanto no tratamento de minérios são empregadas macro-bolhas;
- Partículas de minérios são relativamente maiores que partículas presentes em efluentes ou água de abastecimento;
- Flotação por coluna é amplamente utilizada em tratamento de minérios enquanto em tratamento de água são mais empregados tanques de flotação.

Normalmente a flotação é antecedida por um processo de floculação que visa aglomerar o material suspenso na água em partículas maiores, facilitando a sua separação na flotação. Atualmente, o tempo de floculação empregado em sistemas de flotação são consideravelmente menores se comparados aos tempos de floculação para processos de sedimentação (CROSSLEY; VALADE, 2006), que requer flocos maiores e mais densos para sedimentar.

Anteriormente ao uso da flotação, a sedimentação era utilizada para remoção de partículas sólidas dispersas na água antes da etapa de filtração, o que além de requerer flocos maiores e mais densos, exige um tempo maior de processamento e grandes áreas para instalação do decantador. Além da redução do tempo de operação, o uso da flotação permitiu reduzir a área necessária para instalação da estação de tratamento e aumentar a taxa de água processada, reduzindo os custos de tratamento de águas (HAARHOFF, 2008).

Existem diferentes categorias de flotação empregadas em processos de separação como a eletro-flotação, flotação por ar disperso e por ar dissolvido, segundo Rubio, Souza e

Smith (2002). Na eletro-flotação, são produzidas micro-bolhas através de eletrólise com eletrodos inseridos em soluções aquosas diluídas, tendo por principal desvantagem o elevado custo de manutenção e operação.

A flotação por ar disperso consiste em injetar ar no líquido sob agitação mecânica formando macro-bolhas, tendo maior aplicação em separações de óleos e água. Já na flotação por ar dissolvido (FAD), o ar é dissolvido sob pressão em água até a sua saturação, em seguida é injetado em um tanque após uma forte queda de pressão que resulta na nucleação das micro-bolhas de ar que apresentam diâmetros na faixa de 30 a 100 μm (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Esta última, tem grande destaque no tratamento de águas, pois é capaz de remover material particulado em suspensão como microrganismos e matéria orgânica, reduzindo principalmente a turbidez da água (TCHOBANOGLOUS, 1991).

2.2.1 Flotação por ar dissolvido (FAD)

Conforme descrito acima na seção 2.2, dentre as diversas formas de flotação, a FAD se destaca no tratamento de águas por ser capaz de remover a turbidez causada por sólidos particulados em suspensão de forma rápida e simples. Haarhoff (2008) apresentou, como prova da ampla difusão desta tecnologia, uma lista com várias estações de tratamento de água para consumo humano por FAD espalhadas pelo mundo com capacidade de até $690 \cdot 10^6\ L/d$, caso da ETA localizada na cidade de São Bernardo do Campo, no Brasil.

A separação dos particulados é rápida pois, diferentemente das demais técnicas, FAD possui baixo tempo de retenção da água no flotador pela ação das micro-bolhas que reduzem a densidade aparente das partículas como também descrito na seção 2.2. Para que as micro-bolhas sejam liberadas, é requerida uma brusca queda de pressão a jusante do sistema de pressurização do ar. Normalmente essa queda de pressão é provocada por uma válvula agulha; existem inúmeras válvulas comerciais disponíveis, como NIWR®, WRc®, DWL® e Rictor®, que proporcionam rápida queda de pressão para nucleação das bolhas com posterior aumento de seus tamanhos por coalescência (RYKAART; HAARHOFF, 1995).

A etapa de nucleação das micro-bolhas é essencial na FAD, pois o seu tamanho médio influencia na separação das partículas, e de acordo com o tipo de elemento utilizado para gerar a queda de pressão, a separação por FAD pode ser prejudicada pela baixa eficiência na nucleação das micro-bolhas.

A dinâmica de saturação do ar na água nos vasos saturadores foi estudada por Bratby e Marais (1975), que constataram a baixa eficiência na dissolução de ar sob baixa pressão e em saturadores com dispersão de ar na água ao invés de saturadores empacotados com anéis de Raschig. A dissolução do ar em água é afetada tanto pela temperatura como pela pressão utilizada na dissolução no vaso saturador de acordo com princípios físico-químicos estabelecidos na Lei de Henry, demonstrada na Equação 2.1 e apresentado por Crittenden *et al.* (2012), em

que Y_a é a concentração do componente no meio gasoso, Ca_{max} a concentração do componente no meio líquido em $\mathrm{mg/L}$ e H_a a constante da Lei de Henry para o componente a uma dada temperatura e pressão.

$$Y_a = H_a \cdot Ca_{max} \tag{2.1}$$

A constante de Henry H_a varia em função da temperatura de dissolução do gás na fase líquida, conforme apresentado na Equação 2.2, e no seu cálculo é levado em consideração a entalpia de dissolução do gás ΔH_{diss}, como também a constante universal dos gases R e a constante de dissolução K_d.

$$H_a = K_d \cdot \exp(-\frac{\Delta H_{diss}}{R \cdot T}) \tag{2.2}$$

Desta forma, a qualidade de geração de micro-bolhas em um processo de FAD varia de acordo com a temperatura em que o sistema se encontra. Como a constante de Henry é inversamente proporcional à temperatura, a baixas temperaturas a solubilidade do ar na água será maior, e a altas temperaturas a solubilidade é menor.

Segundo Crittenden *et al.* (2012), com base nesta propriedade físico-química dos gases, plantas de FAD que operam em regiões de clima tropical devem trabalhar com maior vazão de água com ar dissolvido para compensar sua baixa solubilidade em altas temperaturas.

Recentemente, Dassey e Theegala (2012) estudaram a interferência de alguns parâmetros na saturação de ar em água utilizando um vaso saturador não empacotado. Entre suas conclusões, destacam-se que a produção de micro-bolhas é maior à medida que a temperatura do sistema é menor e além disso, que está linearmente relacionada com o tempo de retenção hidráulico da água no vaso saturador, de modo que quanto maior o tempo de retenção, maior a produção de micro-bolhas.

Por sua vez, Bahadori *et al.* (2013) conseguiram determinar um modelo matemático de predição da concentração de ar dissolvido na água (Ca_p) em $\mathrm{mg/L}$ de acordo com a temperatura e a pressão empregadas em um vaso saturador não empacotado.

As Equações 2.3 a 2.7 representam a predição de concentração de ar dissolvido em vaso saturador utilizando dados de temperatura da água em K e pressão interna do vaso em kPa.

$$\ln Ca_p = a + \frac{b}{P} + \frac{c}{P^2} + \frac{d}{P^3} \tag{2.3}$$

$$a = A_1 + B_1 \cdot T + C_1 \cdot T^2 + D_1 \cdot T^3 \tag{2.4}$$

$$b = A_2 + B_2 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + D_2 \cdot T^3 \tag{2.5}$$

$$c = A_3 + B_3 \cdot T + C_3 \cdot T^2 + D_3 \cdot T^3 \tag{2.6}$$

$$d = A_4 + B_4 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + D_4 \cdot T^3 \tag{2.7}$$

Segundo Bahadori *et al.* (2013), estas equações foram modeladas para temperatura até 40 °C e pressão absoluta até 7 bar, cujos coeficientes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes para predição de concentração mássica de ar dissolvido em água usando vaso saturador não empacotado (BAHADORI *et al.*, 2013).

Coeficiente	*Valor*	*Coeficiente*	*Valor*
A1	$5,11238 \times 10^{1}$	C1	$1,06007 \times 10^{-3}$
A2	$-3,28301 \times 10^{5}$	C2	$-1,15021 \times 10^{1}$
A3	$1,02135 \times 10^{8}$	C3	$3,59468 \times 10^{3}$
A4	$-7,03656 \times 10^{9}$	C4	$-2,47340 \times 10^{5}$
B1	$-3,76796 \times 10^{-1}$	D1	$-1,01157 \times 10^{-6}$
B2	$3,36056 \times 10^{3}$	D2	$1,31122 \times 10^{-2}$
B3	$-1,04874 \times 10^{6}$	D3	$-4,10428 \times 10^{0}$
B4	$7,21820 \times 10^{7}$	D4	$2,82407 \times 10^{2}$

Outro ponto de estudo importante referente aos processos de flotação por ar dissolvido é a dinâmica de escoamento das fases presentes no flotador. Trabalhos como o de Lakghomi, Lawryshyn e Hofmann (2015) e Chen, Wang e Yang (2016) empregaram técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), na tentativa de entender as relações entre as micro-bolhas e as partículas sólidas na flotação. Lakghomi, Lawryshyn e Hofmann (2015) verificaram que o diâmetro médio das micro-bolhas e sua densidade no flotador afetam o tipo de escoamento, sendo que a presença de escoamento estratificado melhora a remoção das partículas.

Por sua vez, Chen, Wang e Yang (2016) determinaram a relação da concentração de micro-bolhas na zona de separação do flotador em função da sua profundidade e do diâmetro das micro-bolhas, verificando que quanto menor o diâmetro médio das micro-bolhas, maior a concentração de bolhas no flotador mesmo em flotadores com zona de separação rasa, característica favorável à remoção das partículas em FAD.

Essas informações são essenciais ao projetista de uma estação de flotação, pois auxiliam no dimensionamento do vaso de saturação e do tanque de flotação. A Figura 3 ilustra um típico processo FAD com uma corrente de reciclo, que retira parte da água clarificada para saturar com ar no vaso de saturação e, posteriormente, reinjetá-la no flotador.

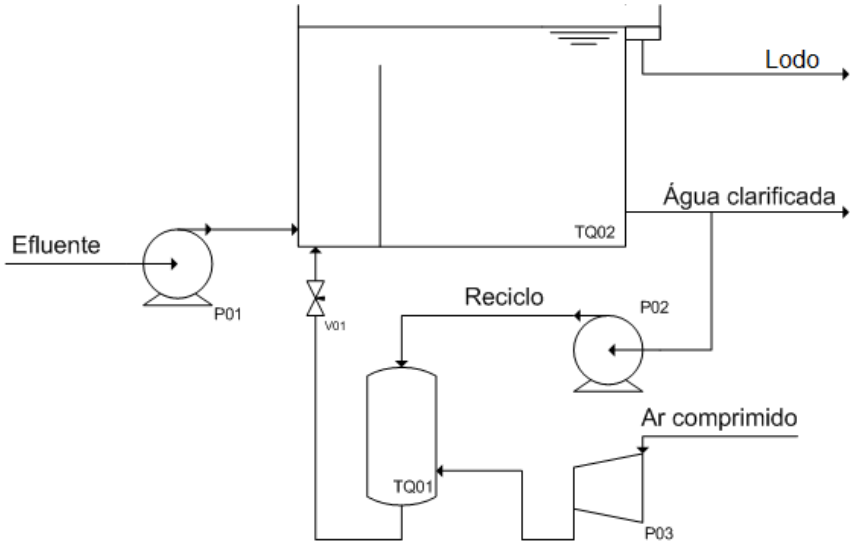


Figura 3 – Típico sistema FAD com corrente de recirculação pressurizada.

No sistema de flotação por ar dissolvido apresentado na Figura 3, o efluente floculado é injetado no flotador juntamente com uma corrente de reciclo com micro-bolhas de ar oriunda do vaso saturador. A mistura destas correntes provoca então a formação dos agregados micro-bolhas/partículas que são separados no flotador na forma de lodo, enquanto a água clarificada é removida pela base do flotador e uma parcela usada para compor a corrente de reciclo que é usada para dissolver o ar no vaso saturador. Este modo de operação de sistemas FAD é denominado *Recirculação Pressurizada*, sendo a mais utilizada em ETAs.

A FAD com recirculação pressurizada, mostrada na Figura 3, emprega uma parcela da água clarificada que é retirada do flotador para saturação do ar, viabilizando o uso de saturador empacotado. A quantidade de água desviada para o saturador está relacionada à fração de reciclo F_r que é calculada como o fluxo de água do vaso saturador dividido pelo fluxo de efluente no flotador em percentual, como representado na Equação 2.8, tratando-se de um parâmetro muito importante na flotação por afetar diretamente a produtividade do processo.

$$F_r = \frac{Q_r}{Q_t} \cdot 100\% \tag{2.8}$$

Entretanto, segundo Reali (1991), além da *Recirculação Pressurizada*, existem outros dois sistemas diferentes de FAD em função do modo de alimentação do vaso saturador, a *Pressurização Total* e a *Pressurização Parcial*.

Na FAD com pressurização total, todo o efluente a ser tratado é enviado inicialmente ao saturador para dissolver o ar e, em seguida, enviado para o flotador; enquanto na FAD com pressurização parcial, apenas uma fração da água a ser tratada é enviada para o saturador, com o restante seguindo diretamente para o flotador. Em ambos os casos, é desaconselhável a implementação em processos com vasos de saturação com recheio por motivos de entupimento

com os sólidos suspensos e quando há um processo de floculação a montante que produz flocos que seriam facilmente fragmentados.

Outros parâmetros úteis na operação do processo de flotação são a concentração de ar liberado na água (C_{ar}), a pressão interna do saturador (P) e a velocidade de flotação (v_f), que representa a vazão volumétrica de efluente total dividida pela área superficial do flotador (A_f), como demonstrado na Equação 2.9. Segundo Edzwald (2010), C_{ar}, P, F_r e v_f possuem valores típicos nas faixas de $6 - 10\ \mathrm{g/m^3}$, $4 - 6\ \mathrm{bar}$, $6 - 12\ \%$ e $5 - 15\ \mathrm{m/h}$, respectivamente.

$$v_f = \frac{Q_t}{A_f} \tag{2.9}$$

Normalmente os flotadores operam sem malhas de controle que regulem essas variáveis nas suas condições de projeto. É prática comum que sistemas de flotação operem apenas com o monitoramento da turbidez da água clarificada e regulação ON-OFF do nível de água e da pressão interna do vaso saturador. Ou seja, estratégias avançadas de controle não são práticas usuais em flotação, pois, embora resultem diretamente em menores custos de operação, contribuem com maior custo de projeto.

A energia consumida para a produção de micro-bolhas, *i. e.* bombeamento do efluente, da linha reciclo e pressurização do ar no saturador, são custos operacionais significativos na flotação, segundo Edzwald (2010), que sugere que melhorias devam ser realizadas para reduzir a demanda energética. Crossley e Valade (2006) ressaltam que ultimamente diversas melhorias como otimização da floculação, redução do tempo de retenção hidráulica e aumento da velocidade de flotação têm contribuído para reduzir custos de projetos e equipamentos, entretanto pouco avanço tem sido obtido na redução de custos operacionais, exceto pela utilização de inversores de frequência nas bombas das linhas de reciclo.

Controle e automação compõem uma alternativa viável não apenas para a redução de custos operacionais como também de maior padronização da água clarificada por haver regulação das variáveis de processo. Neste ponto, o vaso de saturação apresenta grande potencial para implementação de malhas de controle, pois concentra variáveis de processo que estão vinculadas à performance da flotação, *e. g.* a pressão do vaso saturador e a vazão de reciclo.

2.3 Controle e automação em sistemas de flotação

Encontram-se na literatura vários trabalhos publicados em controle e automação de processos aplicados a sistemas de flotação (CARVALHO *et al.*, 1994; VIEIRA; SOUSA; DURÃO, 2005; YINFEI *et al.*, 2011; XIAOPING; ALDRICH, 2013), mas restritos à coluna de flotação, que é muito utilizada na indústria de minérios, porém pouco aplicada no tratamento de águas.

Por se tratarem de modalidades diferentes de flotação, o método de controle empregado pode ser parecido, mas não necessariamente igual. Mesmo porque a dinâmica de operação é diferente em ambos os processos, que são multivariáveis e não-lineares. No caso da coluna de flotação são variáveis de processo a vazão de ar, o pH da corrente de alimentação, o nível da polpa na superfície, a taxa de água de lavagem, a recuperação e a taxa de concentração do minério (BERGH; YIANATOS, 2003).

É comum que colunas de flotação operem com dois níveis de controle: um primário, em que as variáveis diretamente mensuráveis são controladas em seus respectivos *setpoints*; e um nível secundário que manipula os valores de *setpoint* destas variáveis primárias com o objetivo de regular a recuperação e a concentração do minério. Isto significa que o processo é multivariável, o que reduz a capacidade de aplicações bem sucedidas de controladores tradicionais como PID.

Shean e Cilliers (2011) fizeram uma ampla revisão sobre as novas tecnologias de controle e automação em colunas de flotação, verificando que embora muitos trabalhos nesta área tenham sido publicados, a transferência da tecnologia para aplicações industriais têm se apresentado um desafio. Isto porque geralmente é difícil o projeto do sistema de controle para plantas de flotação, exigindo modificações posteriores ou mesmo necessitando da adição de sistemas de controle *ad-hoc*; também pela falta de conhecimento e treinamento dos operadores para operar o flotador e não menos importante, a complexidade dos sistemas de flotação que são processos não-lineares e que tornam o projeto de sistemas de controle uma tarefa árdua.

Uma estratégia que tem se mostrado interessante em sistemas multivariáveis é o controle preditivo (SKRJANC *et al.*, 2004; HARNISCHMACHER; MARQUARDT, 2007), porém para sua eficaz aplicação é preciso que se tenham modelos dinâmicos confiáveis do processo, melhor desempenho dos controles regulatórios das variáveis primárias e novos métodos que gerem maior robustez no controle; aspectos estes difíceis de serem obtidos no processo de flotação, de acordo com Shean e Cilliers (2011).

Em virtude disto, o uso de inteligência artificial em sistemas de controle de colunas de flotação tem se provado uma ferramenta poderosa para alcançar os objetivos de controle e tem sido amplamente aplicado a plantas de coluna de flotação (CARVALHO; DURÃO, 2002; BERGH; YIANATOS, 2003; VIEIRA; SOUSA; DURÃO, 2005; YINFEI *et al.*, 2011).

De modo geral, três linhas de pesquisa se destacam no controle de processos de flotação por coluna: sistemas preditivos, análise da dinâmica da flotação e desenvolvimento de *soft-sensor* para inferência de variáveis (BOUCHARD *et al.*, 2009).

O desenvolvimento de *soft-sensor* tem forte potencial para uso de sistemas especialistas como lógica *Fuzzy* e redes neurais, e em sistemas de flotação pode ser aplicado para inferência do tamanho das bolhas de ar com base em outros parâmetros de processo. Tanto na indústria de minérios como em tratamento de águas, esta informação complementa substancialmente a

supervisão da flotação, auxiliando na atuação das variáveis manipuladas para fins de controle regulatório.

2.3.1 Controle em FAD

Foi realizada uma exaustiva pesquisa na literatura sobre técnicas de controle aplicada a FAD em tratamento de águas e notou-se uma carência muito grande de trabalhos de controle voltados ao processo de FAD. É prática comum que sistemas de flotação em ETAs operem em malha aberta com sistemas de monitoramento de apenas algumas variáveis.

Em um típico sistema FAD, a turbidez da água clarificada é analisada periodicamente de forma *off-line* e as variáveis de operação do flotador e vaso saturador são mantidas nas condições de projeto através de sistemas simples de controle ON/OFF, sem uma lógica de controle que relacione os parâmetros de processo.

Essa carência de tecnologia mostra a necessidade de desenvolvimento de trabalhos científicos que validem estratégias de controle para FAD, apresentando as vantagens em implementar controle automático neste processo de tratamento de água.

Com o aumento da escassez de água potável para consumo humano em diversas regiões do mundo, a aplicação de estratégias de controle em FAD para o ajuste das condições de processo permitirá um avanço em termos de padronização da qualidade da água, redução do número de retro-lavagens do filtro de areia subsequente à etapa de flotação, reduzindo o consumo de água nesta tarefa, como também proteção dos atuadores e sensores e possível economia de energia nesta etapa do tratamento.

Desta forma, são desejáveis o uso de técnicas matemáticas avançadas como lógica *Fuzzy* e estratégias de proteção e segurança de equipamentos como controle em *override*, para o controle e supervisão de sistemas de flotação por ar dissolvido.

2.3.2 Técnicas de Controle Avançado

Existem na literatura diversas técnicas de controle avançado baseadas em lógica *Fuzzy*, redes neurais, algoritmos genéticos, *model predictive control* (MPC) entre outras, que foram implementadas em processos industriais com alto grau de complexidade, obtendo bons resultados (FILETI; PEDROSA; PEREIRA, 1999; COSTA *et al.*, 2012; BELLO; HAMAN; DJOUANI, 2014).

Dentre essas técnicas, a lógica *Fuzzy* tem se mostrado vantajosa no controle de processos não-lineares e de elevado grau de complexidade. A lógica *Fuzzy* se baseia em operações matemáticas entre conjuntos como forma de tentar simular o modo de pensar humano.

2.3.2.1 Controle baseado em lógica *Fuzzy*

A lógica *Fuzzy* foi proposta por Zadeh (1965), e desde então têm sido muito estudada no controle de processos químicos. Seu princípio se baseia em tentar imitar o modo humano de pensar, que naturalmente atribui incertezas e imprecisões em suas inferências.

Por exemplo, o ser humano é capaz de atribuir uma escala de temperatura própria de modo a conseguir definir se a temperatura de um ambiente está frio, muito frio, quente, muito quente ou agradável. A estas definições de temperatura, em lógica *Fuzzy* denominamos de *Antecedentes*, os quais nomeiam as *Funções de Pertinência* (MF), conforme mostra a Figura 4.

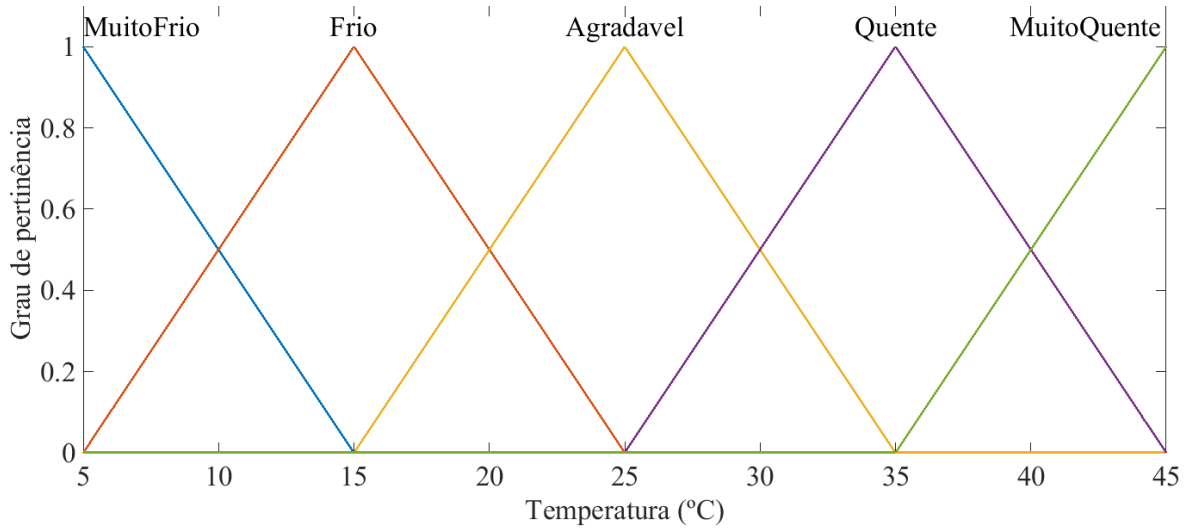


Figura 4 – Funções de pertinência para a variável temperatura.

Segundo Simões e Shaw (2007), a MF trata-se de uma função numérica que confere grau de pertinência para valores discretos da variável na faixa em que se encontra, sendo esta faixa de valores que abrange a MF um conjunto denominado de *suporte*, e a união dos suportes de todas as MFs de uma variável denominada de *Universo de Discurso*. No exemplo da Figura 4, o universo de discurso da variável temperatura é [5, 45] e o suporte da MF *Agradável* definido como o conjunto [15, 35].

Considerando que a temperatura do ambiente esteja a 25 °C, pela Figura 4, a possibilidade para a função de pertinência *Agradável* é igual a 1, ou seja, seu grau de pertinência é máximo, enquanto que para as demais funções de pertinência sua possibilidade é nula. Por outro lado, se a temperatura fosse igual a 20 °C, teríamos grau de pertinência equivalente a 0,5 para as MFs *Frio* e *Agradável*, e nula para as demais.

Para uma dada temperatura de entrada, é possível obter um vetor com os valores de grau de pertinência de cada MF, denominado *vetor de possibilidades* que, no caso de 20 °C, é igual a $\{0; 0{,}5; 0{,}5; 0; 0\}$. Ou seja, em 20 °C somos capazes de dizer que a temperatura está um pouco agradável mas também um pouco frio, e é dessa forma que é possível tentar simular o modo humano de inferir uma variável usando os valores de grau de pertinência.

A este procedimento de inferir o grau de pertinência dado um valor da variável denominamos de *Fuzzificação*, sendo um dos fatores que conferem a característica de não-linearidade aos controladores *Fuzzy*. Uma das causas da não-linearidade dos controladores *Fuzzy* se dá pelo fato do formato geométrico das MFs poder variar de trapezoidal, triangular, sigmoidal a diversas outras formas, além de os suportes também poderem variar no tamanho do conjunto e sua distribuição no universo de discurso não ser obrigatoriamente uniforme.

No exemplo apresentado, a partir da sensação de temperatura do ambiente, o ser humano é capaz de tomar uma ação e regular, por exemplo, a intensidade do ar condicionado com base em seu conhecimento prévio e sua experiência.

Na lógica *Fuzzy*, o conhecimento especialista é representado na forma de um conjunto de regras de causa e efeito entre as variáveis de entrada e saída do controlador *Fuzzy* com o formato SE-ENTÃO (NASCIMENTO JR.; YONEYAMA, 2004; SIMÕES; SHAW, 2007).

Estas regras são derivadas do conhecimento do projetista do controlador a respeito do processo que se deseja controlar. Por exemplo, SE a temperatura é *quente* ENTÃO o ar condicionado deve estar regulado para *forte*, em que *forte* é o *Consequente* de uma das MFs da variável de saída.

A base de regras é outro fator que compõe a característica de não-linearidade dos controladores *Fuzzy*, uma vez que permite relacionar por diferentes combinações as entradas e saídas com base no conhecimento especialista. É na base de regras que se encontra a lei de controle estabelecida para o controlador e que é traduzida na forma de uma saída discreta por meio da *Inferência Fuzzy*.

O procedimento de inferência *Fuzzy* consiste em utilizar o vetor de possibilidade e a base de regras estabelecida para determinar o conjunto de valores de pertinência para as MFs da variável de saída, e por um método de *Deffuzificação* determinar o valor de saída do controlador *Fuzzy*.

Para o exemplo verificado acima, supondo a base de regras apresentada na Tabela 2, o conjunto de valores de pertinência para a variável de saída é obtido pela projeção horizontal dos graus de pertinência não nulos das MFs de entrada nas MFs da variável de saída, conforme mostra a Figura 5.

Tabela 2 – Exemplo de base de regras de controlador *Fuzzy*.

Regra Nº	SE temperatura é:	ENTÃO ar condicionado é:
1	**Muito Frio**	**Fraco**
2	**Frio**	**Fraco**
3	**Agradável**	**Normal**
4	**Quente**	**Forte**
5	**Muito Quente**	**Forte**

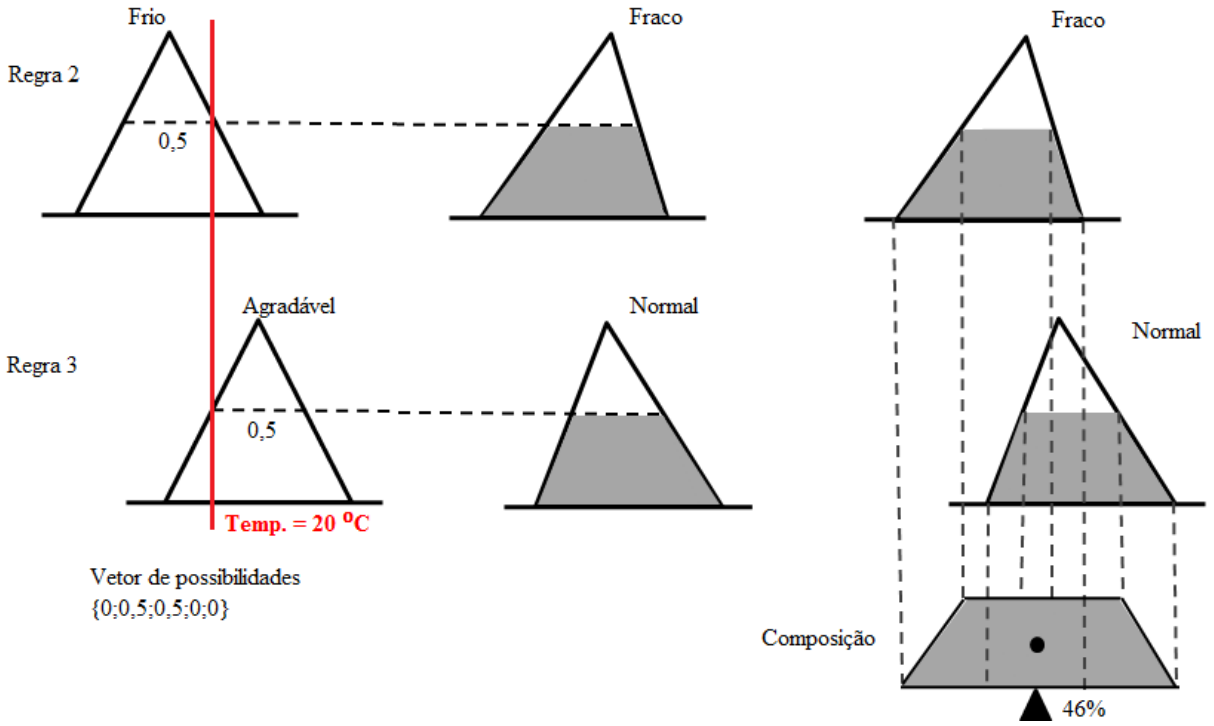


Figura 5 – Mecanismo de inferência *Fuzzy*.

Esta projeção resulta em um conjunto de graus de pertinência das MFs de saída. A união das áreas produzidas nas MFs de saída pelos respectivos graus de pertinência é definida como a etapa de *Composição*, e resulta em uma área da qual é possível calcular um valor discreto de saída do controlador *Fuzzy* na defuzzificação.

Existem diferentes métodos de defuzzificação na literatura, sendo o mais empregado o Centro-da-Área (CoA), ou também chamado de centróide (NASCIMENTO JR.; YONEYAMA, 2004; SIMÕES; SHAW, 2007), representado pela Equação 2.10, em que u_i é o centróide da área individual das MFs e $\mu_{OUT}(u_i)$ a área da respectiva MF.

$$u = \frac{\sum_{j=1}^{N} u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{j=1}^{N} \mu_{OUT}(u_i)} \tag{2.10}$$

Para o exemplo em questão, supondo o centróide e a área gerados para a MF *Fraco* sejam numericamente iguais a 43,5 e 4, e o centróide e a área para *Normal* iguais a 48,58 e 3,875, respectivamente, a saída é calcula como sendo 46, conforme mostra a Equação 2.11.

$$u = \frac{0 \times 0 + 43,5 \times 4 + 48,58 \times 3,875 + 0 \times 0 + 0 \times 0}{4 + 3,875} = 46 \tag{2.11}$$

Desta forma, a lógica *Fuzzy* tem sido uma técnica de inteligência artificial muito utilizada no controle de processos.

Como visto no exemplo apresentado, a forma humana imprecisa e incerta de pensar é facilmente incorporada à dinâmica do controlador através dos mecanismos de fuzzificação, inferência *Fuzzy* e defuzzificação. O que resulta em benefícios para o controle de processos mais complexos, nos quais um clássico controlador proporcional-integral-derivativo não seria capaz de apresentar um desempenho desejável.

Sendo a FAD um processo naturalmente multivariável, no qual existem diversas variáveis que necessitam ser reguladas além da turbidez da água pós-flotação, a lógica *Fuzzy* se mostra uma técnica promissora para controle e automação desse processo.

A possibilidade de empregar diferentes variáveis de estado do processo de FAD como entradas para os controladores *Fuzzy*, associada à incorporação de conhecimento especialista sobre o processo no projeto destes controladores, justifica as vantagens de se utilizar lógica *Fuzzy* no controle de FAD.

2.3.2.2 Controle em *override*

Controle em *override* ou também denominado *com restrições*, é uma técnica avançada de controle muito utilizada principalmente para a proteção de equipamentos, pessoas e assegurar que as variáveis de processo se mantenham entre limites operacionais de segurança (SMITH; CORRIPIO, 2008). Trata-se de uma ferramenta poderosa que permite a transição suave entre diferentes malhas usando chaves seletoras para manter as condições de segurança.

Diferentemente do controle em *override*, a técnica de intertravamento também visa assegurar a proteção dos equipamentos, pessoas e processo principalmente durante o *start-up* e *shutdown* de plantas industriais, entretanto tem uma atuação mais drástica que a malha em *override* (SEBORG, 2004).

O intertravamento quando acionado normalmente realiza o fechamento completo de válvulas ou desligamento de bombas, enquanto que o controle em *override* permite a correção da variável de processo atuando em uma variável manipulada alternativa em relação à malha principal.

A Figura 6 apresenta um típico diagrama de blocos de uma sistema com *override* em que há a proteção de um equipamento da malha de controle, no caso o atuador representado pela função de transferência G_v.

O *loop* secundário atua para a proteção do atuador, sobrepondo o *loop* principal que atua na manutenção da variável de processo Y_1, sempre que há uma condição insegura de operação do atuador. Mas além da proteção do atuador, controle em *override* pode ser empregado para proteção de outros equipamentos de processo e mesmo outras variáveis críticas que não sejam a variável de processo do *loop* principal, o que resulta em diagramas de blocos específicos para cada aplicação.

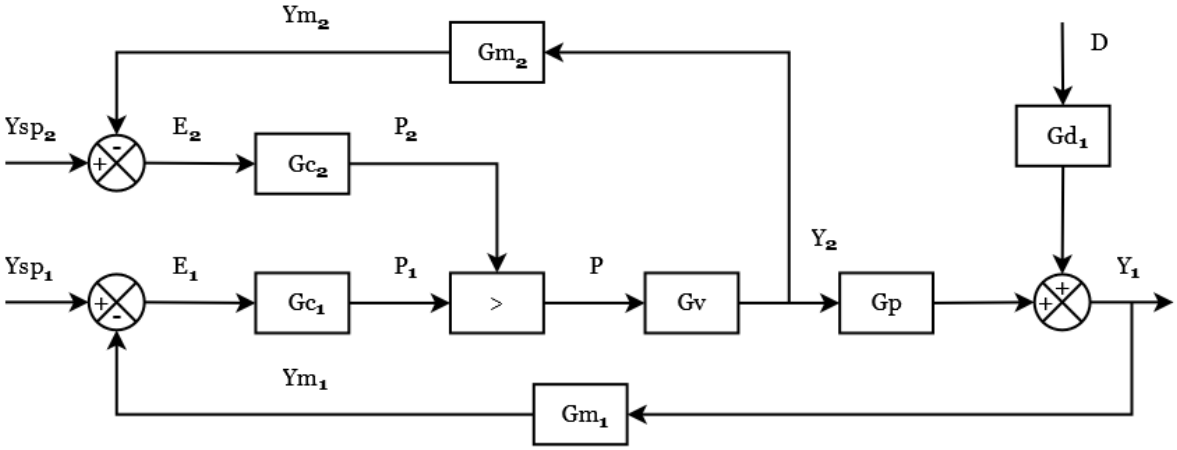
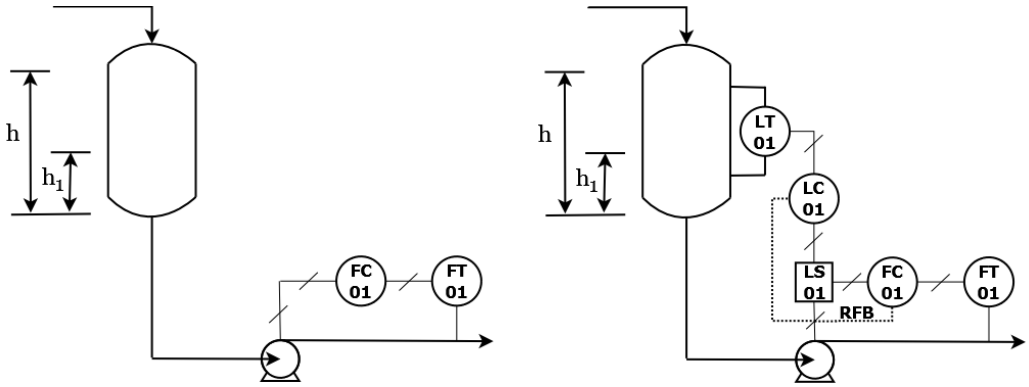


Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema com malha em *override* para proteção do atuador. Adaptado de Seborg (2004).

Para melhor entender o funcionamento de malhas em *override*, analisemos o exemplo clássico apresentado por Smith e Corripio (2008), referente a um sistema de bombeamento de água a partir de um tanque em que há o controle da vazão de bombeamento atuando na velocidade da bomba que realiza este serviço, conforme ilustra a Figura 7 (a).

Neste caso, o controlador FC01 atua na velocidade da bomba, de modo a manter a vazão de líquido constante independentemente do nível de líquido (h) no tanque.



(a) Controle sem *override*. (b) Controle com *override*.

Figura 7 – Exemplo de um sistema de controle de vazão sem e com malha em *override* para o nível do tanque. Adaptado de Smith e Corripio (2008).

Entretanto, supondo que exista um nível h_1 em que se inicia o processo de cavitação na bomba, pois não há altura líquida positiva de sucção (NPSH) suficiente, é preciso que exista um sistema que assegure que o processo não opere com nível de líquido igual ou menor que h_1 para não danificar a bomba.

Dessa forma, um sistema de intertravamento desligaria a bomba de modo a forçar o nível a subir e voltar a uma condição segura de operação. Porém, é uma ação drástica e não desejável em processo contínuos, sendo por isso mais empregada em procedimentos de *start-up* e *shutdown*.

No caso de uma malha em *override*, conforme mostra a Figura 7 (b), existe uma chave seletora LS01 que promove a mudança suave da malha de controle da vazão para a malha de controle do nível com o controlador LC01. Este é geralmente um controlador proporcional-integral (PI) (SEBORG, 2004), todavia pode ser empregado um controlador puramente proporcional já que não é necessário eliminação de *offset* no *loop* secundário, mas apenas o retorno da variável de processo principal para sua faixa de segurança operacional, para este exemplo significa garantir que $h \geq h_1$.

A transição suave da malha principal para a malha em *override* é proporcionada por um sinal de *realimentação de restauro* (RFB) que permite ambos controladores terem sinal de controle com valores similares e não provocarem um *step* abrupto no atuador durante o chaveamento entre as malhas (SMITH; CORRIPIO, 2008).

A Figura 8 apresenta um diagrama de blocos genérico em que o controle *override* visa a manutenção de uma variável crítica (Y_2) do processo dentre um faixa de segurança, assim como o exemplo de bombeamento em questão.

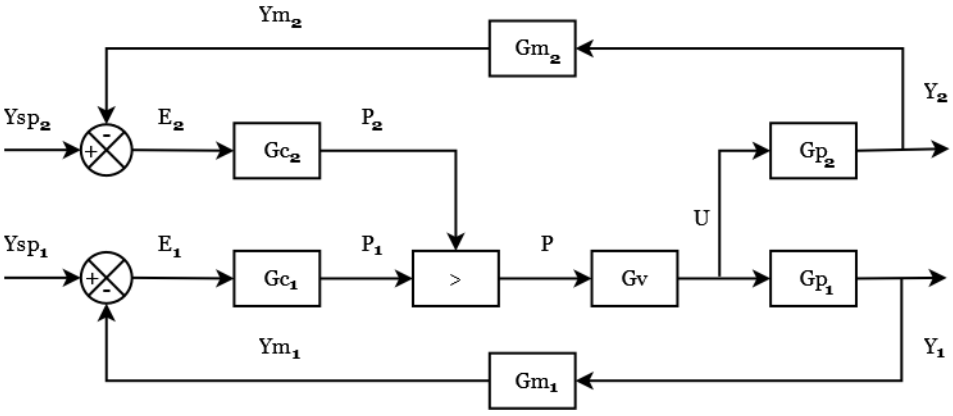


Figura 8 – Diagrama de blocos de sistema com malha em *override* para proteção da variável Y_2.

Desta forma, trata-se de uma estratégia de controle muito útil em processos que operam com equipamentos capazes de sofrerem danos de acordo com sua condição de operação, ou mesmo em processos que se faz necessário a manutenção de outras variáveis dentro de limites de segurança. O processo de flotação por ar dissolvido, tema desta tese, apresenta elementos que favorecem a utilização de malhas em *override*, como a operação do vaso saturador que requer controle de pressão, variável crucial para a segurança dos equipamentos e pessoas na operação do protótipo de FAD; bem como a aplicação de lógica *Fuzzy* para controle multivariável do processo.

2.4 Hipótese

Em relação a um sistema de flotação por ar dissolvido operado em malha aberta, a implementação de um sistema de controle é capaz de regular este processo atuando nas variáveis manipuladas, permitindo a regulação da turbidez da água pós-flotação com um menor consumo de energia.

2.5 Objetivos

- Montar um protótipo de flotação por ar dissolvido, automatizado e monitorado via *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA);
- Implementar sistemas avançados de controle que atuem na pressão do vaso de saturação e abertura da válvula agulha do sistema de flotação para controlar a turbidez da água pós-flotação;
- Empregar lógica *Fuzzy* no projeto dos controladores visando melhor controle do processo de FAD;
- Avaliar em cada sistema de controle o consumo de energia para comparar com o sistema em malha aberta.

3 Materiais e Métodos

3.1 Montagem e Automação do protótipo de FAD

Para a realização dos ensaios foi necessária a montagem do protótipo de FAD, como também sua automação. Na montagem foram empregadas tubulações em poliuretano com resistência a pressão de 10 bar e conexões de engate rápido para facilitar a limpeza e manutenção dos equipamentos.

Os engates rápidos, assim como o vaso saturador não empacotado, permitiram o desenvolvimento de um protótipo versátil, capaz de operar em três modos diferentes, a saber: *Pressurização Total*, *Pressurização Parcial* e *Recirculação Pressurizada*.

O modo Recirculação Pressurizada, cujo fluxograma (PFD) está apresentado na Figura 9, foi o modo de operação escolhido para realização dos ensaios deste trabalho por se tratar do modo de operação mais comum em ETAs.

Na Figura 9 são representados os principais equipamentos do protótipo de FAD como, por exemplo, o floculador (TQ01), o flotador (TQ02) e o vaso saturador (TQ05), além de indicar o fluxo de material no processo.

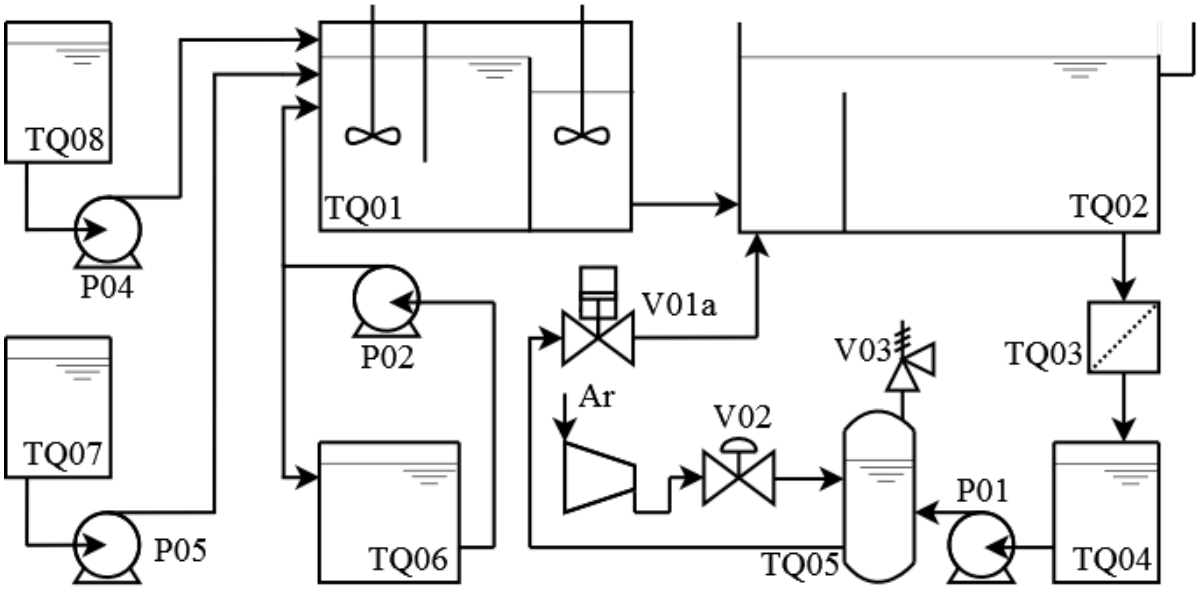


Figura 9 – PFD do sistema de FAD com recirculação pressurizada.

A partir do PFD desenvolvido para o sistema FAD, foi projetado o P&ID para o protótipo, representado pela Figura 10. Os P&IDs dos outros dois modos de operação podem ser encontrados no Apêndice A e foram projetados também para que a linha de pesquisa iniciada

com este trabalho de doutorado oferecesse novas possibilidades de pesquisa e desenvolvimento científico e tecnológico ao grupo do LCAP.

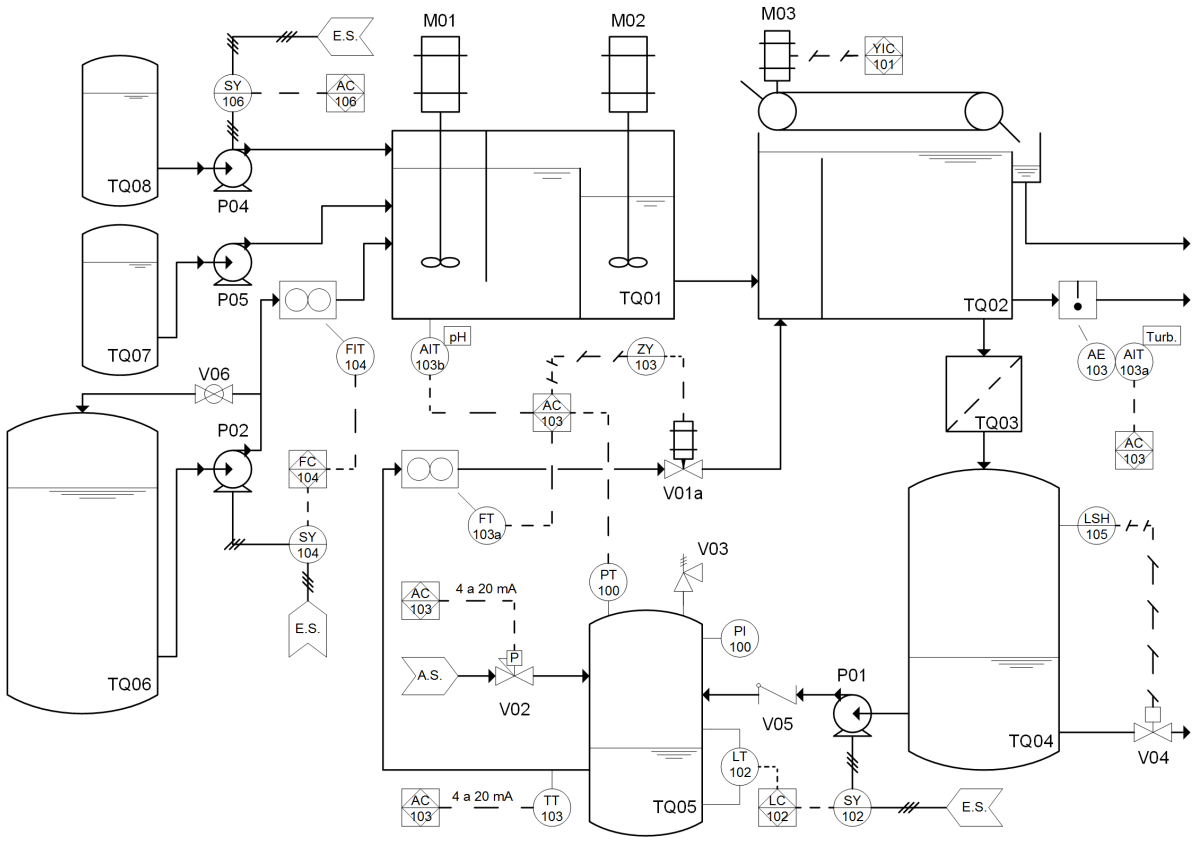


Figura 10 – P&ID do sistema de FAD com recirculação pressurizada.

Os P&IDs possibilitaram a orientação na instalação dos equipamentos e instrumentos durante o processo de montagem do protótipo, indicando pontos de instalação, de medição e ligação com o sistema de automação.

No protótipo foram utilizados os atuadores, equipamentos, controlador lógico programável (CLP) e sensores apresentados e descritos na Tabela 3, com detalhamento do modelo, marca, da característica principal de operação e também a referência à sua identificação (TAG) no P&ID.

3.1.1 Controlador Lógico Programável

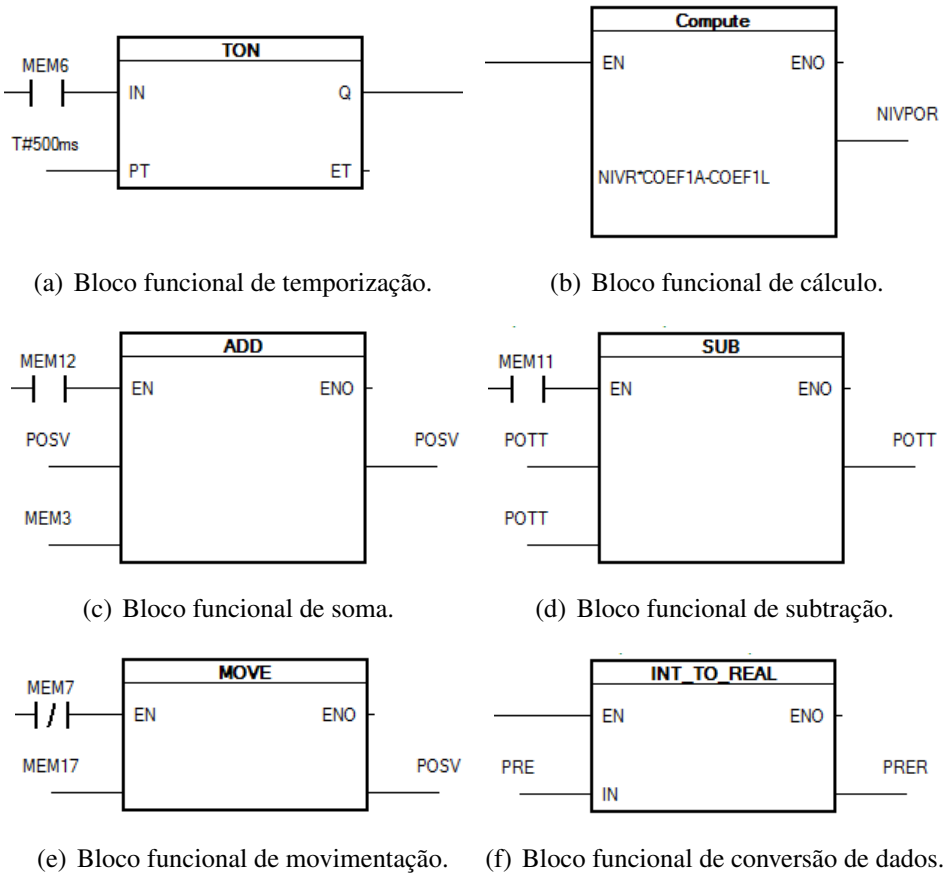
A automação do protótipo de FAD contou também com a configuração de um programa de aplicação no controlador lógico programável utilizando lógica Ladder. Na literatura há extensa revisão sobre lógica Ladder e sua aplicação em automação de sistemas (DA SILVEIRA; SANTOS, 1998; DE MORAES; CASTRUCCI, 2015).

Foram utilizados blocos funcionais na programação em Ladder para realizar algumas funções específicas, como apresentado na Figura 11.

Tabela 3 – Lista de atuadores, equipamentos e instrumentos da planta de FAD.

Equipamentos			
Equipamento	Modelo	Marca	Características
Floculador (TQ01)	-	-	Volume de 30 L
Flotador (TQ02)	-	-	Volume de 67,2 L
Filtro de areia (TQ03)	-	-	Volume de 5,65 L
Tanque Água Filtrada (TQ04)	-	-	Volume de 25 L
Vaso saturador (TQ05)	-	-	Volume de 4,4 L
Tanque de Efluente (TQ06)	-	-	Volume de 1 m^3
Tanque de $NaAlO_2$ (TQ07)	-	-	Volume de 0,5 L
Tanque de Tanino (TQ08)	-	-	Volume de 0,5 L
Válv. agulha (V01a)	SS-4MG2	Swagelok®	Cv = 0,03
Válv. agulha (V01b)	SS-ORM2	Swagelok®	Cv = 0,09
Válv. solenóide (V04)	20BF073TF	Parker®	0 a 4,8 $\mathrm{L/min}$
Motor de passo (MP)	DMX-K-DRV-23	Arcus®	32000 passos
Agitador pá tipo plana (M01)	712	Fisatom®	0 a 2000 rpm
Agitador pá tipo hélice (M02)	RZR2051	Heidolph®	0 a 1000 rpm
Motor de 24 Vcc (M03)	-	-	0 a 300 rpm
Bomba de engrenagens (P01)	GC-M23-JVS-6	Micropump®	3 $\mathrm{L/min}$
Bomba centrífuga (P02)	Hydrobloc P500T	KSB®	3600 $\mathrm{L/h}$
Bomba diafragma (P03)	PD64	Sodi Scientifica®	60 $\mathrm{L/h}$
Bombas dosadoras (P04 e P05)	-	-	5000 rpm
CLP (AC103)	X20 CP1585	B&R®	-
Atuadores			
Inversor de frequência (SY104)	VLT Micro Drive	Danfoss®	0 - 60 Hz
Inversor de frequência (SY102)	VLT 2800	Danfoss®	0 - 60 Hz
Inversor de frequência (SY107)	CFW 10 Easydrive	WEG®	0 - 60 Hz
Mod. largura de pulso (SY106)	-	-	0 - 100 %
Mod. largura de pulso	-	D.A.L.®	0 - 100 %
Válv. reg. de pressão (V02)	P3HPA12AD2VD1A	Parker®	0 - 10 bar
Controlador do *driver* (ZY103)	ACE-SXC 485	Arcus®	-
Sensores			
pHmetro *online* (AIT103b)	HI 8614L	Hanna®	0 - 14
Turbidímetro *online* (AIT103a)	Microtol 4	HF Scientific®	0 - 1000 NTU
Turbidímetro *offline*	AP2000	Policontrol®	0 - 1000 NTU
Med. vaz. eletromag. (FIT104)	VMS Pro 1000	Incontrol®	0 - 10 $\mathrm{m/s}$
Med. vaz. turbina (FIT103a)	FLR1009ST-I	Omega®	0,05 - 0,5 $\mathrm{L/min}$
Med. vaz. turbina (FIT103b)	VTP-L110	Incontrol®	0,4 - 13 $\mathrm{L/min}$
Transm. pressão abs. (PT100)	NP430D	Novus®	0 - 20 bar
Transm. pressão dif. (LT102)	692900007141	Huba control®	0 - 100 mbar
Pt-100 com Tx-Block (TT103)	TxMiniBlock	Novus®	-200 - 650 °C
Transd. de potência ativa	3000W420A24VDC	Secon®	0 - 3 kW

O bloco funcional da Figura 11(a) realiza o acionamento de sua saída após o contato de acionamento ser fechado e o tempo configurado (no exemplo 500 ms) ser alcançado. Desta forma, sendo usado sempre que uma ação necessitar ser temporizada.



(a) Bloco funcional de temporização. (b) Bloco funcional de cálculo.

(c) Bloco funcional de soma. (d) Bloco funcional de subtração.

(e) Bloco funcional de movimentação. (f) Bloco funcional de conversão de dados.

Figura 11 – Blocos funcionais no programa de aplicação.

O bloco funcional da Figura 11(b) sempre que acionado faz cálculos de soma, subtração, multiplicação e divisão entre memórias configuradas no bloco, sendo normalmente empregado para o ajuste de dados em bits para valores em unidade de engenharia. Já os blocos funcionais das Figuras 11(c) e 11(d) quando acionados realizam apenas a soma e a subtração, respectivamente, das memórias configuradas nas entradas do bloco, e salva o resultado na memória configurada na saída.

Já o bloco funcional da Figura 11(e) faz o movimento/cópia de um valor registrado em uma memória para uma outra memória, sendo usado normalmente quando é preciso forçar um valor para uma memória em determinada condição. E por fim, o bloco funcional da Figura 11(f) faz a conversão de um padrão de sinal para outro, por exemplo de um valor inteiro para um valor real. Este bloco é regularmente utilizado na formatação de valores memorizados para serem usados em blocos funcionais de cálculos com outras memórias em formatos diferentes.

Além dos blocos funcionais, foram utilizados contatos normalmente abertos e fechados, e também normalmente abertos com detecção de borda de subida na representação de algumas memórias no CLP para realizar a lógica de automação do protótipo de FAD, além de saídas de acionamento direto e também com intertravamento em nível alto ou nível baixo para algumas memórias.

Desta forma, o programa de aplicação foi pensado e desenvolvido para realizar ações como o acionamento do controlador do *driver* do motor de passo (MP), cálculo da posição de abertura da válvula agulha, acionamento da lâmpada indicativa de alarme e do raspador, além de cálculos de conversão das I/O's para unidades de engenharia.

3.1.2 Controlador do *driver* do motor de passo

O controlador do *driver* do MP possui interface de configuração conforme apresentado na Figura 12, onde é possível configurar a resolução dos passos, sentido de rotação do MP, além de programar o controlador do *driver* com uma aplicação *Stand Alone* com a qual é possível movimentar o MP com base nas entradas e saídas digitais do controlador.

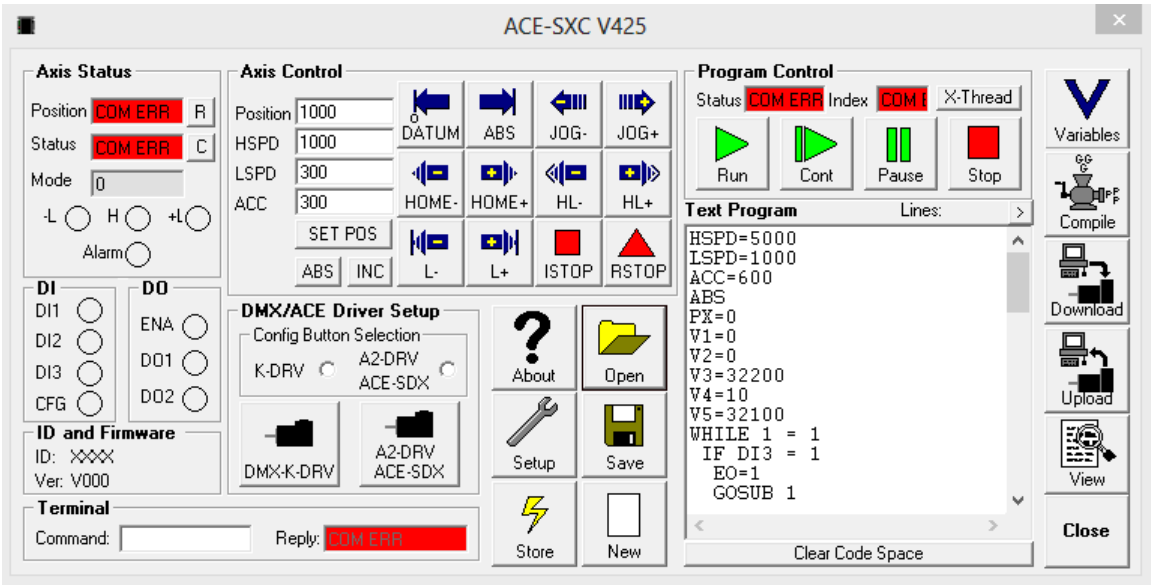


Figura 12 – Interface de configuração do controlador do *driver* do MP.

O MP foi configurado com resolução de 3200 passos por revolução. Trata-se da sua máxima resolução, o que permite um controle mais preciso de abertura da válvula V01a. E o sentido para incremento da posição foi configurado como anti-horário, pois trata-se do sentido de abertura da válvula.

O programa de aplicação *Stand Alone* é programado em linguagem ASCII, conforme manual do equipamento desenvolvido pelo fabricante. O programa foi pensado e desenvolvido para que sempre execute uma função *while* em que é verificado se o MP deve estar acionado ou desligado. Em caso de desligado, se mantém na posição totalmente fechado e sem energizar o MP. Já se acionado, executa uma sub-rotina onde são verificadas as condições das entradas digitais do controlador do *driver* para incremento ou decremento da abertura da válvula V01, e acionadas saídas digitais para indicação ao controlador lógico programável de que o MP realizou a movimentação solicitada.

Assim, utilizando um controlador de *driver* de MP, foi possível propor a automação da abertura e do fechamento da válvula agulha.

3.1.3 Ajuste dos atuadores

Uma vez que podem haver pequenas variações entre o sinal de referência para o atuador e sua atuação, fez-se necessária a parametrização dos atuadores. Para isto, foram realizadas verificações ponto a ponto do valor em bits atribuído à memória no CLP relacionada ao acionamento do respectivo atuador com o valor da variável física de atuação. Esses pontos foram linearizados e a curva obtida utilizada para conversão dos valores de referência para os atuadores, reduzindo o desvio entre o sinal de referência do atuador e sua atuação.

3.1.4 Calibração dos sensores

Os sensores da planta de FAD também foram calibrados para correta análise das variáveis do processo. A calibração dos sensores foi realizada tomando pontos no *range* do medidor utilizando um equipamento calibrado e de referência, e registrando o valor em bits convertido pelo CLP. Esses pontos foram ajustados a uma curva por regressão linear e a curva utilizada para corrigir o valor da variável medida.

Para o transmissor de pressão absoluta foi utilizado um manômetro de referência para seu procedimento de calibração, coletando pontos na pressurização do vaso e na despressurização para minimizar o efeito de histerese no sensor. No caso do transmissor de pressão diferencial utilizado para inferir o nível de líquido no vaso saturador, um balão volumétrico foi utilizado para medir o volume adicionado ao vaso nas medições, tendo sido tomados pontos primeiramente no processo de enchimento e em seguida no esvaziamento do vaso, também por motivos de histerese no sensor.

O turbidímetro *online* por sua vez é calibrado com padrões de calibração de 0,02 NTU, 10 NTU e 100 NTU, tendo sido calibrado apenas com estes três pontos, assim como o pHmetro *online* que foi calibrado com soluções tampões com pH de 4, 7 e 10.

O Pt-100 embora tenha sido configurado via Tx-Block para a faixa de temperatura de 0 a 100 $^{\circ}\mathrm{C}$, foi calibrado utilizando um termômetro de referência e um banho térmico na faixa de 5 a 45 $^{\circ}\mathrm{C}$ por se tratar da faixa da temperatura em que a água no vaso se encontra usualmente. Já os medidores de vazão, por sua vez, foram calibrados utilizando rotâmetros de referência para os valores das vazões. As faixas de vazões utilizadas nas calibrações destes sensores foram determinadas conforme a faixa de operação de cada medidor. Assim como para os outros instrumentos, os dados de calibração foram linearizados e a curva de ajuste utilizada para correção da leitura dos medidores.

3.2 Preparação e tratamento do efluente

Para a realização dos ensaios foi necessário estabelecer uma metodologia de preparo do efluente, tratamento químico e *start-up* do protótipo de FAD, como segue descrito a seguir.

3.2.1 Preparo do efluente

A técnica de tratamento de água por FAD é normalmente empregada para remoção de turbidez em águas de superfície como rios e lagos, onde há presença de material particulado em suspensão (TCHOBANOGLOUS, 1991). Por esta razão, na realização deste projeto foi utilizado um efluente preparado com terra vermelha, solo caracterizado como argiloso e comumente encontrado nas regiões sul e sudeste do Brasil (BRADY, 1989), simulando uma água captada do leito de um rio a ser tratada em uma ETA.

Na preparação do efluente foi utilizado volume suficiente de água tratada obtida da rede de distribuição no próprio laboratório LCAP para a realização de 1,5 h de ensaio ($\cong 400\mathrm{L}$), sendo armazenada em um tanque (TQ06) externo ao laboratório para posterior preparo do efluente.

Em um recipiente de 10 L foi dissolvida aproximadamente 300 g de terra vermelha previamente peneirada em 3 L de água, produzindo água com alto teor de sólidos suspensos com a presença de corpo de fundo formado por partículas sólidas de rápida decantação. Em seguida, essa mistura foi agitada por cerca de 1 min seguida de 30 s de repouso. Com isto, o sobrenadante da suspensão formado por partículas finas e de difícil decantação foi adicionado ao tanque TQ06 até ajuste da turbidez para aproximadamente 40 NTU, resultando em um efluente com carga de sólidos suspensos de difícil decantação.

Nesse momento, a bomba P02 foi acionada manualmente a 55 Hz para iniciar o reciclo do efluente no TQ06 e manter o efluente o mais homogêneo possível ao longo do experimento. Entretanto, foram observadas algumas flutuações da turbidez em torno de 40 NTU ao longo do ensaio, uma vez que a mistura proporcionada pela linha de reciclo não é perfeita.

3.2.2 *Jar Test*

Após o preparo do efluente com solo argiloso a 40 NTU, foi feita a preparação das soluções de $NaAlO_2$ e de tanino SG em dosagens específicas para a etapa de floculação. A dosagem de ambos foi estabelecida via ensaio de *Jar Test*. Segundo Tchobanoglous (1991), *Jar Test* é um teste rápido e de bancada em que por tentativa e erro é estabelecida a dosagem adequada de agente coagulante e polieletrólito para a floculação de efluentes.

O procedimento de *Jar Test* consiste em adicionar o mesmo volume de efluente em diferentes recipientes e em seguida quantidades diferentes de agente coagulante em cada recipiente. A mistura é homogeneizada e o valor de pH após a alcalinização é registrado. Em

seguida é feita a floculação adicionando uma quantidade também diferente do biopolieletrólito em cada um dos recipientes, homogeneizando a mistura por 1 min e anotando o valor final do pH de floculação.

Decorridos 5 min para a decantação dos flocos produzidos, é feita a medida de turbidez com uma alíquota do sobrenadante para verificação da melhor dosagem de aluminato de sódio e tanino SG, sendo escolhida para realizar os experimentos a dosagem que proporcionou sobrenadante com menor turbidez.

3.2.3 *Start-up* do protótipo de FAD

Antes do *start-up* do protótipo, o tanque TQ04 foi preenchido com água limpa para iniciar o abastecimento do vaso saturador. O flotador (TQ02) também foi inicialmente preenchido com água limpa visando minimizar o tempo até o regime permanente.

Com isso, a comunicação do CLP com o sistema supervisório de controle e aquisição de dados (SCADA) foi estabelecida. Automaticamente, a bomba P01 iniciou o enchimento do vaso TQ05 e a bomba P02 foi acionada em automático para regular a vazão de alimentação do protótipo de FAD em 3 $\mathrm{L/min}$, mantendo a linha de reciclo do efluente ao tanque de armazenamento aberta para homogeneização do efluente.

No primeiro estágio do floculador foram feitas as dosagens de aluminato de sódio com a bomba P05 e de tanino SG pela bomba P04, iniciando a floculação do efluente.

A vazão do biopolieletrólito foi regulada pelo sinal 4 a 20 mA enviado ao módulo PWM da P04, e a vazão de aluminato regulada manualmente por potenciômetro no PWM da bomba P05. Ambas as vazões de agente coagulante e de biopolieletrólito foram mantidas constantes ao longo dos ensaios com valores determinados via *Jar Test*, cujos resultados serão apresentados na seção 4.4. Assim, foi possível padronizar a etapa de floculação para que se pudesse verificar apenas os reflexos da atuação do sistema de controle da flotação na remoção da turbidez da água pós-flotação.

Posteriormente, o *setpoint* da pressão no vaso TQ05 foi ajustado para o valor específico utilizado em cada ensaio. No caso de operação em malha fechada para a turbidez, após o ajuste da referência de pressão no vaso saturador, o botão para acionamento da malha fechada foi acionado e o sistema de controle passava a regular os parâmetros da planta. Já em malha aberta para a turbidez, o valor de *setpoint* para a posição de abertura da válvula V01 foi configurado no SCADA manualmente até obter um valor de fração de reciclo F_r desejado.

Os ensaios foram realizados durante um tempo de 1,5 h, tempo suficiente para que a PV fosse regulada para o valor de *setpoint* e sua dinâmica e dos atuadores pudessem ser avaliadas.

3.2.4 Limpeza do filtro de areia

O filtro de areia era limpo a cada 3 ensaios realizados para a remoção de todo material retido na areia. Em uma ETA, o filtro de areia é limpo pelo procedimento de retro-lavagem que consiste em inverter o fluxo de água no filtro, removendo todo o material retido. Entretanto, por questões construtivas do protótipo, a limpeza do filtro foi realizada com a retirada do meio filtrante e sua limpeza utilizando água, com posterior reinstalação no filtro.

3.3 Estratégias de controle aplicados a FAD

Conforme discutido na seção 2.3, processos de FAD requerem sistemas de controle para regulação de suas variáveis para permitir maior qualidade na água tratada, maior segurança na operação do sistema e possivelmente menor consumo de energia. Desta forma, as estratégias de controle propostas para o protótipo de FAD serão apresentadas a seguir.

3.3.1 Vazão de efluente (Q_t)

A alimentação de efluente na planta de FAD foi feita pela bomba centrífuga P02 conforme visto anteriormente. Em função da queda do nível de efluente no tanque TQ06 ao longo dos ensaios, e consequente redução da pressão na linha de sucção da P02, era esperado que a vazão de efluente também se alterasse caso a frequência de rotação da bomba fosse mantida constante durante os ensaios. Deste modo, foi proposta uma malha *single-input-single-output* (SISO) para regulação de Q_t atuando na frequência da P02, conforme o diagrama de blocos da Figura 13.

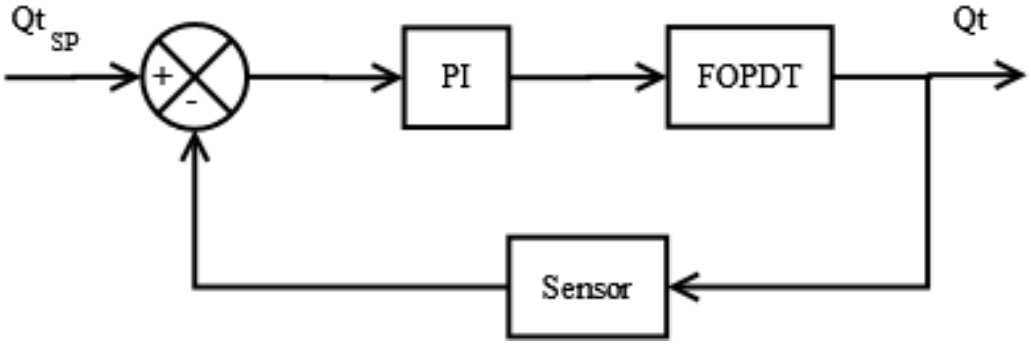


Figura 13 – Malha para controle de Q_t.

Foi proposto um controlador proporcional-integral (PI) com parâmetros sintonizados pelo método de Ziegler-Nichols para controlar Q_t, tendo sido feita a identificação do processo para um modelo tipo *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) por curva de resposta (SEBORG, 2004).

3.3.2 Posição da válvula agulha

O controle de posição da válvula V01a foi pensado de modo que um motor de passo acoplado pelo eixo à válvula agulha fizesse o ajuste preciso da sua posição de abertura. Por se tratar de um equipamento que não opera com sinal de instrumentação convencional de 4 a 20 mA, foi necessário propor a integração de um controlador de *driver* de MP que possui I/Os digitais com o CLP da planta para o controle de posição, além do MatLab® com parte da lógica de acionamento.

No MatLab® foi configurada a lógica para comando da abertura ou fechamento da válvula V01a em função do valor de *setpoint* estabelecido. Este comando foi enviado ao CLP que realiza o acionamento do controlador do *driver* do MP via saídas digitais. Uma vez que fisicamente não foi possível a instalação de um encoder no conjunto MP/válvula agulha, ficou a cargo do CLP a atualização da posição da válvula de acordo com entradas digitais oriundas do controlador do *driver* indicando a realização da abertura ou fechamento solicitados.

3.3.3 Nível de água no vaso saturador

A alimentação do vaso saturador na linha de reciclo com água filtrada do sistema de FAD é muito importante, pois é preciso dissolver ar sob pressão em água clarificada para viabilizar a produção de micro-bolhas. Para isso foi instalada a bomba P01 do tipo engrenagens magnéticas capaz de bombear água em sistemas pressurizados.

Entretanto, o modelo de bomba utilizado não permite o bombeamento de vazões inferiores a 400 $\mathrm{mL/min}$ em sistemas com variação de pressão maior que 4 bar entre suas linhas de recalque e sucção, podendo causar danos às engrenagens internas. Como na planta de FAD é usual valores de vazão de reciclo inferiores a 400 $\mathrm{mL/min}$, o controle regulatório do nível é inviável.

Além disto, o possível controle regulatório do nível no vaso TQ05 contribuiria negativamente na dissolução de ar na água, uma vez que o nitrogênio é menos solúvel que o oxigênio em água conforme detalhado na seção 2.2. Logo, sem a renovação da fase gasosa, o nitrogênio passa a se acumular, comprometendo a qualidade e o fornecimento de micro-bolhas ao flotador (EDZWALD, 2010).

Desta forma, para regulação do nível de água no vaso TQ05 foi proposto um controle *ON/OFF* em que com o nível abaixo de 20 % havia o acionamento da P01 a 45 Hz até o nível alcançar 60 %, situação que desliga a P01. A 45 Hz, a bomba P01 apresenta vazão superior a 400 $\mathrm{mL/min}$ na faixa de operação da pressão no vaso TQ05.

A lógica de acionamento do nível também foi proposta com a ativação de dois alarmes: um em caso de nível abaixo de 18 %, indicando falha na P01 e risco de esgotamento do vaso saturador, e outro em caso de enchimento acima de 62 %, indicando risco de danos aos equipamentos.

3.3.4 Proposta de malhas em *override*

Conforme discutido na seção 2.3.2.2, em alguns casos é preciso implementar estratégias de controle que permitam a proteção dos equipamentos e pessoas envolvidas na operação do processo, e o protótipo de FAD é um destes casos. São duas as variáveis que requereram a implementação de malhas em *override*, a pressão do vaso saturador e a vazão de água saturada na linha de reciclo.

Tendo em vista que a planta de FAD será operada por diversas pessoas no LCAP, e em inúmeras situações em malha aberta quanto à regulação da turbidez, foi necessário o desenvolvimento das malhas *override* para a pressão e vazão de reciclo, visando a proteção de seus equipamentos e operadores em caso de falha humana.

3.3.4.1 Pressão no vaso saturador

A sobrepressão do vaso saturador pode danificar o transmissor de pressão diferencial utilizado para inferir o nível de água e o transmissor de vazão tipo turbina na linha de reciclo, além de poder causar acidentes pela ruptura do vaso TQ05.

A condição de baixa pressão no vaso, por sua vez, coloca em risco a operação do sistema de FAD por inviabilizar a dissolução de ar na água ou mesmo permitir o retorno de efluente para o vaso saturador.

Desta forma, se fez necessária uma malha de controle em *override* para corrigir o *setpoint* da pressão caso ultrapasse o limite de segurança de 7,5 bar, baseado nos limites operacionais dos instrumentos do protótipo, bem como uma malha em *override* para corrigir o *setpoint* em caso de pressão inferior a 1 bar.

Estes controladores foram propostos na forma proporcional-integral (PI) com recomposição do sinal de controle, para que no instante do acionamento da malha em *override* não fosse gerado um degrau no sinal enviado para o atuador.

3.3.4.2 Vazão de reciclo

A vazão de reciclo requereu uma malha de controle em *override* para proteção do medidor de vazão tipo turbina simples. Este sensor possui *range* de leitura entre 50 e 500 $\mathrm{mL/min}$. Aberturas de válvula acima de 38 %, quando a pressão no vaso é maior que 6 bar, extrapola o limite superior da faixa de leitura deste sensor podendo causar danos irreversíveis ao medidor, de acordo com dados do fabricante.

Logo, uma malha em *override* com um controlador PI com recomposição do sinal de controle para corrigir o *setpoint* da posição da válvula agulha, caso a vazão de reciclo ultrapasse 501 $\mathrm{mL/min}$, foi instalada no protótipo de FAD.

3.3.5 Controle da turbidez

A redução da turbidez do efluente é o resultado final do processo de flotação por ar dissolvido. Desta forma, uma maneira de conseguir regular a turbidez da água tratada atuando em variáveis do processo de flotação se torna desejável, e as estratégias de controle para este fim propostas neste trabalho seguem descritas a seguir.

3.3.5.1 Estratégias SISO

As estratégias SISO se baseiam na atuação de uma variável manipulada (MV), a partir da medição de uma única variável de processo (PV). No sistema de FAD, cujo objetivo é regular a turbidez da água após a flotação, a turbidez se torna a variável de processo na malha de controle. Já quanto à MV no sistema FAD, duas possíveis variáveis foram propostas uma vez que afetam diretamente a geração de micro-bolhas na flotação, gerando as estratégias aqui denominadas SISO I e SISO II. Na estratégia SISO I, a pressão do vaso TQ05 foi empregada como MV, enquanto na estratégia SISO II foi utilizada a fração de reciclo resultante da manipulação da abertura da válvula agulha V01a na linha de reciclo.

3.3.5.1.1 SISO I - Pressão no Saturador (P)

Nesta estratégia, a pressão do vaso TQ05 foi manipulada visando aumentar ou diminuir a dissolução do ar na água para que fosse produzida quantidade necessária de micro-bolhas no flotador, de modo que a turbidez fosse mantida em seu valor de *setpoint*.

Como em baixas pressões a dissolução de ar é pequena, a faixa de operação da pressão do vaso TQ05 foi estabelecida empiricamente entre 4 e 7 bar. Desta forma, o mínimo de ação de controle na malha equivale a uma pressão de 4 bar, evitando uma elevação demasiada da turbidez da água no flotador. A operação do vaso TQ05 com pressão abaixo deste valor reduziria significativamente a dissolução de ar na água, afetando a geração de micro-bolhas. Já a operação de TQ05 com pressão acima de 7 bar proporcionaria um maior consumo tanto de ar comprimido como de energia no bombeamento de água clarificada pela bomba P01. Assim, o máximo de ação de controle na malha equivaleu a 7 bar, com o intuito de não penalizar o consumo energético da planta.

Com a variação da pressão pela ação de controle da malha SISO I, mantendo constante a abertura da válvula V01a, o aumento da pressão proporciona o aumento da fração de reciclo, da mesma forma que a redução da pressão diminui a fração de reciclo. Assim, uma vez que se tem como interesse apenas o efeito da pressão em TQ05 na turbidez da água pós-flotação, se fez necessária também a implementação de uma malha de controle que regulasse a fração de reciclo, variando a abertura da válvula agulha para mantê-la constante ao longo dos ensaios.

3.3.5.1.2 SISO II - Fração de Reciclo (F_r)

Ao utilizar a abertura da válvula V01a como MV, foi possível variar a quantidade de micro-bolhas fornecidas no flotador uma vez que F_r é modificada a medida que a vazão na linha de reciclo é alterada pela abertura de V01a. Em situações em que a turbidez da água após o flotador encontra-se abaixo do valor de *setpoint*, uma redução em F_r por um gradual fechamento da válvula V01a permitiria um menor consumo de energia com o bombeamento de menos água filtrada para TQ05, assim como a redução no fornecimento de micro-bolhas no flotador que, consequentemente, elevaria a turbidez para o valor de *setpoint*. No caso de turbidez acima do valor de *setpoint*, o aumento em F_r proporcionaria a correção da turbidez pelo aumento da quantidade de micro-bolhas no flotador, permitindo uma melhor separação dos flocos da água e reduzindo a turbidez para o valor de *setpoint*.

Entretanto, foi importante considerar que F_r não pudesse ser tão reduzida de modo a inviabilizar a geração de micro-bolhas na válvula V01a conforme já observado por Rykaart e Haarhoff (1995). Da mesma forma, F_r não deveria ser tão elevada que a quantidade de água filtrada adicionada no flotador mascarasse a redução da turbidez da água no flotador devido a adição em grande quantidade de água com baixa turbidez.

Assim, na estratégia SISO II, à F_r foram impostos limites de 9,5 % e de 15,5 %, o que equivalem a aberturas de 25 % e 38 % da válvula V01a (C_v=0,03) com a pressão no vaso TQ05 em 6 bar. É importante ressaltar que, quer seja uma válvula agulha, uma flauta ou um bocal com orifício estreito, a configuração mecânica do equipamento que provoca a queda de pressão para a geração de micro-bolhas está diretamente relacionada com o diâmetro das micro-bolhas e a sua coalescência, ou seja, com a qualidade das micro-bolhas geradas.

No modo de operação da planta de FAD com recirculação pressurizada foi empregada uma válvula agulha com C_v igual a 0,03 que permitiu um ajuste fino da fração de reciclo, porém com uma pequena perda de eficiência na geração de micro-bolhas observada empiricamente em comparação à válvula agulha V01b, de C_v igual a 0,09, a ser empregada na planta de FAD para os modos *Pressurização Total* e *Pressurização Parcial*, que não foram objetos de estudo deste trabalho.

Na estratégia SISO II, a pressão do vaso TQ05 não deveria ser alterada durante os ensaios pois há interesse apenas no efeito da fração de reciclo na turbidez da água pós-flotador. Por isso, a pressão nesta estratégia foi configurada para o valor constante de 6 bar, sendo a válvula reguladora de pressão do vaso saturador responsável por manter a pressão constante.

3.3.5.2 Estratégia MISO

A estratégia MISO consistiu em utilizar diferentes entradas no controlador e gerar uma única ação de controle. Na planta de FAD, a estratégia MISO foi proposta empregando

lógica *Fuzzy* por se tratar de uma técnica que permite facilmente o projeto de controladores com múltiplas entradas e saídas.

Nesta estratégia foi selecionada como MV a abertura da válvula V01a, com base no conhecimento especialista obtido nos experimentos anteriores. Assim como na estratégia SISO II, a faixa de operação da F_r foi limitada entre 9,5 % e 15,5 %, que equivalem a aberturas de 25 % e 38 % da válvula V01a, estando a pressão do vaso TQ05 configurada também para 6 bar.

O projeto do controlador *Fuzzy* se baseou na utilização do valor instantâneo do erro da turbidez da água pós-flotador (e_{tu}) e na diferença entre o valor atual do erro da turbidez da água pós-flotador e o valor atrasado em 3 $\min$ (Δe_{tu}), para que o controlador fosse capaz de lidar com a MV de acordo com a dinâmica lenta da PV analisada no período de 3 $\min$.

A variável de saída ($\Delta V01a_{ref}$) do controlador *Fuzzy* foi proposta como sendo um valor incremental ao sinal de controle, ou seja, a saída do *Fuzzy* é integrada no tempo para compor o valor de referência para a abertura da válvula V01a.

Desta forma, o controlador se torna capaz de acionar a válvula V01a para abrir quando a turbidez está acima do seu valor de *setpoint*, e fechar quando a turbidez da água pós-flotação encontra-se abaixo do *setpoint*.

3.4 Performance de controle e consumo energético

Para avaliar os diferentes sistemas de controle propostos, os critérios de desempenho *Integral of Absolute Error* (IAE) e *Integral of Squared Error* (ISE), descritos nas Equações 3.1 e 3.2, foram utilizados. Ambos parâmetros, IAE e ISE, permitem verificar qual estratégia de controle foi mais eficaz em minimizar o erro da variável de processo ao longo do experimento (STEPHANOPOULOS, 1984).

$$IAE = \int_{t_0}^{t} |e(t)|dt \tag{3.1}$$

$$ISE = \int_{t_0}^{t} e(t)^2 dt \tag{3.2}$$

O critério IAE calcula o somatório do erro absoluto da variável de controle no ensaio, enquanto que o critério ISE calcula o somatório do erro quadrático. Isto implica que devido ao termo do erro ser elevado ao quadrado, o resultado de ISE é penalizado principalmente por erros grandes e muito pouco por erros pequenos. Por exemplo, na existência de *overshoot*, o critério ISE é fortemente penalizado, enquanto que na existência de um pequeno *offset*, ISE praticamente não sofre alteração. O mesmo já não é observado com o resultado do critério IAE, pois sempre é penalizado independentemente da amplitude do erro.

Além dos critérios IAE e ISE, foi calculado o critério de esforço de controle (EC) para cada um dos atuadores da malha de controle da turbidez em cada uma das estratégias propostas. A Equação 3.3 apresenta a forma de cálculo do critério de esforço de controle, em que Δu é a variação no sinal de controle enviado ao atuador.

$$EC = \int_{t_0}^{t} \Delta u(t)^2 dt \tag{3.3}$$

Este critério permitiu verificar o quanto um atuador é requisitado pelo sistema de controle em malha fechada, de modo que quanto menor o valor de EC, menos o atuador foi requerido para manter a PV em seu valor de *setpoint*. Valores muito altos de EC podem indicar uma sobrecarga no atuador, provocando maior desgaste dos mecanismo internos do atuador e redução de sua vida útil.

O consumo energético da planta de FAD foi calculado através da medição de sua potência ativa instantânea (Pot_i) em kW, em intervalos de $1\ \mathrm{s}$ durante os ensaios. A área abaixo da curva de potência ativa equivale ao consumo total da planta em kW, e a sua multiplicação pela tempo de ensaio determina o consumo (Pot_t) em kWh. A Equação 3.4 apresenta a forma de cálculo do consumo energético da planta de FAD, sendo que o tempo dos ensaios equivale a 1,5 h, ou seja, 5400 s.

$$Pot_t = \sum_{i=0}^{5400} \frac{(Pot_i + Pot_{i-1}) \times 1}{2} \times 1,5 \tag{3.4}$$

Com o cálculo de Pot_t foi possível verificar se as estratégias de controle propostas neste trabalho promoveram a redução no consumo de energia ao fechar a malha de controle da turbidez. Além disto, a Equação 3.5 foi utilizada para calcular o índice Pot_l que relaciona o consumo total de energia Pot_t pelo volume total de água tratada (V_t) nos ensaios realizados.

$$Pot_l = \frac{Pot_t}{V_t} \tag{3.5}$$

4 Resultados e Discussão

Neste projeto, foi construído um protótipo de flotação por ar dissolvido em escala laboratorial, totalmente automatizado e monitorado via sistema supervisório de controle e aquisição de dados (SCADA), iniciando uma nova linha de pesquisa no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp. O resultado da montagem do protótipo é apresentado a seguir.

4.1 Montagem do protótipo de FAD

Uma vez definido o processo, foi realizada a etapa de montagem do protótipo automatizado de FAD, que conta com um tanque floculador, um tanque flotador, um vaso saturador e um filtro de areia, como mostrado na Figura 14. O protótipo foi montado em uma estrutura de aço galvanizado reforçado, com rodízios e pintura eletrostática para melhor conservação.

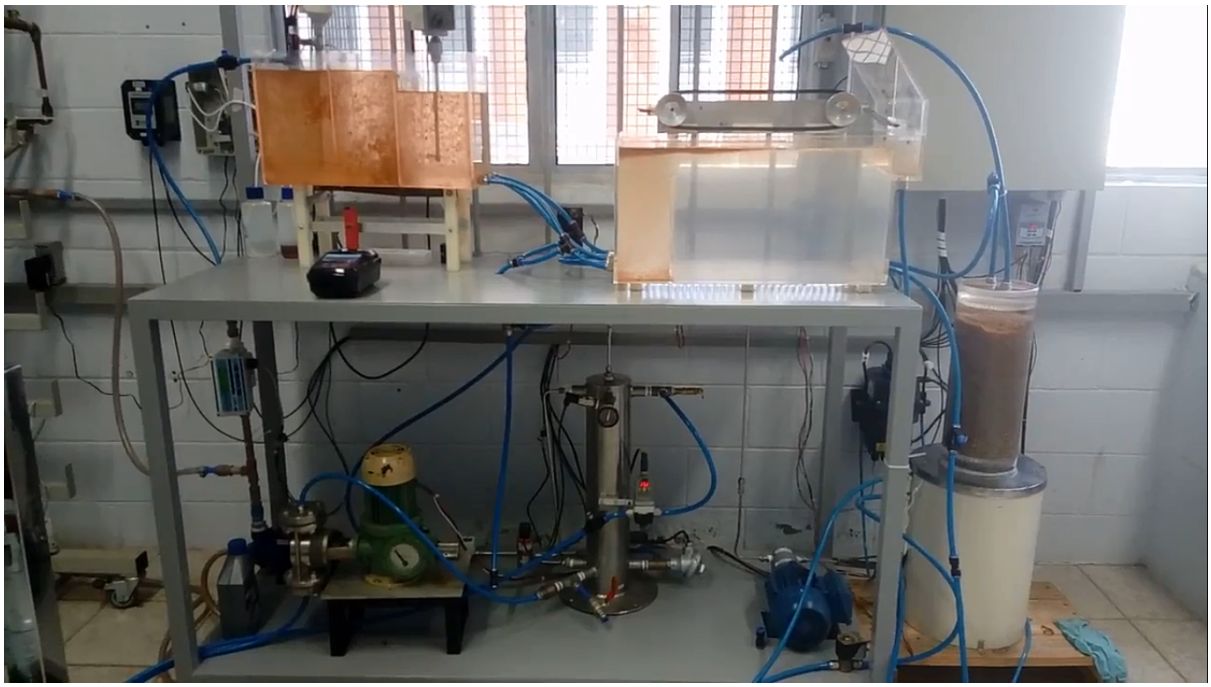


Figura 14 – Protótipo de flotação por ar dissolvido.

O protótipo conta com dois tanques com volume de 1 m^3 cada para o armazenamento de efluente bruto, além de sistema de automação via SCADA, quadro de comando com controlador lógico programável, inversores de frequência entre outros equipamentos para o controle e supervisão do processo de flotação. A seguir será apresentado o detalhamento dos equipamentos e funcionamento do protótipo.

4.1.1 Floculador

O floculador (TQ01) foi feito em acrílico nas dimensões (Comprimento $\times$ Altura $\times$ Profundidade) de $50\times30\times20$ cm, com dois agitadores posicionados na primeira e terceira etapas do floculador para promover a homogeneização e permitir uma melhor floculação. Possui duas divisórias internas que permitem o fluxo de efluente por entre as etapas, melhorando assim o tempo de retenção do efluente no floculador.

Na primeira etapa do floculador, ocorre uma mistura rápida entre o efluente, o agente coagulante aluminato de sódio $(NaAlO_2)$ e o biopolieletrólito tanino SG que são bombeados usando bombas peristálticas, iniciando a etapa de coagulação e floculação.

Na terceira etapa do floculador a agitação é mais branda de forma a não quebrar os flocos por força de cisalhamento no choque com as pás do agitador, mas permitindo a mistura do meio e a não decantação dos flocos.

Um suporte elevatório foi construído para elevar o floculador em relação ao flotador para permitir o escoamento por gravidade do efluente floculado para o próximo estágio de tratamento, a flotação.

A Figura 15 apresenta o floculador do protótipo de flotação por ar dissolvido com detalhe para os agitadores. O agitador do primeiro estágio trata-se de um agitador de pás planas e o agitador do terceiro estágio trata-se de um agitador tipo hélice, ambos com rotação constante de 100 rpm.

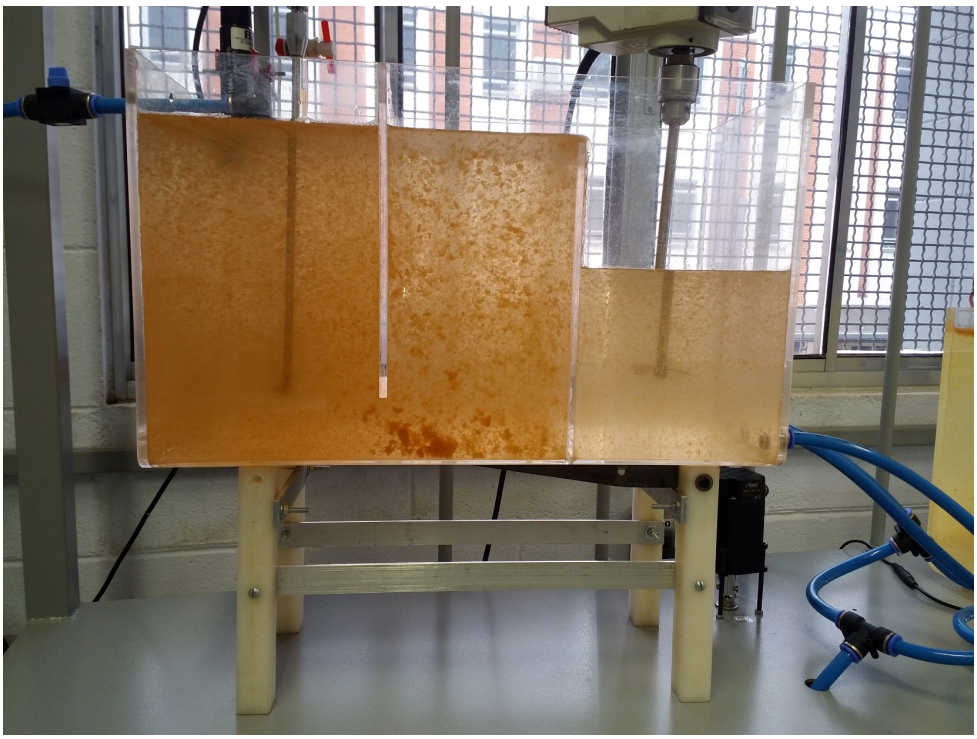


Figura 15 – Floculador em acrílico.

4.1.2 Flotador

Foi construído um flotador em acrílico (TQ02) com dimensões (Comprimento $\times$ Altura $\times$ Profundidade) iguais a $56 \times 30 \times 40$ cm e sistema de raspador acionado remotamente, como pode ser observado na Figura 16.

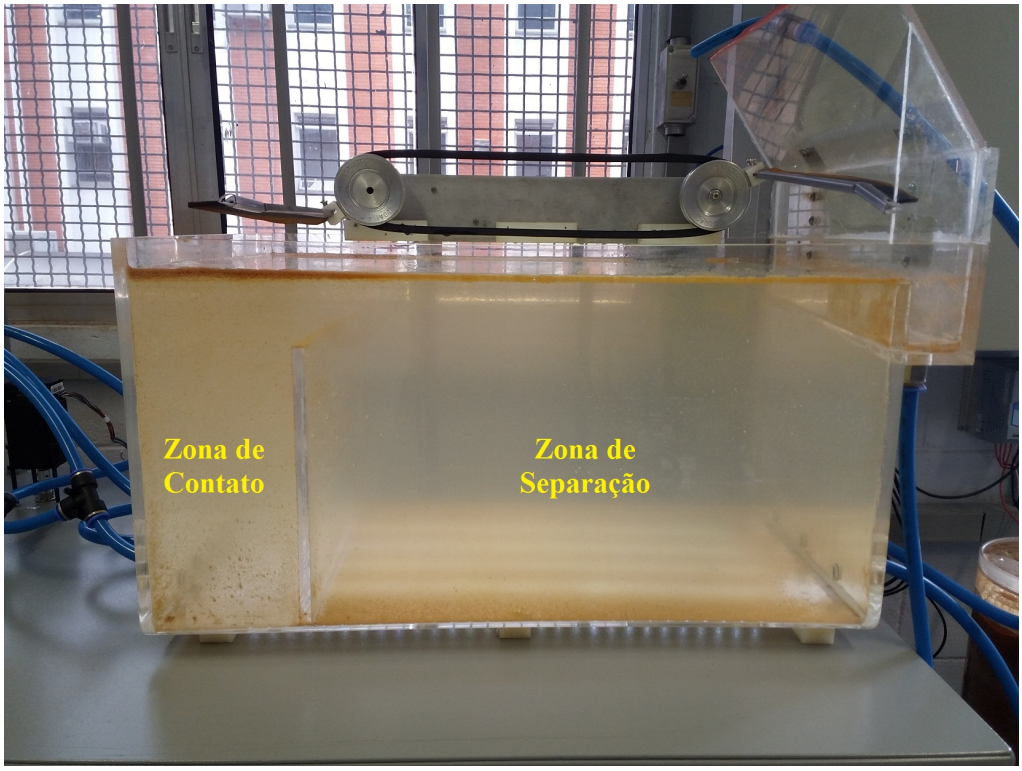


Figura 16 – Flotador em acrílico.

O flotador conta com uma primeira etapa denominada zona de contato, onde há a mistura do efluente floculado oriundo do floculador com as micro-bolhas provenientes do vaso saturador. Na zona de contato ocorre a formação dos agregados micro-bolha/partícula através do choque físico entre ambos componentes, reduzindo a densidade aparente do floco para viabilizar a flotação, sendo que parte das partículas já flotam acima da zona de contato.

Separada por um anteparo (*baffle*) divisório da zona de contato com 25 cm de altura e localizado a 11 cm do ponto de admissão de efluente e micro-bolhas, existe a zona de separação onde os agregados micro-bolha/partícula que ainda se encontram dispersos na água são finalmente flotados e a água clarificada é removida pelo fundo do flotador e enviada para o filtro de areia.

O sistema de limpeza do material flotado conta com dois raspadores fixados a uma correia acionada por um motor de corrente contínua acoplado a uma polia. O motor é acionado via SCADA para remoção do material flotado que é conduzido até a calha.

A Figura 17 mostra o flotador com material flotado acumulado em sua superfície (a) antes e (b) depois do acionamento dos raspadores. O acúmulo de material flotado ocorre

principalmente acima da zona de contato, como pode ser observado na Figura 17 (a). Assim, decorrido um tempo de ensaio é necessária a limpeza promovida pelo raspador para que a camada de material flotado não fique muito espessa e bloqueie a passagem de água para a zona de separação.



(a) Antes da remoção. (b) Depois da remoção.

Figura 17 – Remoção do material flotado pelo raspador.

A Figura 18 mostra em detalhe a formação da camada de material flotado acima da zona de contato, sendo possível notar que a camada diminui sua espessura à medida que avança horizontalmente em direção à zona de separação.

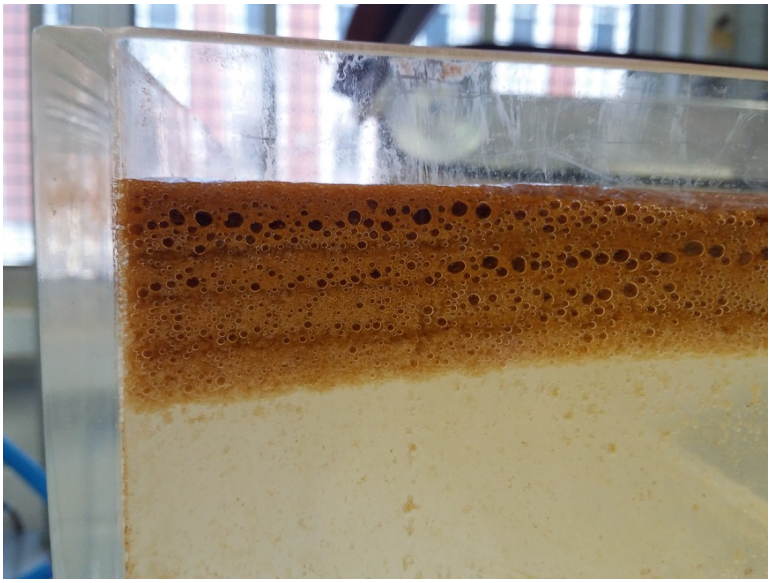


Figura 18 – Detalhe da camada de material flotado formada acima da zona de contato.

4.1.3 Filtro de areia

A água clarificada produzida no flotador é escoada por gravidade para filtração em um filtro de areia cilíndrico (TQ03) feito em acrílico nas dimensões (Diâmetro $\times$ Altura) de 12×50 cm mostrado na Figura 19.

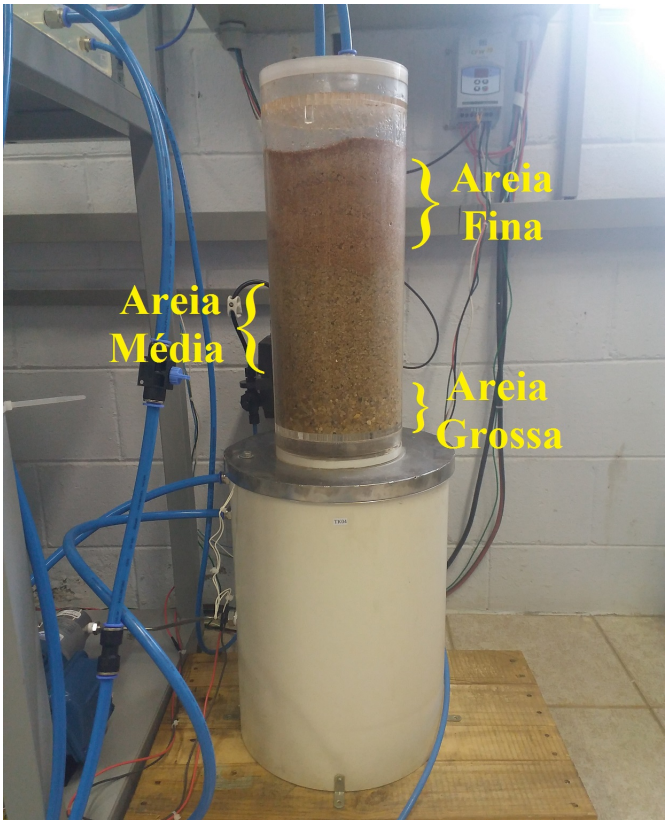


Figura 19 – Filtro de areia e tanque de armazenamento de água tratada (TQ04).

O filtro de areia serve para reter flocos e impurezas que não tenham sido removidos após as etapas de floculação e flotação, tratando-se de uma etapa essencial para garantir uma eficiência desejável no tratamento de água, conforme já discutido anteriormente.

Além disto, uma fração da água tratada é utilizada na alimentação do vaso de saturação e não deve possuir partículas sólidas para não danificar a bomba de engrenagens (P01), justificando, portanto, a necessidade do filtro de areia.

O filtro foi montado com 3 camadas de areias com granulometria diferentes. A camada superior, com 20 cm de profundidade, foi preenchida com areia fina de granulometria entre 0,4 e 0,7 mm. A camada intermediária, com 20 cm de profundidade, foi preenchida com areia média de granulometria entre 0,8 e 1,7 mm. Já a camada inferior com 5 cm de profundidade, foi preenchida com areia grossa de granulometria entre 2,35 e 4,75 mm. Esta disposição da areia em camadas permite que o material não flotado seja retido inicialmente na primeira camada (areia fina), e com o tempo, por eluição ocorre a saturação das outras camadas até que se faz necessária uma retro-lavagem para limpeza do filtro (TCHOBANOGLOUS, 1991).

O filtro encontra-se apoiado sobre um reservatório (TQ04) de 30 L que armazena a água tratada, posteriormente utilizada para alimentação do vaso saturador na linha de reciclo.

Neste reservatório existem dois pontos de drenagem de água para não haver transbordo do tanque. No dreno de nível *High* há uma válvula solenóide (V04) que é acionada por

uma chave de nível tipo bóia instalada dentro do reservatório toda vez que a água atinge seu nível. Já o dreno de nível *High High* permanece continuamente aberto.

4.1.4 Vaso de saturação

Uma parcela da água filtrada e armazenada no reservatório TQ04 é bombeada para o vaso saturador (TQ05) através da bomba de engrenagens P01, conforme mostra a Figura 20.



Figura 20 – Sistema de saturação da água.

O vaso saturador utilizado no protótipo de FAD foi construído e utilizado no trabalho de Thompson Jr (2013) e possui dimensões (Diâmetro $\times$ Altura) de 10,6$\times$50 cm que resulta em um volume útil igual a 4,4 L. O vaso é pressurizado com ar comprimido utilizando uma válvula reguladora de pressão (V02) e serve para promover a dissolução sob pressão de ar em água para geração de micro-bolhas.

As linhas de alimentação de água no vaso saturador possuem válvulas de retenção (V05 e V07) para que não ocorra contra-fluxo quando as bombas P01 ou P03 estiverem desligadas. A bomba P03 é uma bomba diafragma utilizada para alimentar o vaso saturador com efluente floculado quando o sistema é operado nos modos de *Pressurização Total* e *Pressurização Parcial*, os quais não serão objetos de estudo desta tese uma vez que são modos de operação não convencionais.

O vaso de saturação é feito em aço inoxidável para maior resistência à corrosão já que opera com água rica em oxigênio dissolvido. Também possui uma válvula de alívio (V03)

por questão de segurança em caso de sobrepressão, estando regulada para abrir com pressão maior que 7,5 bar. Além disto, também por motivos de segurança, o vaso TQ05 conta com um manômetro para visualização local da pressão interna, como pode ser observado na Figura 21.

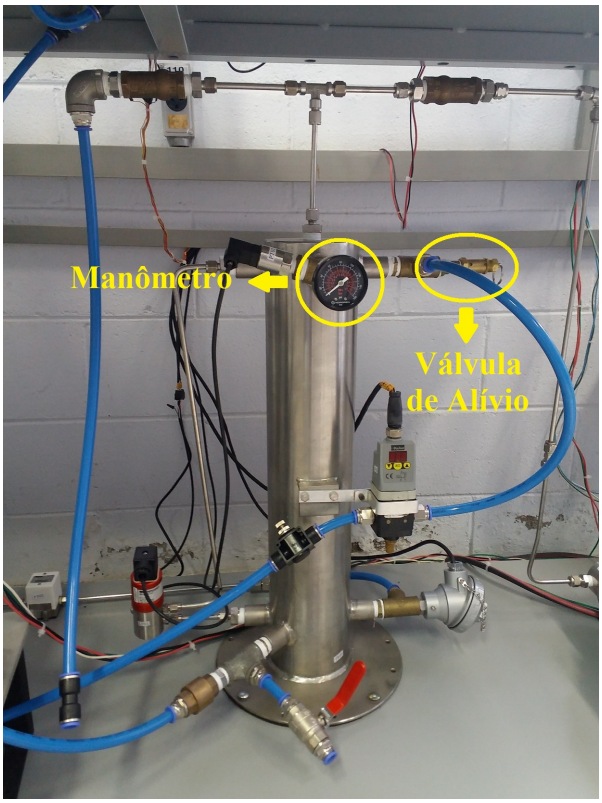


Figura 21 – Vaso de saturação instrumentado.

O ponto de admissão de água está localizado no topo do vaso saturador, o que contribui para maior dissolução do ar na água, entretanto provoca maior turbulência na superfície de líquido que afeta a medição de nível de água no vaso.

O ponto de retirada de água do vaso encontra-se na base do tanque, impedindo assim que ocorra escoamento bifásico até a válvula agulha, o que poderia causar danos ao medidor de vazão tipo turbina instalado nesta linha.

4.1.5 Válvula agulha

A válvula agulha, ou qualquer outro equipamento capaz de promover uma brusca queda de pressão na linha de água saturada que alimenta o flotador, é necessária em sistemas de flotação por ar dissolvido, pois é esta queda de pressão que provoca a nucleação das micro-bolhas de ar que serão responsáveis por flotar o material particulado oriundo do floculador (BRATBY; MARAIS, 1975; EDZWALD, 1995).

A válvula agulha se mostra mais interessante do ponto de vista de controle do processo de flotação porque permite a regulagem da vazão de reciclo que alimenta o vaso

saturador. O mesmo não ocorre com distribuidores com furos milimétricos que são alocados dentro do flotador na zona de contato e não permitem uma regulagem da vazão de reciclo.

Para o modo de operação por *Recirculação Pressurizada* é empregada uma válvula agulha micrométrica (V01a) em aço inoxidável com coeficiente de vazão (C_v) igual a 0,03. Também foi instalada na planta uma válvula agulha (V01b) da mesma marca porém com C_v igual a 0,09 para os modos de operação pressurização total e parcial.

A Figura 22 apresenta a instalação da válvula agulha de C_v de 0,03 no protótipo de FAD à frente, e a válvula de C_v 0,09 ao fundo. A válvula V01a possui abertura total com 10 voltas do eixo obturador, sendo que o formato do obturador em agulha propicia variação linear da vazão em relação à sua abertura em porcentagem, conforme dados do fabricante.



Figura 22 – Válvula agulha de C_v igual a 0,03.

Normalmente as válvulas agulha são operadas manualmente. Entretanto, neste projeto o ajuste de sua abertura foi automatizado com o auxílio de um motor de passo com *driver* integrado, sendo seu funcionamento melhor detalhado na seção 4.2.1.4.

4.2 Automação do protótipo de FAD

Para a operação do sistema de FAD foi realizada a automação do protótipo com controladores, sensores e atuadores utilizando sinais digitais e analógicos de instrumentação no padrão 4 a 20 mA e 0 a 10 V, além de outros instrumentos alocados em um quadro de comando conforme detalhamento a seguir.

4.2.1 Quadro de comando

Um quadro de comando foi instalado para acomodar alguns dos equipamentos necessários para a automação do protótipo de FAD. A Figura 23 apresenta o quadro de comando com destaque para as lâmpadas indicadoras de alarmes e funcionamento da planta, além da chave de segurança e da botoeira de emergência utilizadas para o seu acionamento e desligamento, respectivamente. Estes equipamentos foram instalados para proteção e segurança das pessoas e equipamentos durante a operação do protótipo.

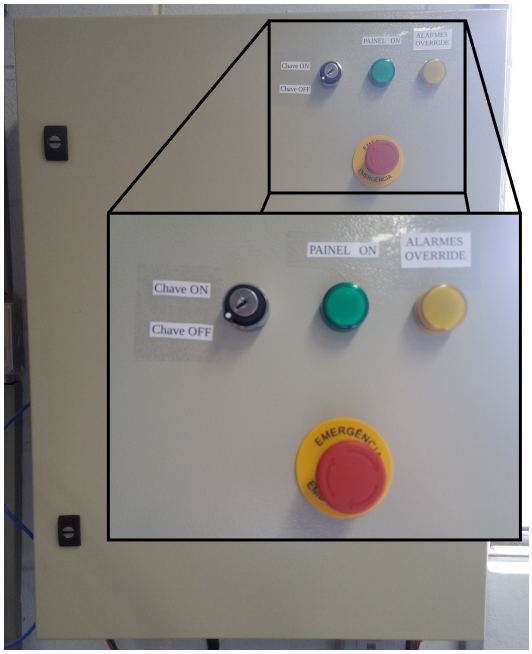


Figura 23 – Quadro de comando da planta de FAD.

O mapa de ligação elétrica no quadro de comando para energização dos equipamentos do protótipo de FAD é apresentado no Apêndice B.

4.2.1.1 Disjuntores e contatora

O quadro possui quatro disjuntores e uma contatora conforme mostra a Figura 24. Entre os disjuntores, um é utilizado para alimentação trifásica de todo o protótipo, um trifásico para alimentação do inversor de frequência da bomba P01 e do modulador de largura de pulso (PWM) da bomba dosadora P04, outro também trifásico para ambos inversores de frequência das bombas P02 e P03, e um bifásico para fornecimento de energia às duas fontes de alimentação de 24 Vcc.

A contatora é usada para dissipação de energia no acionamento do quadro sendo interligada à chave de segurança e à botoeira de emergência no seu arme e desarme. Uma vez que o quadro de comando é ligado, um *cooler* é acionado para promover um fluxo de ar forçado dentro do quadro para o resfriamento dos componentes eletrônicos, como também apresentado na Figura 24.



Figura 24 – Disjuntores, contatora e *cooler* do quadro de comando.

4.2.1.2 Fontes de alimentação, bornes e barramento

Duas fontes de alimentação de corrente contínua com 24 Vcc foram instaladas no quadro de comando, como mostra a Figura 25. Uma das fontes é dedicada à alimentação do motor de passo que faz o ajuste da abertura da válvula agulha, já que demanda maior corrente. A outra fonte é empregada para a alimentação de todos os instrumentos e equipamentos da planta de FAD que utilizam corrente contínua com tensão de 24 Vcc.



Figura 25 – Fontes de alimentação de corrente contínua e barramento terra.

Bornes foram alocados no quadro para permitir maior praticidade na conexão de cabos de instrumentação oriundos dos sensores e atuadores com as portas de entradas e saídas

(I/Os) do CLP. A Figura 26 mostra os bornes instalados no quadro de comando, e as ligações entre sensores, atuadores e controlador são apresentados no Apêndice C.

Além disto, um barramento terra foi instalado ao lado das fontes para permitir o aterramento de todos os equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados para evitar possíveis choques e curto-circuitos.

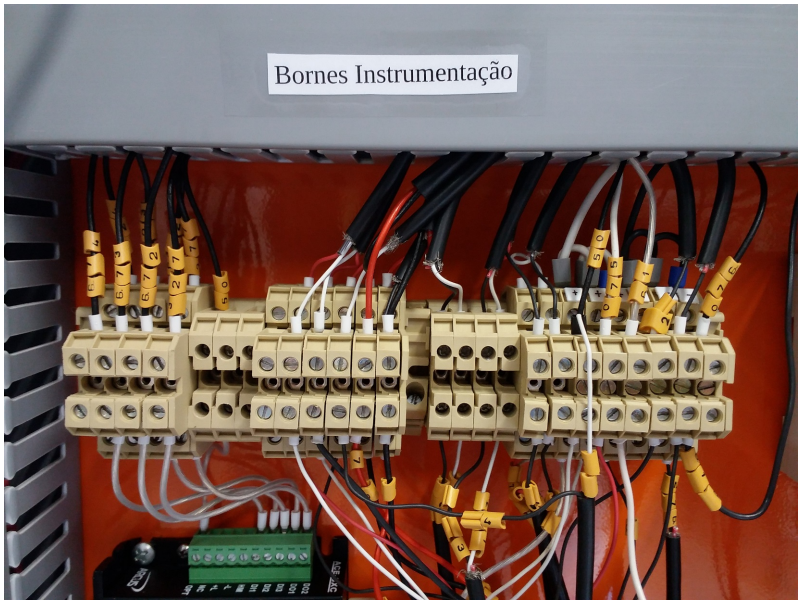


Figura 26 – Bornes do quadro de comando.

4.2.1.3 Controlador Lógico Programável

O acionamento dos atuadores da planta de FAD é realizado com o controlador lógico programável apresentado na Figura 27.



Figura 27 – Controlador lógico programável utilizado no protótipo.

O CLP faz comunicação via protocolo Ethernet TCP/IP com o computador onde é executado o sistema SCADA da planta, estando configurado como servidor OPC® para o *software* supervisório que é configurado como cliente.

Este modelo de CLP possui entrada para cartão *compact flash* que é usado para gravar o programa de aplicação que irá promover a automação do processo por meio de conversão de dados, cálculos matemáticos, leitura dos sensores e acionamentos dos atuadores.

No programa de aplicação desenvolvido para o protótipo, apresentado no Apêndice D, foi empregada linguagem *Ladder* devido à sua simplicidade de implementação e também por haver ampla biblioteca de blocos funcionais que realizam cálculos, conversões de dados, temporização e outras ações utilizadas para a automação do projeto. O mapa de memórias do CLP encontra-se representado no Apêndice E.

Quanto ao número de I/O's utilizados, o CLP foi configurado com dois cartões de entradas analógicas (AI) nos modelos X20 AI8321 e X20 AI4622 que possuem 8 e 4 entradas, respectivamente; e dois cartões de saídas analógicas (AO) modelo X20 AO4622 com 4 saídas cada. Estes cartões possuem resolução configurável de até 16 bits, com níveis configuráveis de -32767 a 32767 (16 bits) ou 0 a 32767 (15 bits). Para a operação da planta de FAD, nos cartões foi selecionada a resolução de 15 bits.

Além destes cartões, há dois cartões de saídas digitais (DO) nos modelos X20 DO8322 e X20 DO8323 que possuem 8 saídas a transistor PNP e NPN, respectivamente; e um cartão de entradas digitais (DI) modelo X20 DI8371 com 8 entradas.

Aos cartões de AI estão conectados os sensores, recebendo os valores medidos das variáveis do processo no padrão de 4 a 20 mA ou também em 0 a 10 V, enquanto que os cartões de AO enviam os valores de referência para os atuadores no padrão de 4 a 20 mA.

Já o cartão de DI recebe sinal digital do controlador do *driver* do motor de passo (MP), que será melhor detalhado na seção 4.2.1.4. Por uma questão de compatibilidade com o controlador do *driver*, foi utilizado o cartão de DO modelo X20 DO8323 para enviar os sinais digitais usados no controle de posição do MP, enquanto que para acionamento da lâmpada de alarmes do quadro e do motor do raspador instalado no flotador foi empregado o cartão de DO modelo X20 DO8322 com saída convencional PNP.

Os mapas com o endereçamento das I/Os do CLP encontram-se nas Tabelas 26 e 27 no Apêndice F.

4.2.1.4 Controlador do *driver* do motor de passo

Foi utilizado um motor de passo com 3200 passos por revolução, o qual possui *driver* integrado que faz a interface entre o motor de passo e o controlador do *driver*, convertendo o sinal digital em trem de pulsos.

A Figura 28 apresenta o controlador do *driver* utilizado nesta aplicação. Este controlador recebe alimentação em corrente contínua de 24 Vcc de uma das fontes instaladas no quadro, e possui I/Os digitais que se comunicam com o CLP para o ajuste da abertura da válvula agulha, conforme discutido anteriormente.

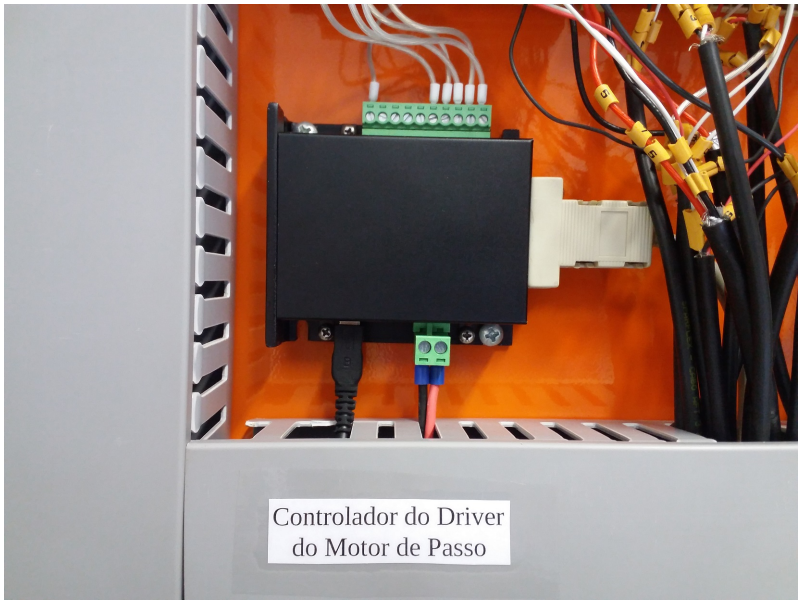


Figura 28 – Controlador do *driver* do motor de passo que atua na válvula agulha.

Para isto, na memória do controlador do *driver* foi gravado um algoritmo em linguagem ASCII, descrito no Apêndice G, que é executado independentemente do ciclo de varredura do CLP, e realiza o acionamento da movimentação do motor de passo com base nos sinais digitais oriundos do CLP.

Por sua vez, este algoritmo aciona as saídas digitais do controlador do *driver* para informar ao CLP a movimentação e posição do conjunto MP e válvula agulha, propiciando o seu controle de posição. O controle de posição da válvula V01a será melhor detalhado na seção 4.5.2.

Este controlador se comunica com o *driver* do motor de passo através de um cabo DB9, pelo qual não apenas é realizada a energização do motor de passo mas também o acionamento do *driver* integrado para o controle de posição da válvula V01a.

4.2.2 Atuadores

O protótipo de FAD possui atuadores para manipular variáveis específicas com o objetivo de controlar o processo de flotação.

Os atuadores implementados são inversores de frequência, controlador de *driver* de motor de passo e PWMs que manipulam, respectivamente, as bombas P01, P02 e P03, o motor de passo para ajuste da válvula agulha e as bombas dosadoras P04 e P05; além de uma válvula reguladora de pressão (V02) que atua na pressão interna do vaso saturador.

O motor de passo possui variações de posição em micro passos, com resolução escalonável de 200 até 3200 passos por revolução, o que propicia um ajuste fino da abertura da válvula agulha que possui abertura total com 10 revoluções do eixo obturador.

A resolução do motor de passo foi ajustada para 3200 passos por revolução, o que produz variações de abertura da válvula de aproximadamente 0,003125 % por passo.

Porém, para respostas mais rápidas na abertura e fechamento da V01a, o algoritmo de controle de posição apresentado no Apêndice G, foi configurado para movimentos de 3 em 3 passos, reduzindo assim as varições de abertura para aproximadamente 0,009375 %.

A Figura 29 apresenta o conjunto motor de passo e válvula agulha acoplados na estrutura metálica da planta de FAD.

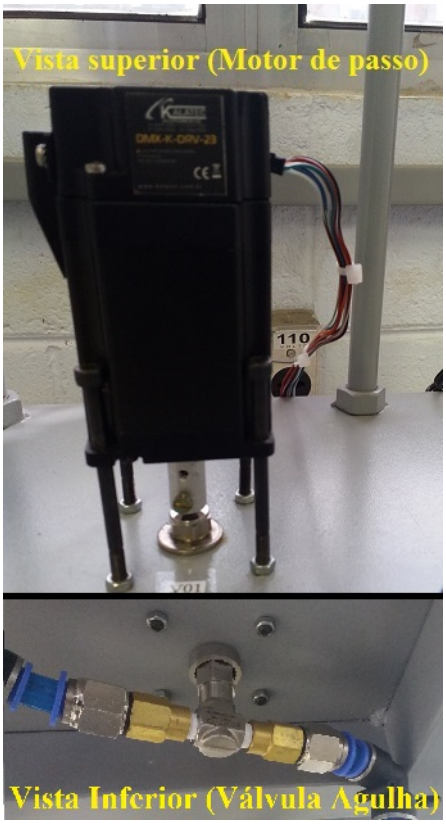


Figura 29 – Conjunto motor de passo e válvula agulha.

Como forma de proteção contra superaquecimento do motor de passo, ao sistema de controle configurado no SCADA foi adicionado um *deadband* de +/- 15 passos no valor de referência para a posição da válvula agulha, conforme será apresentado na seção 4.5.2.

Os três inversores de frequência da planta de FAD, apresentados na Figura 30, foram instalados para modular as frequências de rotação das bombas P01, P02 e P03. Os inversores possuem faixa de operação de 0 a 60 Hz e foram fixados dentro do quadro de comando para proteção contra choques elétricos.



Figura 30 – Inversores de frequência da planta de FAD.

A modulação da frequência de rotação das bombas reflete na variação de suas vazões, por isso utilizadas no protótipo de FAD.

A bomba P01 é de engrenagens magnéticas com motor trifásico de 1/2 hp, capaz de bombear água com precisão até uma pressão no recalque de 8,5 bar. Por esta razão, foi instalada para bombear água filtrada do tanque TQ04 para o vaso saturador.

O ponto de admissão de água em TQ05 é localizada no topo, o que favorece a dissolução de ar na água melhorando a superfície de contato.

O acionamento da bomba P01 via inversor de frequência sem o uso de uma rampa de aceleração força as engrenagens da bomba, pois o vaso saturador encontra-se pressurizado e com o tempo acaba reduzindo a vida útil destas peças.

Já o desacionamento sem rampa de desaceleração por sua vez permite o retorno de ar do vaso para a linha de recalque da bomba antes que a válvula de retenção V06 bloqueie o contra-fluxo, desafogando a bomba P01. Por estas razões, o inversor de frequência da bomba P01 foi configurado com rampas lineares de aceleração e de desaceleração de 10 s na sua faixa de operação.

A bomba P02 é uma bomba centrífuga com motor trifásico de 1/2 hp, dedicada ao bombeamento de efluente do reservatório TQ06 para o floculador da planta de FAD.

A bomba P03 é de diafragma, também com motor trifásico de 1/2 hp, que foi instalada para bombear parte do efluente floculado para o vaso saturador apenas durante os modos de operação pressurização total e parcial. As bombas P01, P02 e P03 são apresentadas na Figura 31.



Figura 31 – Bombas P01, P02 e P03.

As bombas P04 e P05 são bombas peristálticas que dosam a adição de aluminato de sódio e de biopolieletrólito na etapa de floculação, respectivamente. Acionada por PWM, a bomba P04 tem a largura dos pulsos de sua alimentação elétrica modulada proporcionalmente ao sinal de 4 a 20 mA recebido do CLP, permitindo o ajuste da vazão de tanino no floculador.

Já a bomba P05 tem a largura dos pulsos modulada por um PWM com potenciômetro manual ajustado para uma vazão constante de solução de $NaAlO_2$. O módulo com as bombas P04 e P05 e seus respectivos PWMs é mostrado na Figura 32.

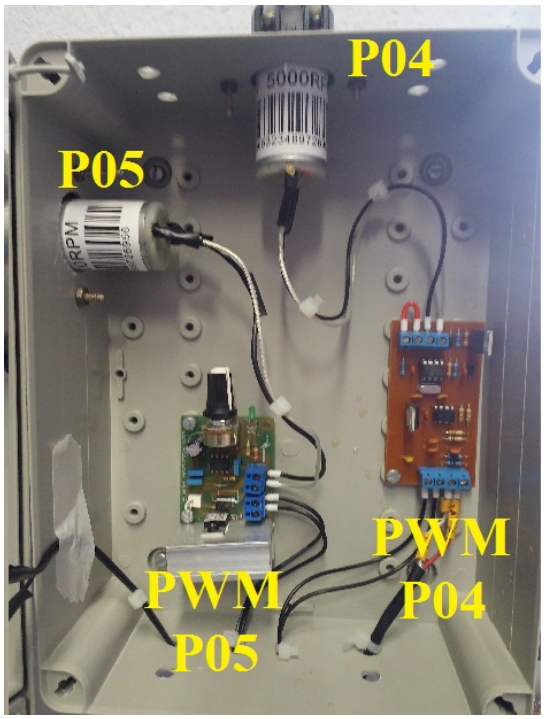


Figura 32 – Bombas P04 e P05 e seus respectivos PWMs.

Por fim, foi também instalada uma válvula reguladora de pressão que possui range de 0 a 10 bar, alimentação 24 Vcc e sinal de instrumentação de 0 a 10 V. Esta válvula possui sistema de controle da pressão a jusante embarcado e interface homem-máquina (IHM) que permite o

ajuste deste sistema. Desta forma, foi instalada para regular a pressão no interior do vaso de saturação conforme o valor de referência enviado pelo CLP e utilizando ar comprimido a 8 bar proveniente da linha compartilhada de ar comprimido da Faculdade de Engenharia Química.

A montante da válvula reguladora de pressão foi instalada um válvula pneumática reguladora de fluxo com o intuito de limitar a vazão máxima de ar comprimido na linha, evitando assim variações bruscas de pressão no vaso saturador.

A Figura 33 mostra as válvulas reguladoras de pressão e de fluxo instaladas junto ao vaso saturador.

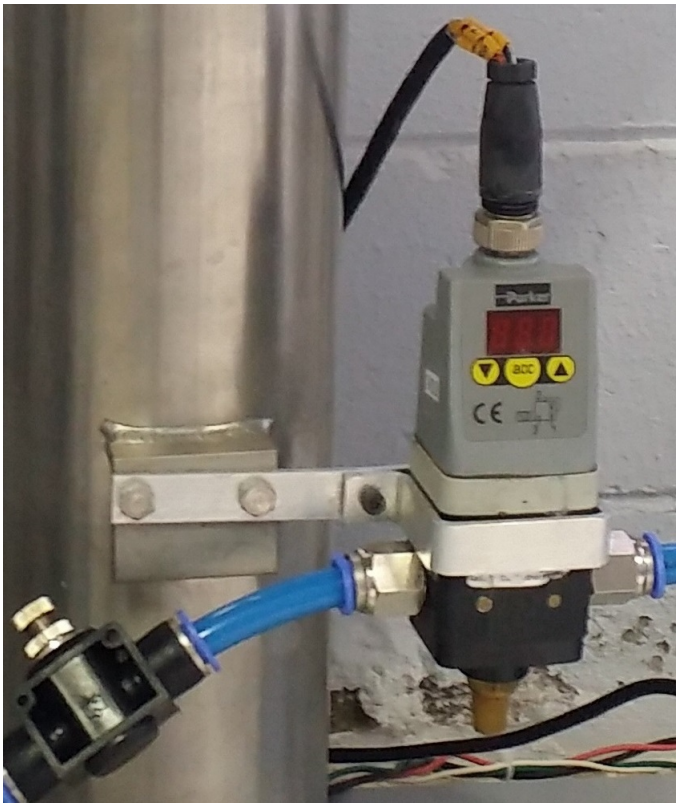


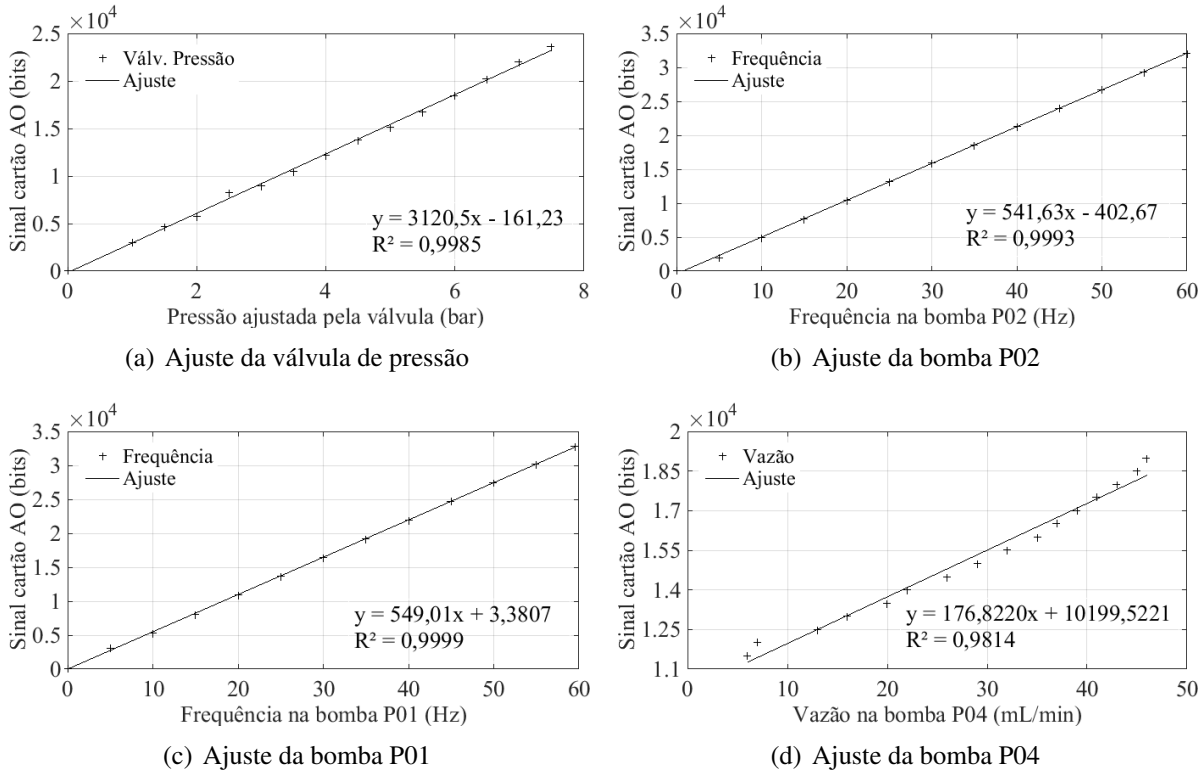
Figura 33 – Válvulas reguladoras de pressão e de fluxo do vaso saturador.

4.2.2.1 Dados de ajuste dos atuadores

Para acionamento das bombas e da válvula reguladora de pressão foram utilizados os cartões X20 AO4622 do CLP, mas para isso foi realizado ajuste do sinal digital enviado ao conversor analógico-digital (A/D) do cartão com a saída em variável de engenharia no atuador, conforme descrito na seção 3.1.3.

Os dados e equações estabelecidas pelo ajuste dos atuadores do protótipo de FAD que foram implementadas para a correlação destas variáveis seguem apresentados na Figura 34.

Para o motor de passo não foi preciso realizar ajuste uma vez que seu acionamento ocorre através do cartão de saídas digital X20 DO8323, conforme discutido anteriormente.



(a) Ajuste da válvula de pressão

(b) Ajuste da bomba P02

(c) Ajuste da bomba P01

(d) Ajuste da bomba P04

Figura 34 – Ajuste dos atuadores do sistema de FAD.

4.2.3 Sensores

Para a instrumentação do protótipo foram instalados diversos sensores que permitem a medição de variáveis importantes como pH, turbidez, pressão, vazões e nível.

Todos os sensores utilizados possuem transmissores de sinal de instrumentação no padrão 4 a 20 mA para se comunicar com o CLP.

O pH é uma medida importante na etapa de floculação para que ocorra a neutralização das cargas das partículas e inicie a sua coagulação e floculação, sendo afetado pela adição do biopolieletrólito com a bomba P04 e do aluminato de sódio com a bomba P05. Por isso, um pHmetro *online* foi instalado no protótipo para monitoramento desta variável no floculador.

O pHmetro possui além do sensor de imersão, um módulo transmissor com indicação local do pH, facilitando o acompanhamento desta variável localmente. A Figura 35 apresenta o pHmetro utilizado com sensor e módulo transmissor e indicador em destaque.

Outro sensor de extrema importância no protótipo de FAD é o turbidímetro *online* que mede a turbidez da água pós-flotador em *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU) na saída do flotador. O turbidímetro possui transmissor com sinal de 4 a 20 mA e IHM para configuração do sensor e indicação local da turbidez, sendo o *range* de leitura da turbidez configurável de 0 a 1000 NTU. Na planta de FAD, o *range* foi configurado para 0 a 100 NTU.

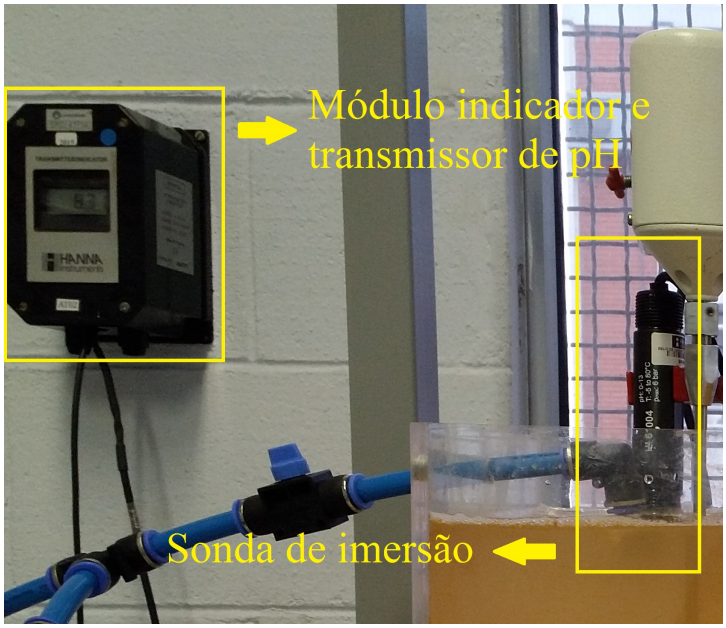


Figura 35 – Módulo indicador e transmissor de pH.

Além do turbidímetro *online*, um turbidímetro de bancada (*offline*) foi adquirido para viabilizar medições pontuais da turbidez nas diversas etapas do sistema de FAD. A Figura 36 mostra os turbidímetros *online* e *offline* utilizados.

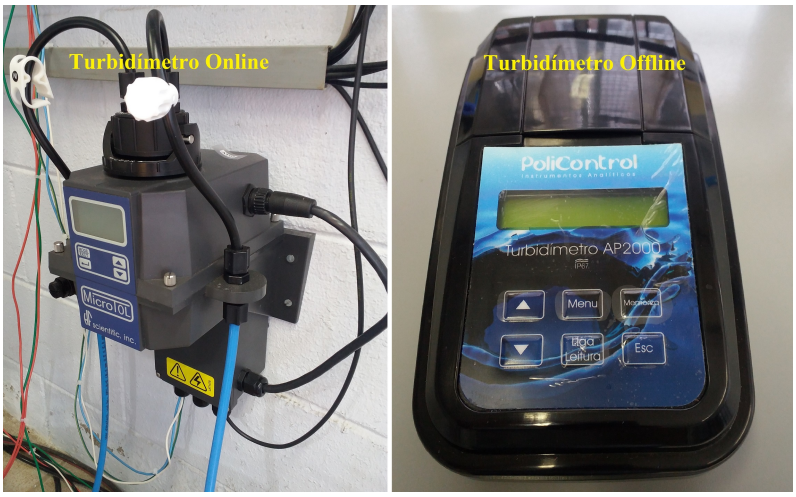


Figura 36 – Turbidímetros *online* e *offline* do sistema de FAD.

Quanto à medição da vazão de alimentação de efluente a ser tratado no sistema, foi instalado na linha de alimentação do floculador um medidor de vazão volumétrica tipo eletromagnético pelo fato do fluido conter material particulado.

O medidor possui tubulação de 1/2 in e *range* de medição de velocidade de escoamento de 0 a 10 $\mathrm{m/s}$, além de transmissor de sinal 4 a 20 mA e IHM para sua configuração e indicação local da vazão.

Outra variável importante é a vazão de alimentação do flotador com água saturada e micro-bolhas, que permite calcular a razão de refluxo ou reciclo do sistema (F_r).

No modo de operação por *reciclo*, apenas água clarificada e ar comprimido são alimentados no vaso saturador e a água saturada que escoa do vaso saturador para o flotador tem sua vazão medida na linha de saída do vaso.

O medidor empregado foi um tipo turbina simples com *range* de 50 a 500 $\mathrm{mL/min}$, com transmissor cego e sinal de instrumentação de 4 a 20 mA.

Nos modos de operação por pressurização total e parcial, em que o vaso saturador também é alimentado com efluente floculado, a vazão na saída do vaso é superior e para tal foi disponibilizado para trabalhos futuros um medidor de vazão tipo turbina pelton com *range* de 380 a 13250 $\mathrm{mL/min}$, também com transmissor cego de 4 a 20 mA.

A Figura 37 apresenta os medidores de vazão instalados na planta de FAD.



Figura 37 – Medidores de vazão empregados no protótipo de FAD.

No vaso saturador é preciso medir sua pressão interna e para isso foi instalado um transmissor cego de pressão manométrica tipo piezoresistivo com sinal de instrumentação de 4 a 20 mA e *range* de 0 a 20 bar.

Já para medir o nível de líquido dentro do vaso saturador foi utilizado um transmissor cego de pressão diferencial com *range* de 0 a 100 mbar, a partir do qual foi inferido linearmente o nível na faixa de 0 a 100 %.

Por fim, um medidor de temperatura tipo Pt-100 com transmissor Tx-Block® configurado para a faixa de 0 a 100 $^{\circ}\mathrm{C}$, com sinal de 4 a 20 mA, foi instalado no vaso saturador para medir a temperatura da água saturada, uma vez que a temperatura interfere diretamente na solubilidade do ar na água.

A Figura 38 mostra os transmissores de pressão e temperatura descritos acima e instalados no vaso saturador.

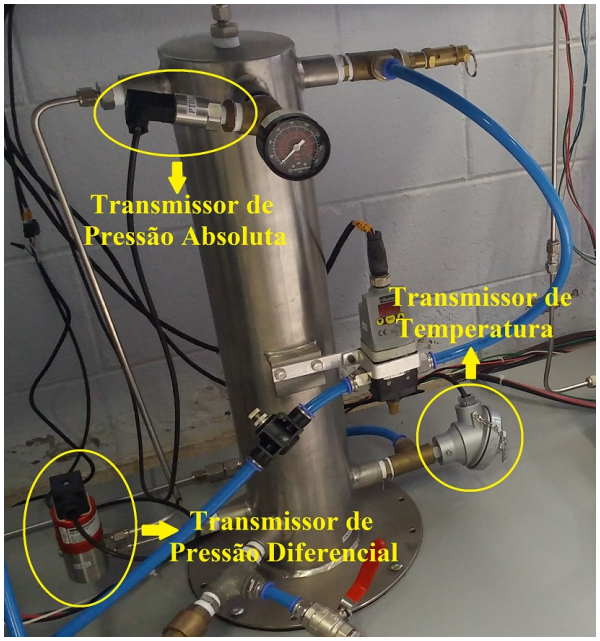


Figura 38 – Transmissores de temperatura, pressão absoluta e pressão diferencial.

Outro sensor importante no desenvolvimento deste projeto é o transdutor de potência ativa que mede o consumo instantâneo de energia ativa de todo o protótipo de FAD em kW. O transdutor de potência possui *range* de 0 a 3000 kW com sinal de instrumentação de 4 a 20 mA, já calibrado de fábrica, não necessitando parametrização. Este instrumento foi alocado no quadro de comando para sua proteção contra choques e segue representado na Figura 39.

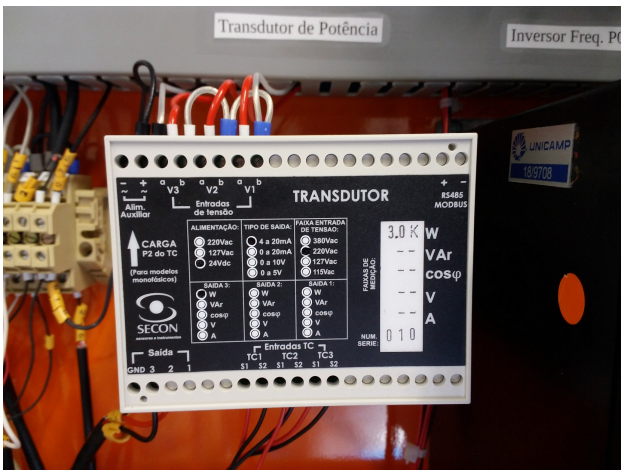


Figura 39 – Transdutor de potência ativa.

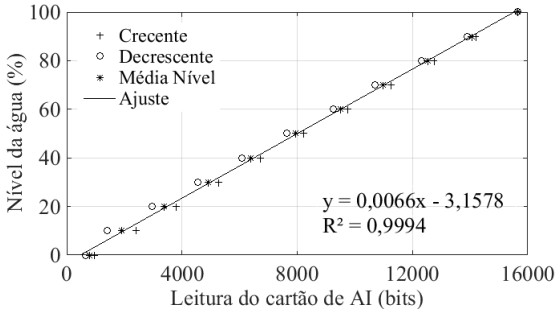
4.2.3.1 Dados de calibração dos sensores

Para a correta leitura das variáveis do protótipo de FAD, foram feitas calibrações dos valores em variável de engenharia para leitura em sinal digital após os conversores analógico/digital (A/O) dos cartões de entrada do CLP.

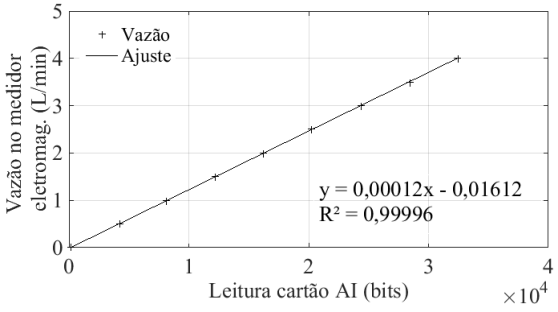
As leituras das vazões de efluente a ser tratado e água saturada, potência ativa instantânea, temperatura e nível de líquido no vaso foram realizadas no cartão X20 AI8321 do CLP, enquanto que as leituras de pH, turbidez da água pós-flotador e pressão no vaso saturador foram feitas no cartão X20 AI4622, conforme apresentado no mapa de endereçamento das I/O's no Apêndice F.

A calibração de todos os sensores foram realizadas com o auxílio de medidores de referência como rotâmetros, termômetros, manômetros e padrões de referência de turbidez e pH, conforme descrito na seção 3.1.4.

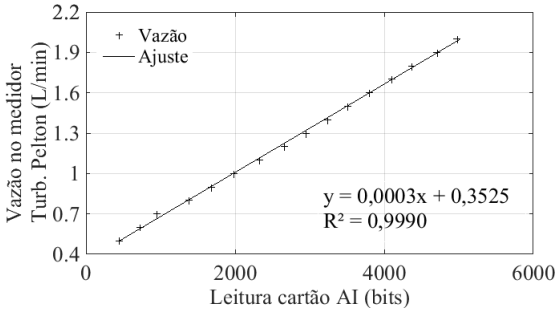
Os dados e equações de calibração das variáveis de leitura do cartão X20 AI8321 seguem na Figura 40, e das variáveis de leitura do cartão X20 AI4622 apresentados na Figura 41.



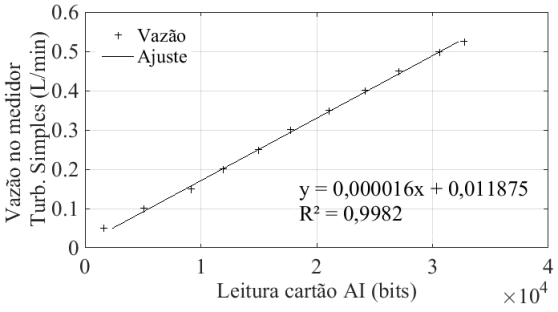
(a) Calibração do nível



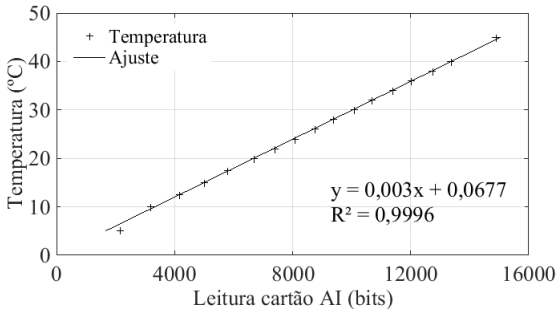
(b) Calibração da vazão (Medidor Eletromagnético)



(c) Calibração da vazão (Medidor Turbina Pelton)

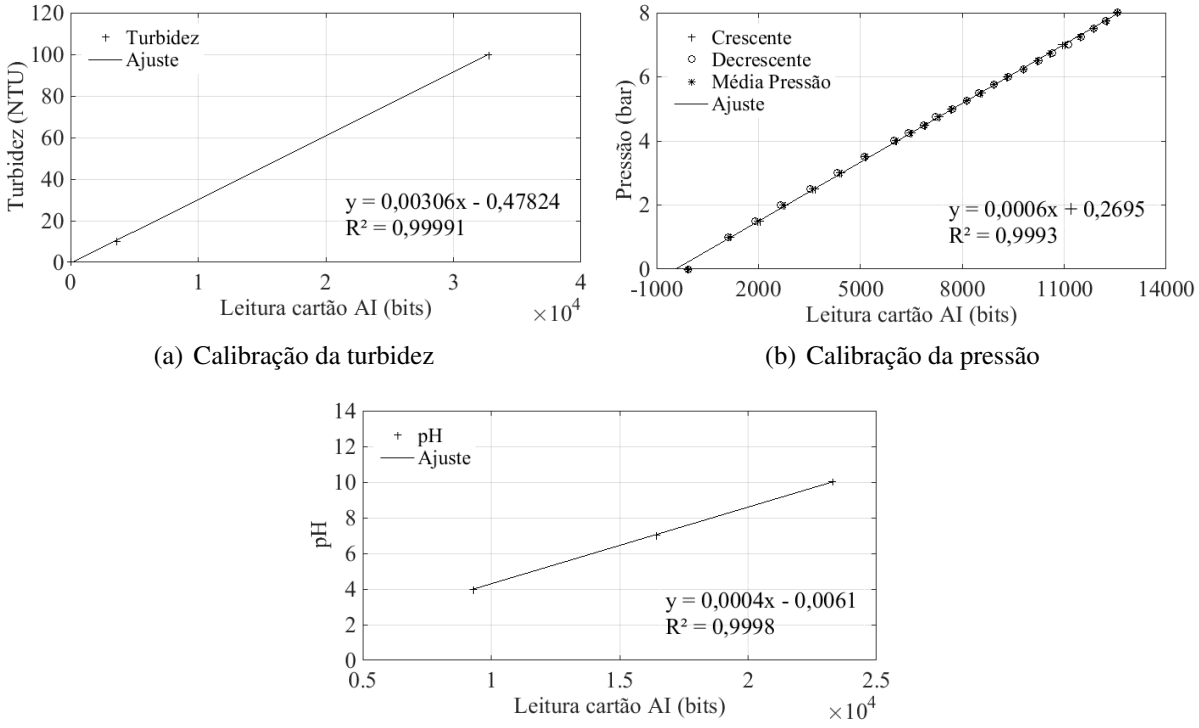


(d) Calibração da vazão (Medidor Turbina Simples)



(e) Calibração da temperatura

Figura 40 – Calibração dos sensores conectados ao cartão AI8321.



(a) Calibração da turbidez

(b) Calibração da pressão

(c) Calibração do pH

Figura 41 – Calibração dos sensores conectados ao cartão AI4622.

4.2.4 SCADA

Uma das etapas de automação da planta de FAD para permitir o seu monitoramento foi o desenvolvimento do sistema supervisório e de aquisição de dados da planta. Para a realização desta etapa foi utilizado o *software* Indusoft® que é dedicado ao desenvolvimento de SCADA para processos industriais.

4.2.4.1 Telas de supervisão

O SCADA foi desenvolvido com o propósito de tornar fácil e intuitiva a operação do protótipo, por isso as telas de navegação/supervisão foram projetadas para permitir ao operador conseguir visualizar o processo tanto de forma geral como específica.

Na Figura 42 é apresentada a tela principal de navegação do supervisório, onde é possível compreender todas as etapas do processo. Na tela principal são apresentadas algumas notificações de alarmes, estado de acionamento de alguns atuadores, além dos valores de todas as variáveis de processo e das manipuladas, como por exemplo a turbidez da água pós-flotador e a frequência de rotação da bomba de engrenagens.

Na tela principal foi disponibilizado um botão com a função de alterar o usuário ativo para outro usuário cadastrado, os quais podem ter diferentes níveis de acesso, para realizar alterações na configuração do SCADA, como alterar valores de *setpoint*, ou mesmo mudar o

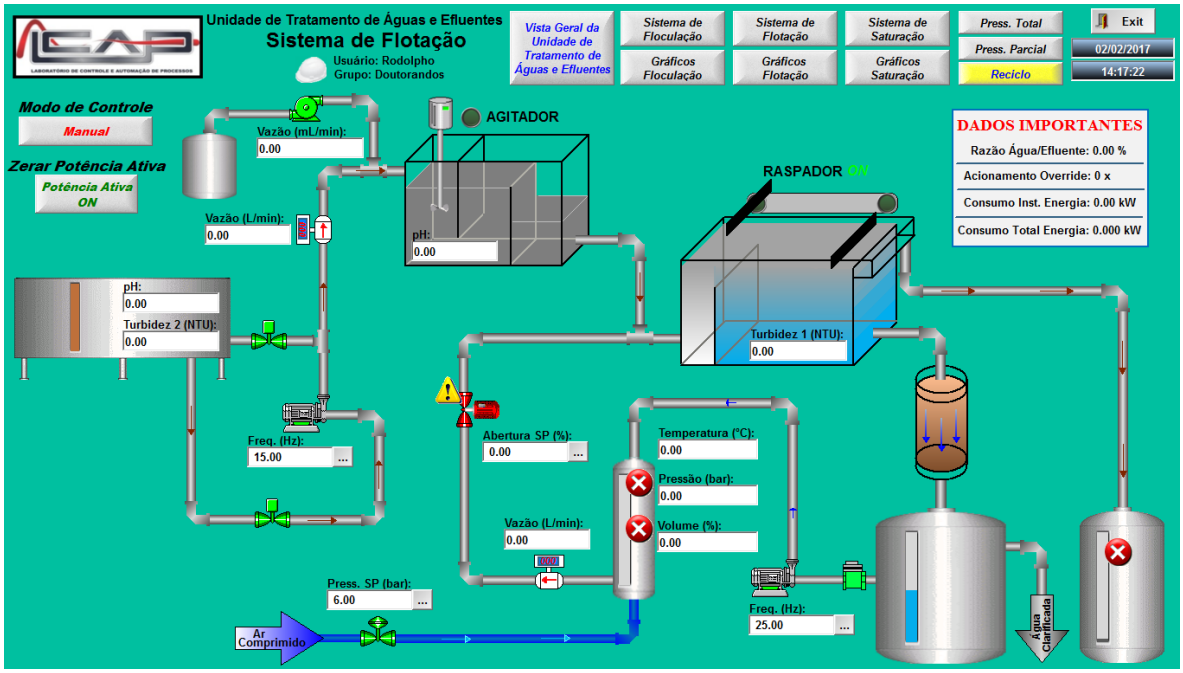


Figura 42 – Tela de navegação principal do sistema SCADA da planta de FAD.

modo de operação. Foram criados os grupos de acesso *"Pós-graduação"* com acesso total à configuração do SCADA e *"Iniciação científica"* com acesso apenas operacional ao protótipo.

Tanto na tela principal como nas telas secundárias, foram configurados objetos com função de entrada e saída de valores para a manipulação dos atuadores em malha aberta e/ou configuração dos *setpoints* das variáveis de processo em malha fechada.

As telas secundárias de navegação do supervisório detalham etapas específicas da planta de FAD, como a saturação de ar na água clarificada no vaso TQ05, apresentada na Figura 43.

Às telas secundárias foi atribuído maior detalhamento quanto ao comportamento dinâmico do processo, usando gráficos de tendência que apresentam o histórico recente dos valores das variáveis de processo específicas da etapa apresentada na tela. Na Figura 43, por exemplo, é possível verificar os comportamentos dinâmicos da pressão e do nível de água do vaso saturador nos últimos 30 min de experimento.

Os dados apresentados nos gráficos de tendência são aquisitados pelo SCADA e armazenados em tempo real em um banco de dados com formato *.mds* previamente configurado no sistema supervisório, de modo que após os experimentos é possível analisar o comportamento dinâmico das variáveis manipuladas e de processo da planta de FAD.

A taxa de aquisição dos dados para armazenamento no banco de dados foi configurada para 1 s, permitindo a visualização do comportamento do processo sem perda do comportamento dinâmico das variáveis.

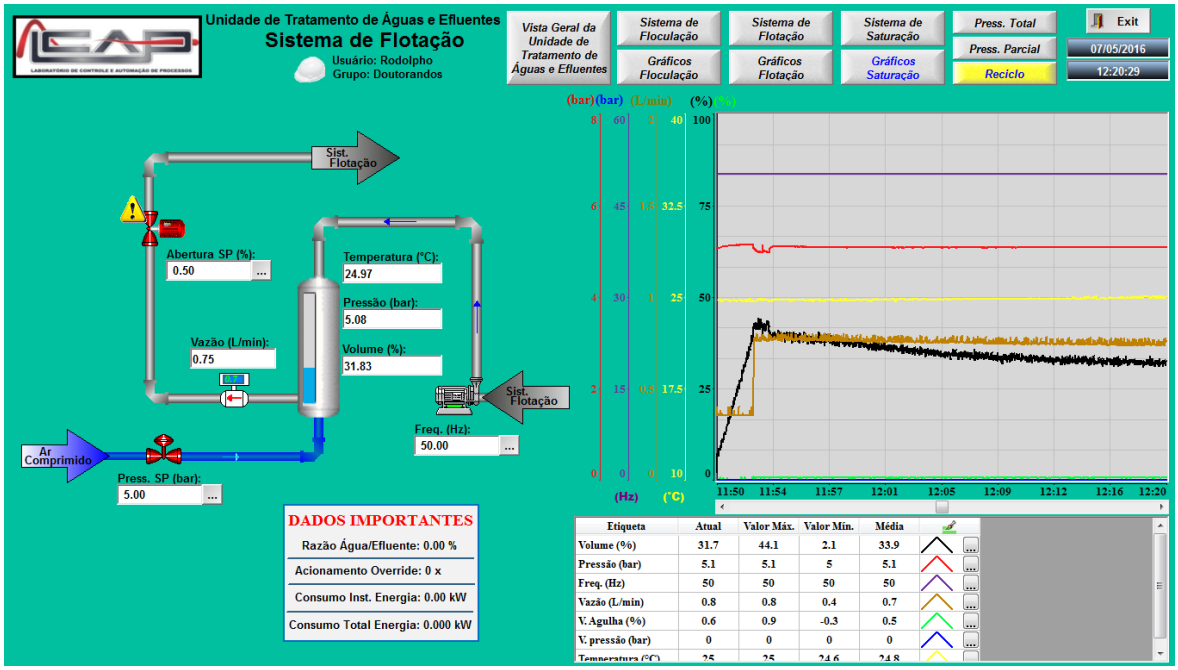


Figura 43 – Tela de navegação secundária do sistema SCADA da planta de FAD, para visualização do vaso saturador e suas variáveis de processo.

Para cada etapa do protótipo de FAD foram desenvolvidas duas telas secundárias, uma com gráficos de tendência como já descrito anteriormente e outra com listas de alarmes ativos específicos da etapa, como a apresentada na Figura 44 para a tela de detalhamento de etapa de flotação.

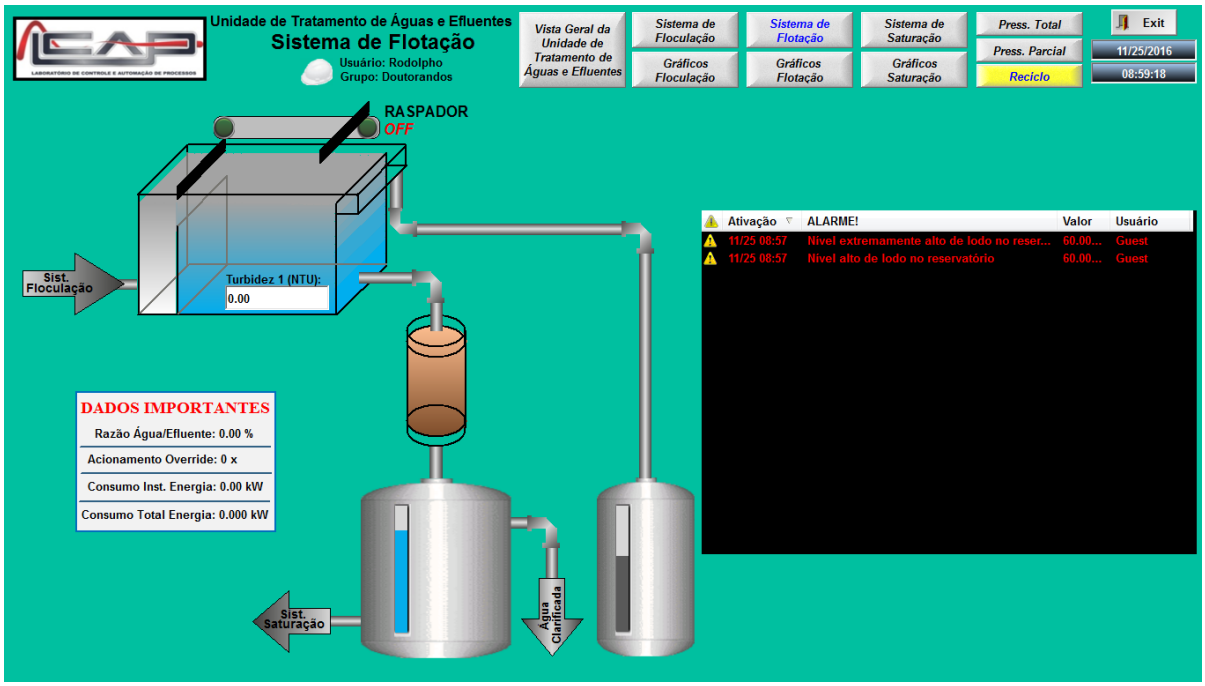


Figura 44 – Tela de navegação secundária do sistema SCADA da planta de FAD, para visualização do flotador e suas variáveis de processo.

Os alarmes são extremamente importantes na supervisão de um processo, pois auxiliam de forma preventiva no monitoramento do processo contra possíveis condições inseguras de operação (DE MORAES; CASTRUCCI, 2015).

A Tabela 4 apresenta os alarmes configurados no SCADA da planta de FAD, classificando-os pelos valores de ativação (limites), níveis de prioridade na hierarquização dos alarmes e tipos (*High High* para limite extremamente alto, *High* para limite alto, *Low* para limite baixo e *Low Low* para limite extremamente baixo da variável de alarme).

Tabela 4 – Lista de alarmes da planta de FAD.

Alarme	Tipo	Limite	Prioridade
Pressão do saturador extremamente alta	*High High*	7,4 bar	1
Pressão do vaso saturador alta	*High*	7 bar	2
Pressão do vaso saturador baixa	*Low*	4 bar	2
Pressão do vaso saturador extremamente baixa	*Low Low*	2,5 bar	1
Vazão de transbordo do floculador	*High High*	3,8 $\mathrm{L/min}$	6
Vazão máxima de segurança do efluente	*High*	3,5 $\mathrm{L/min}$	5
Nível de água no saturador extremamente alto	*High High*	85 %	3
Nível de água no saturador alto	*High*	62 %	4
Nível de água no saturador baixo	*Low*	18 %	4
Nível de água no saturador extremamente baixo	*Low Low*	10 %	3
Válvula agulha totalmente aberta	*High High*	99,5 %	3
Válvula agulha praticamente fechada	*Low Low*	1,5 %	3
Vazão de água saturada extremamente alta	*High High*	0,48 $\mathrm{L/min}$	5
Vazão de água saturada alta	*High*	0,4 $\mathrm{L/min}$	5
Vazão de água saturada baixa	*Low*	0,15 $\mathrm{L/min}$	6
Vazão de água saturada extremamente baixa	*Low Low*	0,07 $\mathrm{L/min}$	5
Acionamento *override* para pressão alta	*High High*	-	1
Acionamento *override* para pressão baixa	*Low Low*	-	1
Acionamento *override* para vazão de reciclo alta	*High High*	-	1

Na forma de cabeçalho do SCADA, foram inseridos botões para navegação entre as telas secundárias e principal, como também botões para alteração entre os possíveis modo de operação da planta, botão de encerramento do SCADA e informação de data e hora.

4.2.4.2 Comunicação entre CLP, SCADA e MatLab®

Na automação do protótipo de FAD foi preciso realizar a comunicação entre três componentes, o CLP que faz fisicamente o acionamento dos atuadores e leitura dos sensores, o SCADA que possibilita o monitoramento em tempo real do protótipo e o *software* MatLab®, no qual foram desenvolvidas as estratégias de controle em *override* e da turbidez com lógica *Fuzzy*.

Para a comunicação entre a estação de monitoramento e o CLP foi utilizado protocolo Ethernet TCP/IP porque é de simples configuração, possui confiabilidade na troca de dados e o controlador X20 CP1585 suporta este protocolo.

Na configuração do CLP foi habilitado um servidor *Open Plataform of Communication* (OPC®) com a declaração de todas as variáveis de leitura e escrita utilizadas no programa de aplicação. OPC® é uma plataforma baseada na tecnologia *Object Link Embendding - OLE* de comunicação entre *softwares* que são configurados como servidor, que gerencia a comunicação e o tráfego de dados, ou clientes que são usuários dos dados compartilhados (DE ALBUQUERQUE; DE ALEXANDRIA, 2007).

No computador utilizado como estação de monitoramento do processo e onde é executado o SCADA e o MatLab®, foi necessário instalar um pacote de *softwares* do Automation Studio®, desenvolvido pelo mesmo fabricante do CLP utilizado na planta, que permite o enlace na comunicação entre o servidor OPC® do CLP com o cliente OPC® do MatLab®. Por sua vez o SCADA também foi configurado como servidor OPC® para comunicação com o cliente MatLab®, e portanto permitir o fluxo de dados do CLP até o SCADA e vice-versa.

Assim, utilizando o endereço de IP atribuído ao CLP na rede Ethernet, foi estabelecida a comunicação com a estação de monitoramento com uma taxa de atualização igual a 1 s.

Antes de realizar os experimentos que avaliaram as diferentes estratégias de controle aplicadas à FAD, foi preciso tratar os sinais de leitura de algumas variáveis para remover ruídos, conforme será discutido na seção a seguir.

4.3 Filtros de sinais

Na leitura de sinais analógicos normalmente se faz necessário o uso de filtros que removam ruídos na leitura causados por interferência eletromagnética, por exemplo. Os cartões de entrada analógica modelos X20 AI8321 e X20 AI4622 possuem um filtro configurável pré-instalado para o sinal digital convertido do analógico, conforme apresentado pela Equação 4.1.

$$x_k = x_{k-1} - \frac{x_{k-1}}{N} + \frac{y_k}{N} \tag{4.1}$$

Neste filtro, o valor de entrada y_k é filtrado para o valor x_k com base em seu valor anterior x_{k-1} e no nível configurado para o filtro (N). Quanto maior o valor do nível, mais amortizado é o efeito do ruído na leitura da variável analógica, entretanto mais atrasada fica a leitura do sinal. Em ambos os cartões X20 AI8321 e X20 AI4622 foi selecionado um nível com valor igual a 8, dentre os níveis pré-configurados no cartão. Com esse valor, já se tem um ganho e se evita o atraso indesejável na leitura da variável causado por filtros de ordem mais alta.

Entretanto, para algumas variáveis analógicas da planta de FAD, o filtro do cartão analógico é insuficiente para a remoção dos ruídos, requerendo um tratamento maior do sinal. Foi verificada a necessidade de se aplicar filtros digitais mais eficientes para as leituras de pH, vazões de efluente e linha de reciclo, nível de líquido no vaso saturador e da turbidez da água pós-flotador.

A leitura do pH se mostrou fortemente afetada por ruídos de alta frequência, provavelmente devido à interferência eletromagnética dos equipamentos do protótipo de FAD, como inversores de frequência (discutidos na seção 4.2.2). Neste caso, foi utilizado o filtro digital proposto por Seborg (2004) e apresentado na Equação 4.2, em que o sinal filtrado x_k no instante k é obtido através de uma média móvel da entrada y_k com base nos últimos L valores da variável.

$$x_k = y_k \times \frac{1}{L} \times \frac{Z^L - 1}{Z^L - Z^{L-1}} \tag{4.2}$$

Para as leituras do nível de água no vaso e de vazões de efluente e de reciclo também foram necessários filtros como o apresentado na Equação 4.2. Desta forma, foram testados diferentes valores de L para os filtros destas variáveis, conforme apresentado no Apêndice H.

A análise do tratamento do sinal de pH com diferentes valores de L permitiu concluir que um valor igual a 35 era mais indicado, pois apresentava a melhor remoção de ruído da leitura desta variável, sem que houvesse perda do comportamento dinâmico por atraso no sinal. Com este valor de L, o filtro empregou os últimos 35 valores de leitura do pH para calcular x_k.

A comparação entre o sinal pré e pós tratamento para a variável pH com este filtro está representada na Figura 45, o que permite verificar a melhoria significativa na leitura do pH com tratamento do sinal utilizando o filtro digital.

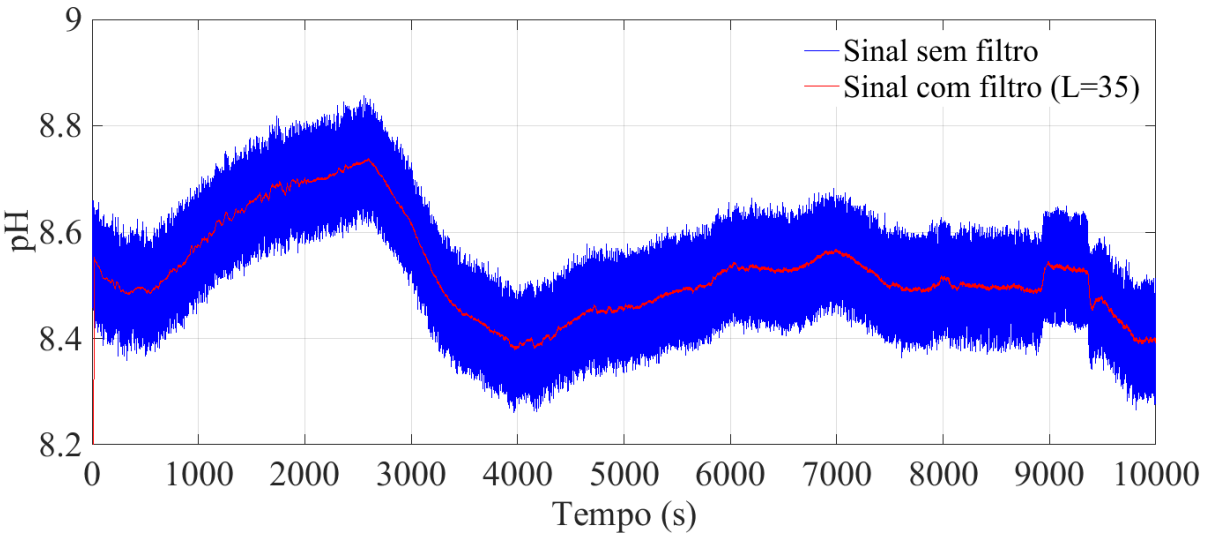


Figura 45 – Aplicação de filtro digital no sinal de pH.

As leituras de vazões são normalmente ruidosas por diversos motivos relacionados ao escoamento do fluido, e por isso é comum tratar seu sinal de leitura também com o uso de filtros digitais.

Tanto para as leituras da vazão de efluente (Q_t) pelo medidor eletromagnético como para a da vazão de reciclo (Q_r) com o medidor tipo turbina foi empregado o filtro da Equação 4.2, porém com diferentes valores de L.

Para o filtro de Q_t foi verificado que com valores de L iguais a 40 e 35 era possível reduzir mais os efeitos do ruído do que empregando L igual a 30. Porém, como a diferença entre os desempenhos dos filtro com L igual a 35 e 40 era mínima, optou-se por utilizar o valor 35, pois filtros de menor ordem geram menor atraso no sinal de leitura (OGUNNAIKE; RAY, 1994).

Para Q_r também foi verificado que com valores de L iguais a 25 e 20, os ruídos eram melhor removidos do sinal em comparação ao valor de L igual a 15, tendo sido escolhido o valor de 20 pelos mesmos motivos expostos acima.

As Figuras 46 e 47 apresentam os sinais de vazão de efluente e reciclo com e sem a utilização dos filtros digitais, respectivamente.

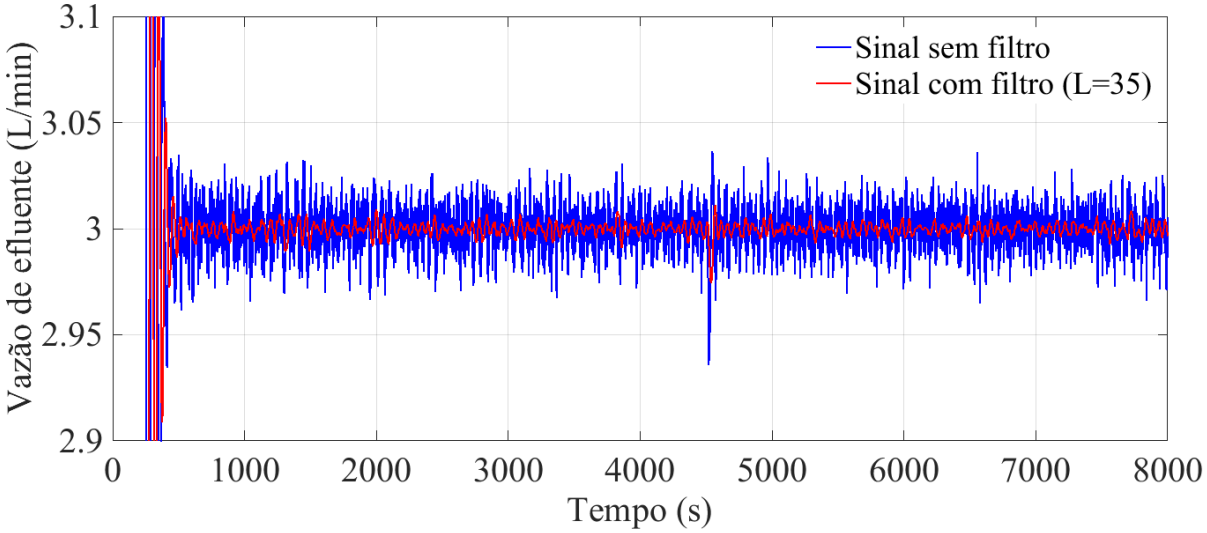


Figura 46 – Aplicação do filtro digital no sinal de Q_t.

É importante notar que não houve apenas um ganho na leitura destas variáveis com o tratamento do sinal, mas também no cálculo da fração de reciclo F_r, já que é baseada nas medições de ambas vazões conforme a Equação 2.8. A Figura 48 mostra esta melhoria no cálculo de F_r com o tratamento dos sinais de Q_t e Q_r.

A leitura do nível de líquido no vaso saturador por sua vez é afetada pela turbulência na superfície do líquido provocada por características construtivas do vaso. Para esta variável também foi empregado o filtro digital apresentado na Equação 4.2, tendo sido avaliados valores de L de 15 a 25, conforme apresentado no Apêndice H.

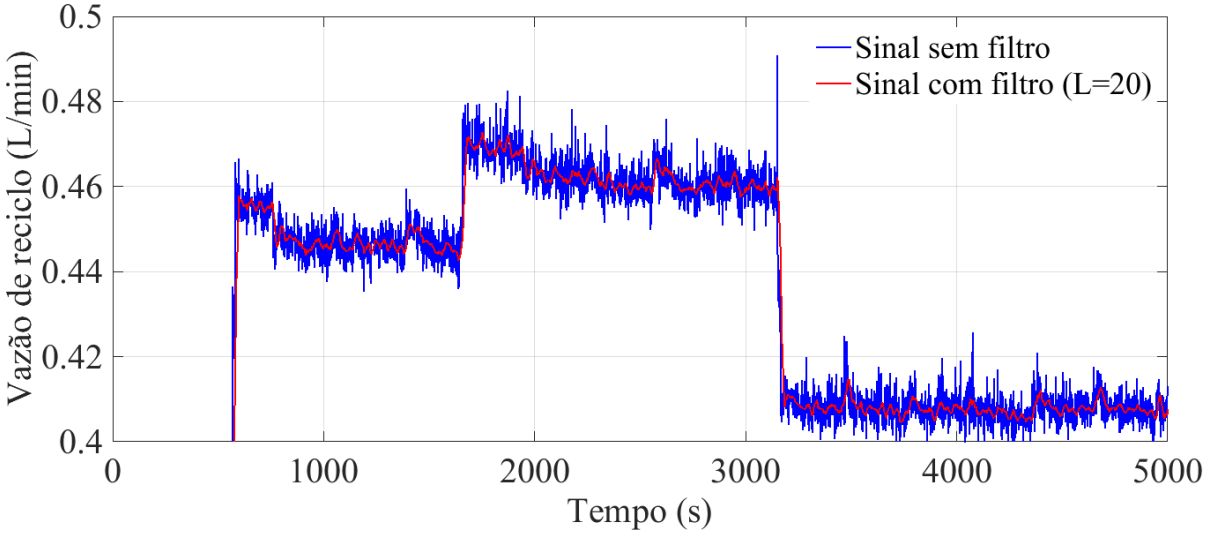


Figura 47 – Aplicação do filtro digital no sinal de Q_r.

Para o filtro da leitura do nível do vaso foi escolhido um valor de L igual a 20, pois em comparação com valor igual a 15, houve melhor remoção dos ruídos e, com valor de 25, a diferença na performance foi mínima. Desta forma, como já mencionado, para minimizar atrasos que filtros de elevada ordem causam nas leituras, foi escolhido o filtro com L igual a 20.

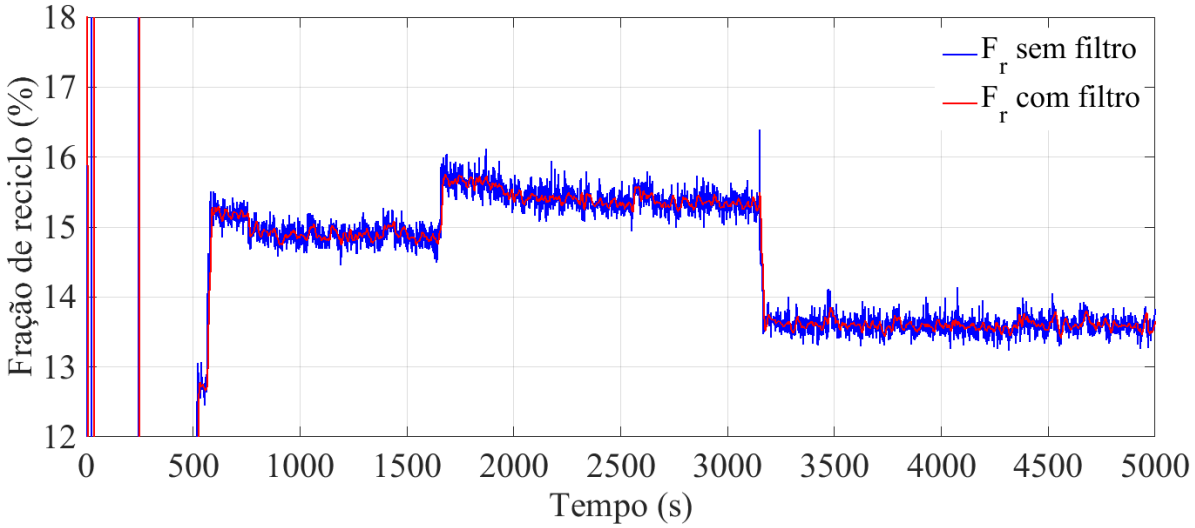


Figura 48 – Melhoria no cálculo de F_r com o uso de filtros nas leituras de Q_t e Q_r.

A comparação entre os sinais filtrado e não filtrado para o nível de líquido é apresentada na Figura 49, evidenciando a melhoria obtida com o tratamento do sinal.

Já a leitura da turbidez da água pós-flotador é afetada por picos intermitentes provocados possivelmente pelo sistema de auto-limpeza por ultrassom do turbidímetro *online*, ou mesmo por flocos que entram na câmara de leitura da turbidez e por alguns instantes causam um pico na leitura. Estes picos de leitura são indesejáveis, podendo causar danos aos atuadores quando em malha fechada por gerar um elevado valor de erro, como também podem falsear a leitura

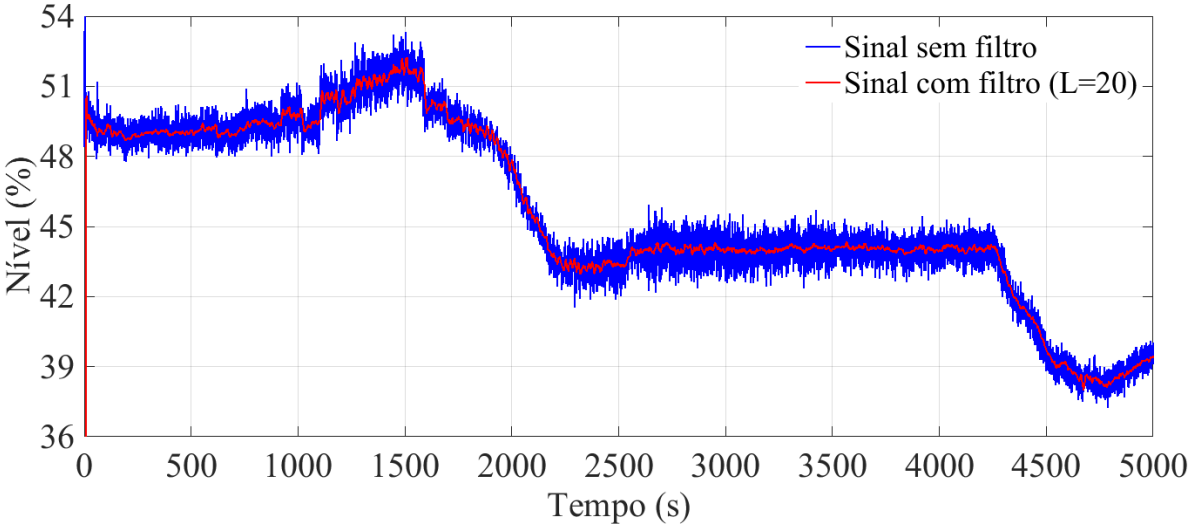


Figura 49 – Aplicação do filtro digital no sinal do nível.

da variável. Deste modo, para remover estes picos na leitura foi empregado um filtro específico denominado *Noise Spike Filter*, apresentado por Seborg (2004) e descrito na Equação 4.3.

$$x_k = \begin{cases} y_k & , \text{ se } |y_k - y_{k-1}| \leq \Delta y \\ x_{k-1} - \Delta y & , \text{ se } x_{k-1} - y_k > \Delta y \\ x_{k-1} + \Delta y & , \text{ se } x_{k-1} + y_k > \Delta y \end{cases} \tag{4.3}$$

A análise do efeito deste filtro sobre a leitura da variável permite verificar que, quando há variações maiores ou menores que a variação máxima permitida (Δy), ocorre uma supressão da variação lida por um cálculo baseado em Δy. Isso faz com que picos intermitentes sejam eliminados sem que ocorra grandes variações na variável de leitura.

Na leitura da turbidez, no *Noise Spike filter* foram testados diferentes valores de Δy, conforme apresentado no Apêndice H. Para uma variação máxima Δy igual a 0,1 NTU houve a maior redução do efeito do pico na leitura da turbidez, todavia o filtro afetou a leitura da variável pelo valor muito baixo de Δy em situações em que ocorreu variação natural da turbidez. Já com um valor de Δy igual a 0,2 NTU, houve melhor amortecimento do sinal em situação de picos na leitura do que quando utilizado o valor igual a 0,3 NTU.

Desta forma, foi escolhido o valor de 0,2 NTU para Δy no *Noise Spike Filter* empregado na leitura da turbidez. A comparação entre o sinal filtrado e o não filtrado da turbidez está representado na Figura 50, com ênfase a dois picos detectados.

É possível verificar que a presença do pico não afetou drasticamente a leitura da turbidez, o que é desejável, uma vez que a turbidez é a variável de processo de uma malha de controle e variações bruscas e repentinas podem provocar ações de controle extremas e danificar atuadores e sensores na planta FAD.

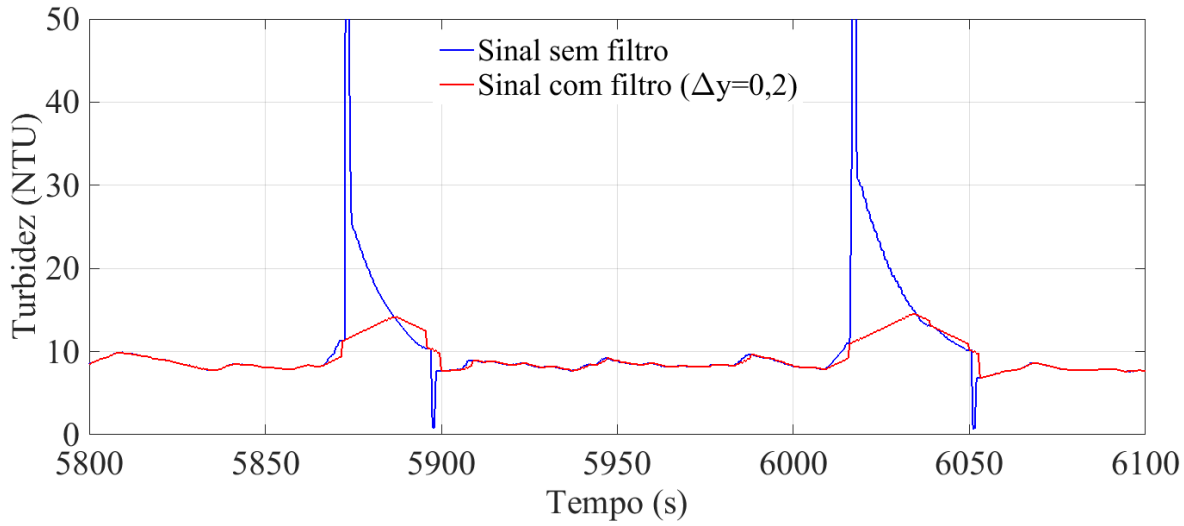


Figura 50 – Aplicação do *Noise Spike Filter* no sinal da turbidez.

4.4 Padronização do tratamento físico-químico do efluente

Os ensaios de *Jar Test* foram realizados com efluente preparado com terra vermelha para uma turbidez de aproximadamente 40 NTU, sendo utilizados 250 mL de efluente em cada teste. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos no *Jar Test*.

Tabela 5 – Resultados do *Jar Test* para efluente com turbidez inicial de aproximadamente 40 NTU.

Testes Nº		1	2	3	4	5	6	Duplicata 6
$NaAlO_2$ (1 % v/v)	(mL)	2,5	3	2	2	2,75	2,75	2,75
Tanino SG (5 % v/v)	(mL)	1,6	1,6	1,6	1,3	1,3	1,6	1,6
Turbidez Inicial	(NTU)	38,4	41,9	43	42,8	40,7	41,7	43,1
pH de Alcalinização	-	9,1	9,3	9,1	8,9	9,2	9,2	9,2
pH de Floculação	-	8	8	7,8	7,7	8,2	8,1	8,2
Turbidez Final	(NTU)	2,07	2,24	1,95	5,10	2,10	1,64	1,72
Redução Turbidez	(%)	94,61	94,65	88,14	94,56	94,84	96,07	96,01

Com os resultados do *Jar Test* verificou-se que era possível alcançar um elevado grau de remoção de turbidez, aproximadamente 96 % no teste Nº 6, com a adição de 2,75 mL de aluminato de sódio e de 1,6 mL de biopolieletrólito para cada 250 mL de efluente. Por isso, o teste Nº 6 foi duplicado e seus resultados confirmados, indicando que a dosagem testada no efluente com aproximadamente 40 NTU era a condição de floculação adequada, reduzindo para um pH de floculação aproximadamente igual a 8,1.

Nota-se pelos resultados do ensaio Nº3 que há uma perda de eficiência na remoção de turbidez do efluente quando é empregada uma dosagem em excesso de biopolieletrólito em relação ao $NaAlO_2$. Esse efeito foi também observado por Hameed *et al.* (2016), indicando que excesso de tanino na dosagem da floculação torna-o menos eficiente, conferindo turbidez ao efluente.

Assim, pelos resultados apresentados nos ensaios de *Jar Test*, foi determinada a dosagem de tanino e de aluminato de sódio iguais a 6,4 mL e 11 mL por litro de efluente, para um pH de floculação de aproximadamente 8,1, capaz de garantir que a floculação ocorra em condições que permitam a flotação do material particulado.

Com esta dosagem de agente coagulante e biopolieletrólito, durante os ensaios foi possível realizar a floculação e remover quase 100% da turbidez após a etapa de filtração na planta de FAD. Na Figura 51 são apresentadas alíquotas do efluente nas diferentes etapas da planta durante um dos ensaios realizados, mostrando a redução da turbidez do efluente.

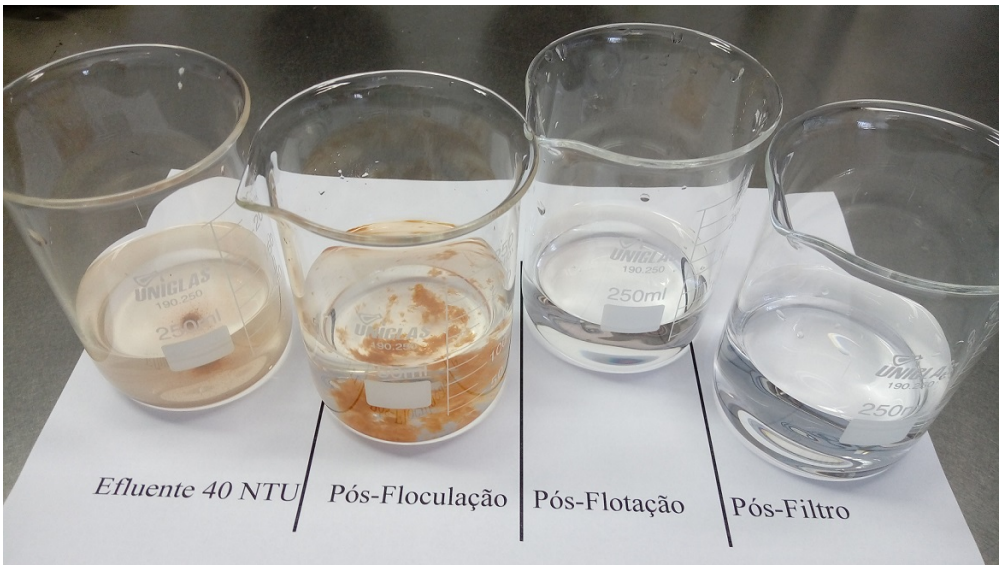


Figura 51 – Alíquotas do efluente nas diferentes etapas da planta de FAD.

4.5 Controle aplicado ao processo FAD

Este projeto visa preencher um lacuna existente na literatura quanto ao controle de processos de tratamento de águas por FAD, realizando sua automação e propondo estratégias de controle com o intuito de permitir uma boa regulação da turbidez da água pós-flotação.

Além de mecanismos de segurança do processo, como malhas de controle em *override*, controle de variáveis como a vazão de efluente foram implementados no protótipo conforme discutido na seção 3.3.

4.5.1 Controle da vazão de efluente

A vazão de alimentação de efluente na planta é manipulada pela frequência de rotação da bomba P02, que também realiza a homogeneização do efluente no TQ06.

Desta forma, foi utilizado um controlador PI com parâmetros sintonizados pelo método de Ziegler-Nichols (ZN) para controlar a vazão de efluente (Q_t), tendo sido feita a identificação do processo para um modelo tipo *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) por curva de resposta, conforme apresentado na Figura 52, para um *step* de 46,3 a 45,2 Hz.

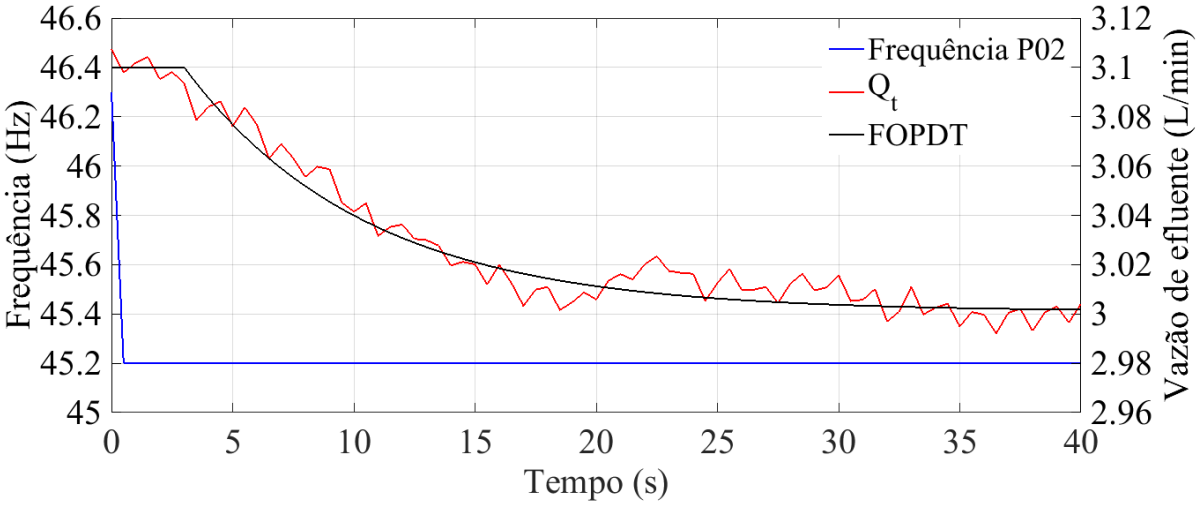


Figura 52 – Identificação da FOPDT para a vazão de efluente por curva de resposta.

A sintonia por Ziegler-Nichols do controlador PI da malha de controle da vazão de efluente e a re-sintonia de seus parâmetros encontram-se na Tabela 6, juntamente com os parâmetros da FOPDT identificada para a variação da vazão de efluente em função da frequência de rotação da bomba P02.

Foi necessário a re-sintonia dos parâmetros deste controlador PI, com redução do K_c para 10 $\mathrm{Hz/(L/min)}$ para que a bomba P02 apresentasse uma atuação mais suave.

Na Figura 53 é apresentada a malha de controle SISO com ação direta implementada no *software* MatLab® para regular Q_t. Na malha de controle de Q_t também foi configurada a possibilidade de operação em malha fechada ou malha aberta, sendo o acionamento realizado pela variável binária "Modo de Controle - MC" do SCADA.

O controlador PI para controlar Q_t foi configurado para proteção *anti-reset wind-up* com coeficiente de *tracking time constant* (τ_t) igual a 1,5 s; valor usualmente empregado e que melhora a resposta de controladores com ação integral, ao evitar a extrapolação do valor da ação de controle para além dos limites mínimo e máximo estabelecidos (OGUNNAIKE; RAY, 1994; SMITH; CORRIPIO, 2008).

Tabela 6 – Parâmetros do controlador PI e do modelo FOPDT para a vazão de efluente.

FOPDT		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_p	0,09	$[(\mathrm{L/min})/\mathrm{Hz}]$
τ_p	7,5	[s]
t_d	3	[s]
Controlador - ZN		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	22,5	$[\mathrm{Hz}/(\mathrm{L/min})]$
τ_i	10	[s]
Controlador - Re-Sintonia		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	10	$[\mathrm{Hz}/(\mathrm{L/min})]$
τ_i	10	[s]

Os valores de saturação estabelecidos para o sinal de controle foram 0 e 60, que referem-se aos limites da faixa de operação do atuador em Hz.

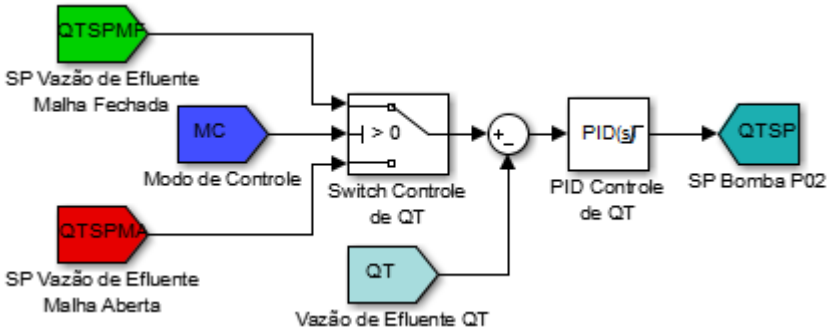


Figura 53 – Malha de controle da vazão de efluente.

4.5.2 Controle de posição da válvula agulha

A proposta de automação no controle da abertura e fechamento da válvula agulha foi mais complexa que a das demais variáveis de processo da planta de FAD por incorporar diversos dispositivos. O controle envolveu a lógica de acionamento implementada no MatLab® apresentada na Figura 54, assim como as lógicas de acionamento implementadas no CLP e no controlador do *driver* do motor de passo apresentadas nos Apêndices D e G, respectivamente.

No MatLab® foi proposta a lógica para acionar a abertura ou fechamento da válvula em função da diferença entre a posição atual da válvula e seu valor de *setpoint*, respeitando o *deadband* de +/- 15 passos para não superaquecer o motor, conforme detalhado anteriormente.

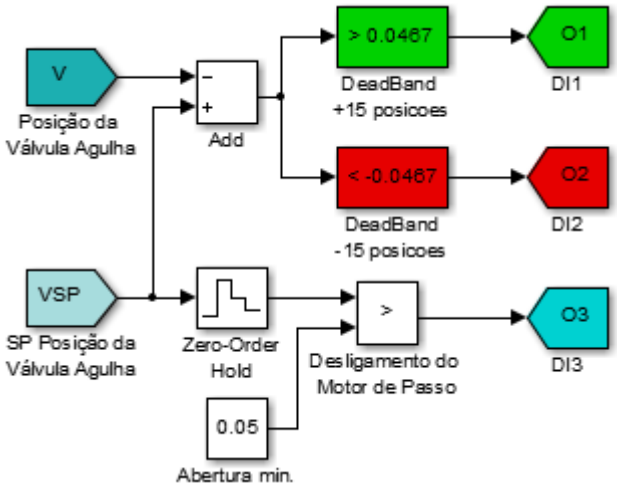


Figura 54 – Malha de controle da abertura e fechamento da válvula agulha.

Também foi incorporada lógica para energização do motor de passo quando o valor de *setpoint* da abertura da válvula é maior que o valor de abertura mínima, igual a 0,05%.

No CLP, a lógica fez o acionamento de abertura ou fechamento da válvula agulha através de suas saídas digitais associadas ao controlador do *driver* de acordo com os comandos recebidos pela lógica implementada no MatLab®, além de também registrar a posição atual da válvula pelas suas entradas digitais associadas ao controlador do *driver*.

Por fim, a lógica programada no controlador do *driver* permitiu o acionamento do MP para abertura ou fechamento da válvula agulha com base nos comandos do CLP, e o acionamento de suas saídas digitais ligadas ao cartão X20 DO8323 do CLP para indicar a realização completa do movimento solicitado ou fim de curso alcançado na abertura ou fechamento da válvula. A Figura 55 apresenta o esquema de acionamento do MP no controle da posição da válvula V01a.

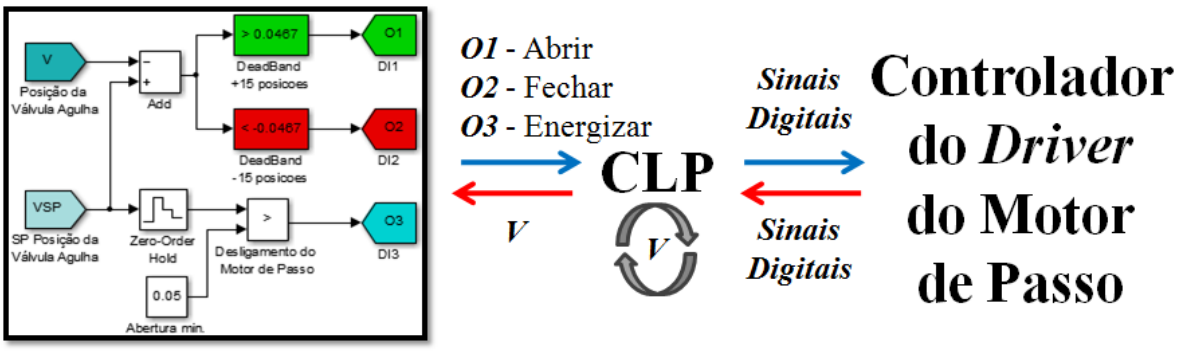


Figura 55 – Estratégia de acionamento do motor de passo.

4.5.3 Controle do nível de água no vaso saturador

Foi proposto um controle *ON/OFF* para o nível de líquido no vaso saturador conforme mostra a Figura 56. O chaveamento *ON/OFF* acionava a bomba P01 com frequência de

45 Hz quando o nível de líquido é menor ou igual a 20%, desligando-a somente quando o nível atinge 60%.

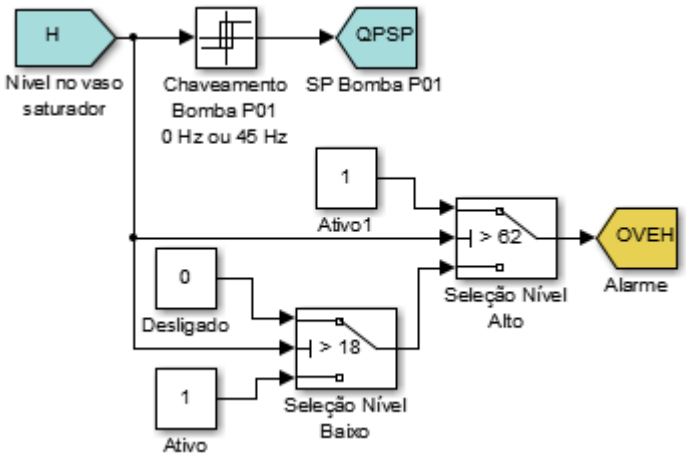


Figura 56 – Malha de controle do nível de água no vaso saturador.

É importante ressaltar que o inversor de frequência desta bomba de engrenagens foi configurado para operar com rampas de aceleração e desaceleração conforme discutido na seção 4.2.2.

Como a válvula agulha precisa estar parcialmente aberta para gerar micro-bolhas, o nível de água no vaso tende a diminuir quando P01 se encontra desligada e a aumentar quando se encontra ligada, pois a 45 Hz a vazão de bombeamento é superior à máxima vazão de reciclo permitida. Ou seja, o funcionamento de P01 foi cíclico durante o experimento. Além disto, a variação do nível de água no vaso permitiu a renovação da fase gasosa no vaso sendo uma vantagem neste sistema de flotação, conforme discutido na seção 3.3.3. Esta renovação do ar evitou o empobrecimento de oxigênio na fase gasosa que é mais solúvel em água que o nitrogênio, caso contrário, a qualidade das micro-bolhas seria comprometida.

4.5.4 Malhas em *override*

Os controladores PI das malhas em *override* foram configurados com parâmetros K_c e τ_i de modo que o controlador fosse capaz de corrigir a variável de processo para a faixa segura de operação, tendo sido empregados controladores PI ideais.

Conforme foi discutido na seção 2.3.2.2, na atuação dos controladores em malhas *override* não é necessária a eliminação de *offset* da variável de processo em relação ao *set-point* desta malha, e nem performance na atuação do controlador. Deste modo, os parâmetros K_c e τ_i foram estabelecidos de forma empírica.

4.5.4.1 Controle *override* da pressão no vaso saturador

A sobrepressão e a condição de baixa pressão no vaso saturador são situações indesejáveis na operação do protótipo de FAD, cujas razões foram detalhadas na seção 3.3.4.1.

Deste modo, as malhas em *override* para a pressão alta e baixa em TQ05 foram implementadas conforme o esquema apresentado na Figura 57.

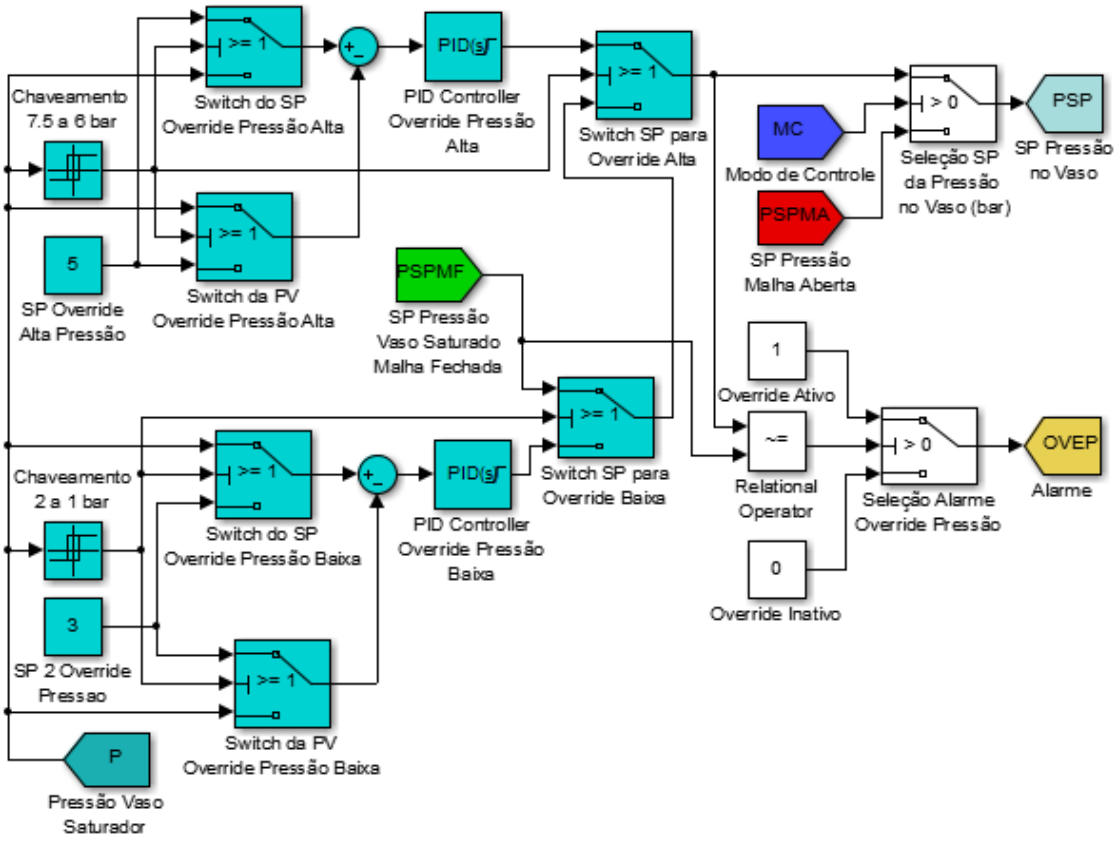


Figura 57 – Malhas em *override* para controle da pressão no vaso saturador.

É importante ressaltar que ambos controladores das malhas *override* de alta e de baixa pressão possuem recomposição do sinal de controle após ativação. Isto corroborou para a proteção dos atuadores ao evitar mudanças bruscas na variável manipulada durante as transições entre a malha de controle principal e a malha em *override*.

Os limites de segurança para operação da pressão no vaso foram estabelecidos em 7,5 e 1 bar para acionamento das malhas *override* de alta e baixa pressão, enquanto que os valores de desacionamento foram definidos em 6 e 2 bar, respectivamente.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros estabelecidos para os controladores das malhas em *override* para sobrepressão e baixa pressão do vaso saturador.

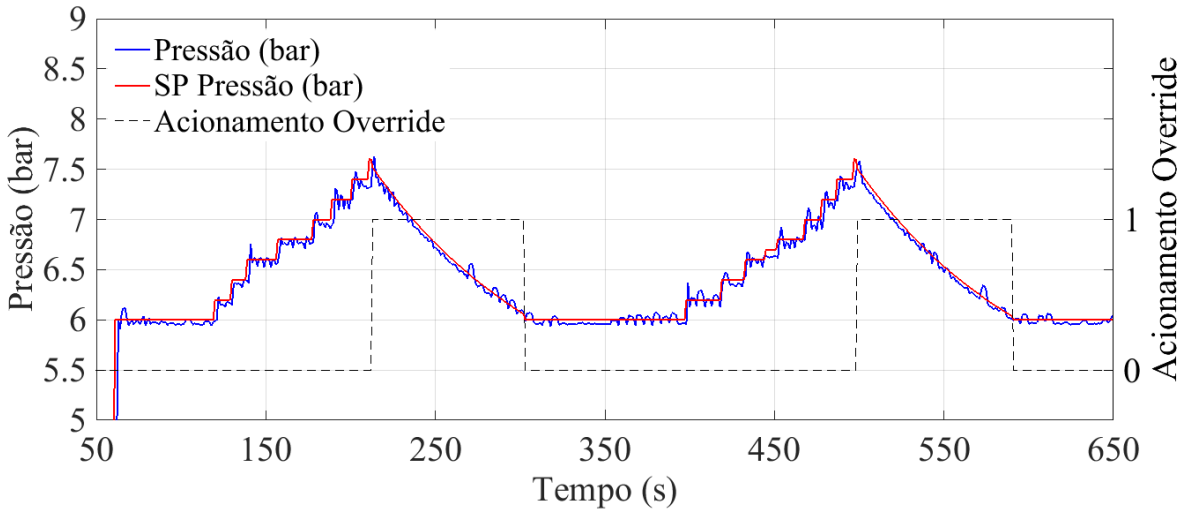
Tabela 7 – Parâmetro dos controladores PI das malhas *override* para pressões alta e baixa no saturador.

Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	0,02	[bar/bar]
τ_i	100	[s]

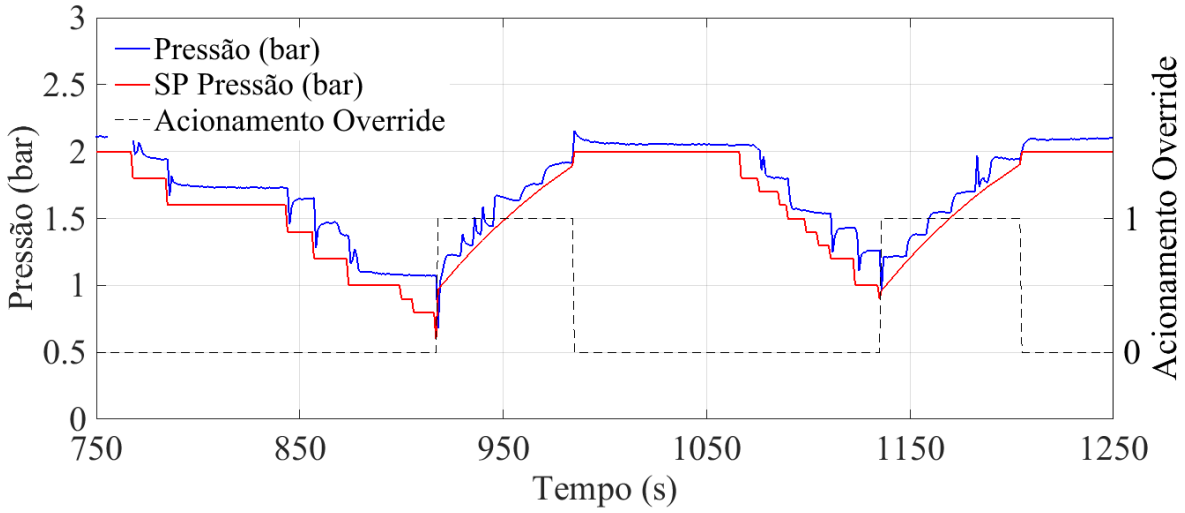
As atuações de ambos controladores das malhas *override* para a pressão no vaso saturador, juntamente com o comportamento dinâmico da pressão e o alarme de acionamento da malha *override*, seguem apresentadas na Figura 58.

Em ambos os gráficos é possível observar que assim que a pressão atinge o valor limite estabelecido para acionamento da malha *override*, a pressão tem seu valor corrigido automaticamente pelos controladores das malhas *override*, até atingirem o valor de segurança.

Nota-se também que a malha principal somente é realimentada quando a pressão atinge o valor definido para desacionamento do *override*.



(a) *override* para alta pressão.



(b) *override* para baixa pressão.

Figura 58 – Atuação das malhas *override* para a pressão do vaso.

O acionamento das malhas em *override* gerou um alarme no SCADA que informou ao operador do protótipo a condição insegura de operação. Isto permitiu que medidas pudessem

ser tomadas para evitar que a variável de processo retornasse à condição inicial, como por exemplo reajustar o *setpoint*.

O comportamento dinâmico da variável de processo sob regulação da malha *override* dura aproximadamente 1 min, tempo considerado suficiente para que o operador da planta perceba a situação e tome uma ação corretiva.

A Figura 58 (a) mostra que, após o desacionamento da malha *override*, a pressão se mantém em 6 bar, pois houve intervenção do operador para ajuste do *setpoint* da pressão para este valor. O mesmo se observa na Figura 58 (b), porém com o *setpoint* sendo definido para 2 bar.

4.5.4.2 Controle *override* da vazão de reciclo

Para proteção do medidor de vazão tipo turbina simples, uma malha de controle em *override* para a vazão de reciclo, apresentada na Figura 59, foi implementada nas lógicas de controle de posição da válvula agulha. E, assim como aplicado no caso da pressão do vaso TQ05, o controlador da malha *override* para Q_r possui recomposição do sinal de controle.

Nesta malha, o limite de segurança em que a malha *override* para Q_r é acionada foi estabelecido em 501 $\mathrm{mL/min}$, enquanto o valor de desacionamento foi definido em 481 $\mathrm{mL/min}$.

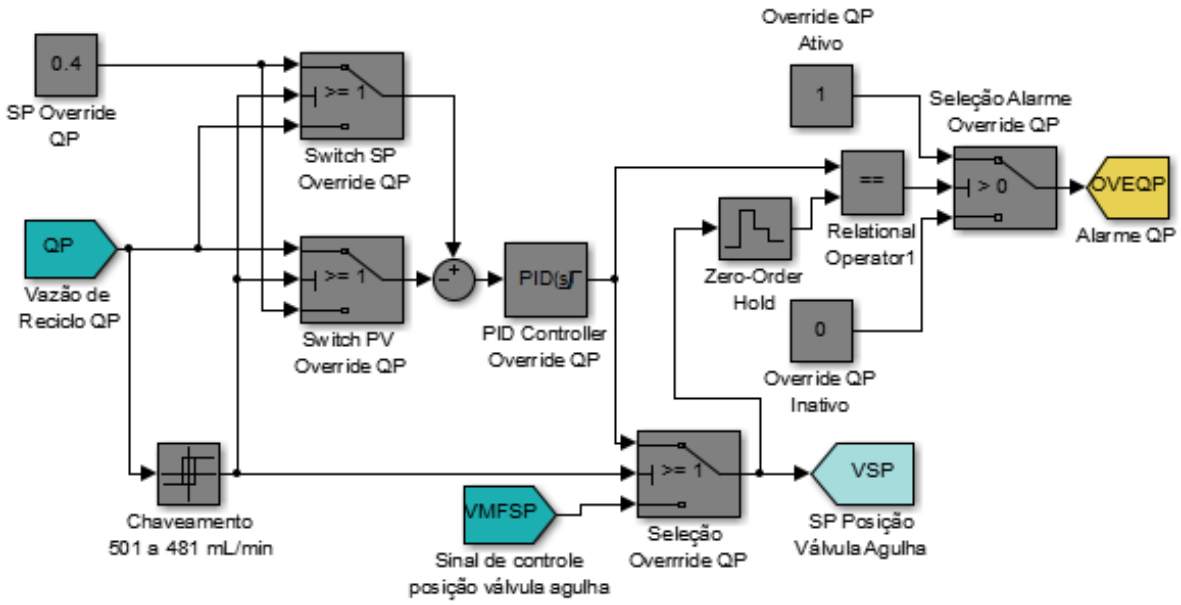


Figura 59 – Malha em *override* para controle da vazão de reciclo.

Na Tabela 8 estão apresentados os parâmetros K_c e τ_i do controlador PI da malha em *override* para a vazão da linha de reciclo.

Tabela 8 – Parâmetros do controlador PI da malha *override* para vazão de reciclo.

Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	0,2	$[V01a_{(\%)}/(\mathrm{mL/min})]$
τ_i	50	[s]

A Figura 60, por sua vez, apresenta a atuação da malha *override* para a vazão de reciclo, com a abertura da válvula agulha, alarme de acionamento do *override* para Q_r e o comportamento dinâmico da vazão de reciclo.

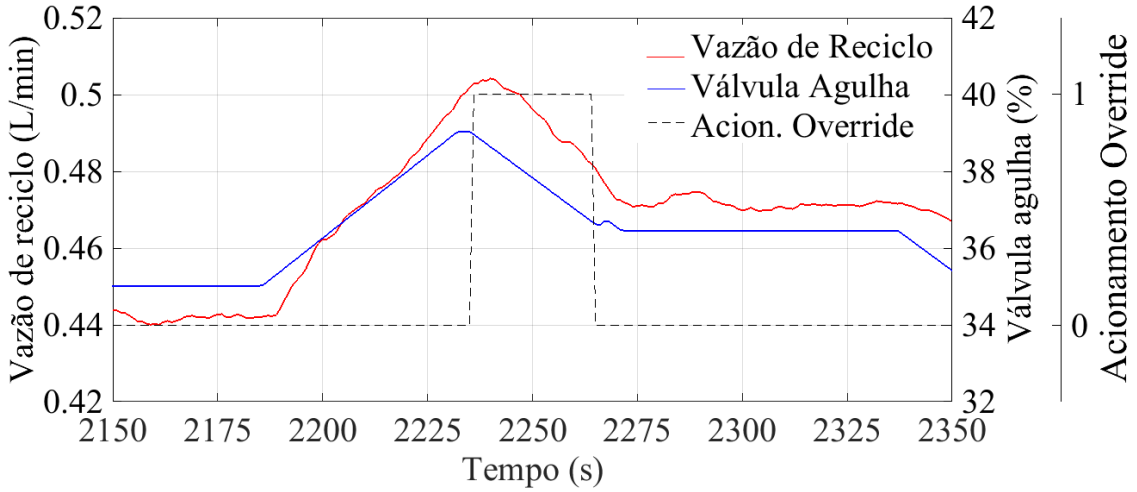


Figura 60 – Atuação da malha *override* para a vazão de reciclo.

Comparando-se as Figuras 60 e 58(a), verifica-se que ocorreu ação de controle análoga na variável de processo observada na atuação das malhas para a pressão do vaso. Porém, neste caso, a atuação foi realizada reduzindo a abertura da válvula agulha que diminui a vazão de reciclo, evitando danos ao medidor de vazão tipo turbina.

Portanto, os dados apresentados mostram a eficácia das malhas *override* na proteção dos equipamentos e manutenção das condições seguras de operação do protótipo.

4.5.5 Operação da planta em malha aberta para a turbidez

A planta de FAD foi operada em malha aberta para a turbidez com o objetivo de comparar as diferentes estratégias de controle propostas neste trabalho. Entretanto, sempre que empregada neste trabalho, a denominação de malha aberta diz respeito apenas ao controle da turbidez da água pós-flotador, pois na operação do protótipo sempre foi mantido o controle em malha fechada da vazão de alimentação, da pressão e do nível de água em TQ05, e da posição de abertura da válvula agulha V01a.

A Figura 61 apresenta as respostas de algumas variáveis do processo de FAD ao longo do ensaio em malha aberta.

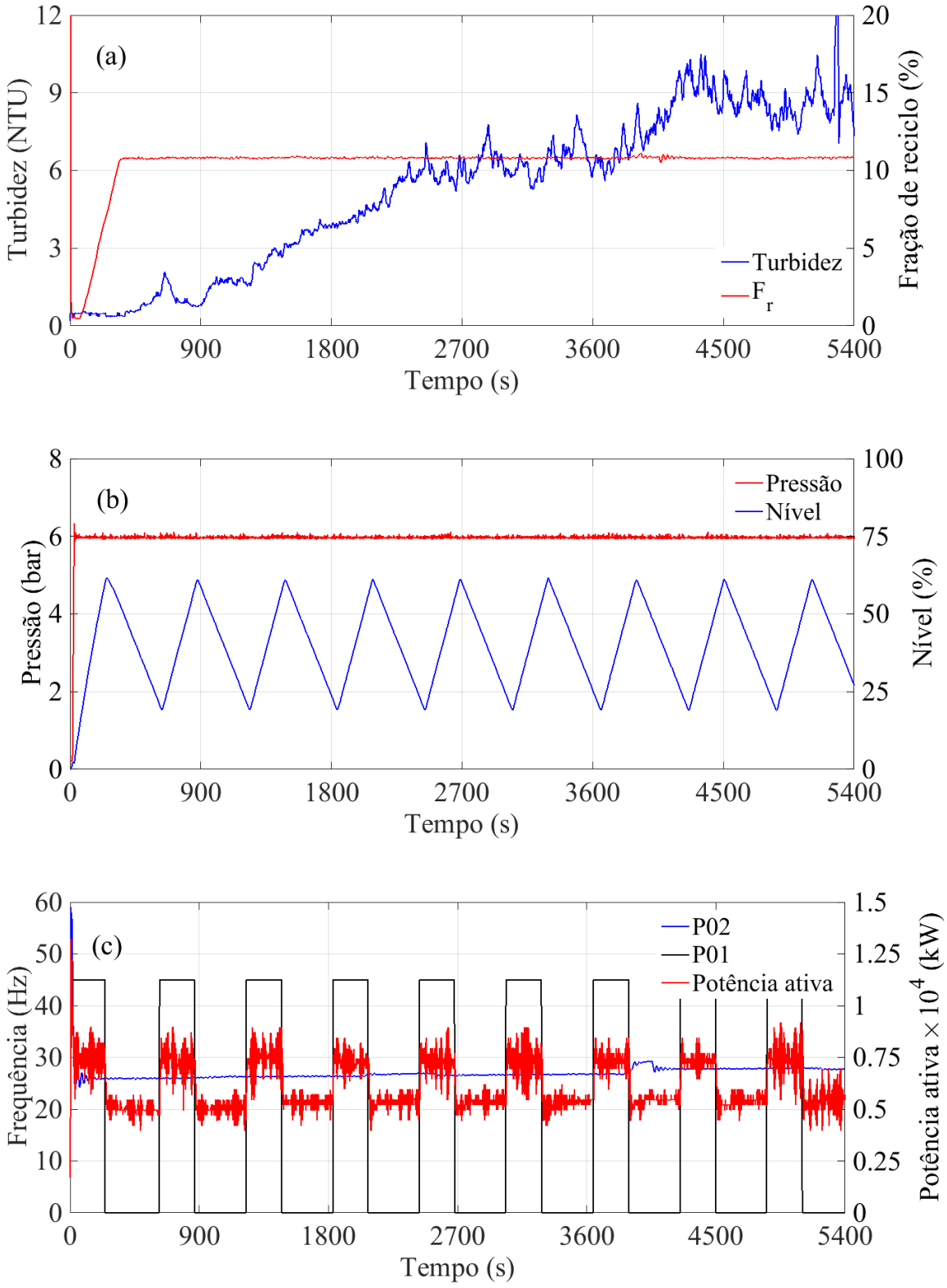


Figura 61 – Comportamento dinâmico das variáveis do protótipo de FAD em malha aberta.

No ensaio em malha aberta, foi utilizado efluente com turbidez de aproximadamente 40 NTU, dosagem de 5,5 mL de solução de $NaAlO_2$ a 2 % v/v e 6,4 mL de solução de biopolieletrólito a 5 % v/v por litro de efluente bruto tratado. Além disto, o protótipo foi operado com uma fração de reciclo constante e igual a 11 % e pressão interna do vaso saturador igual a 6 bar, verificando-se a estabilização da turbidez em aproximadamente 6 NTU até o instante 3600 s e posteriormente em quase 9 NTU, como é possível observar na Figura 61(a).

O comportamento dinâmico da turbidez em malha aberta representa justamente uma consequência da operação de um sistema FAD sem o seu controle. A turbidez se altera ao longo do ensaio para outros valores de regime estacionário devido a variações naturais no processo de FAD como alteração na turbidez do efluente de entrada e o escoamento não-uniforme dos flocos do floculador para o flotador, por exemplo.

Isto compromete a qualidade da água pós-flotador, como também acelera a saturação do elemento filtrante com partículas não flotadas, implicando em menor tempo de carreira de filtração, ou seja, menor tempo entre as retro-lavagens do filtro. Isso significa que mais água limpa é utilizada no tratamento do efluente para a limpeza do filtro. O uso de malha fechada para a turbidez permitiria a correção da turbidez para seu valor de *setpoint* mesmo após estas perturbações no processo, mantendo a qualidade da água pós-flotador.

A Figura 61(b) mostra que a pressão se manteve constante em 6 bar ao longo do ensaio, não sofrendo grandes variações pelos processos de enchimento e drenagem do vaso. Isto porque a válvula reguladora de pressão apresenta controlador interno que automaticamente regula a pressão a jusante, conforme detalhado na seção 4.2.2.

É possível verificar também que o nível de água no vaso variou 9 vezes entre 60 % e 20 %. A bomba de engrenagens P01 foi acionada 9 vezes para encher o vaso, e o seu acionamento provocava o aumento de aproximadamente 0,25 kW na Pot_i da planta, como mostra a Figura 61(c).

Já a bomba centrífuga teve sua frequência de rotação ligeiramente aumentada ao longo do ensaio, pois era necessário para manter a vazão de alimentação em 3 $\mathrm{L/min}$ já que o efluente no TQ06 era consumido, diminuindo seu nível. Este aumento na frequência da P02 refletiu em um pequeno aumento do consumo médio de energia da planta, como observado na Figura 61(c). As bombas P01 e P02 são os maiores consumidores de energia do protótipo de FAD, logo estes efeitos são esperados.

A potência ativa total consumida durante o ensaio em malha aberta foi de 0,33283 kW, o que resulta em um consumo Pot_t de 0,49924 kWh. Como a média de consumo dos instrumentos e CLP não é passível de variação ao longo dos ensaios, espera-se que seja possível reduzir o consumo de energia da planta no acionamento dos atuadores, especificamente da bomba P01. Com malha fechada, espera-se que seja possível regular a turbidez da água pós-flotador com a

menor fração de reciclo e, consequentemente, menos vezes a bomba P01 sendo acionada para alimentar o vaso TQ05.

A Tabela 9 apresenta a variação da turbidez da água filtrada e do pH no floculador, medidos em intervalos de 30 min após o início do ensaio em malha aberta para a turbidez.

Tabela 9 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada em malha aberta.

Tempo [s]	*Turbidez Pós-Filtro* [NTU]	*pH*
0	0,45	8,3
1800	0,55	8,5
3600	0,21	8,6
5400	0,27	8,7

Nota-se que inicialmente a água armazenada no tanque TQ04 apresentava uma turbidez maior, pois tratava-se de água não filtrada utilizada inicialmente para encher o vaso saturador nos primeiros momentos do ensaio. Ao longo do ensaio, a água armazenada foi sendo renovada pela água tratada do sistema de FAD e filtrada por TQ03.

Verifica-se que mesmo para a água pós-flotador com aproximadamente 8 NTU, o filtro de areia foi capaz de reduzir sua turbidez para até 0,21 NTU.A turbidez pós-filtro é menor que 1 NTU, limite máximo estabelecido na Portaria Nº 2914 de 12 de Dezembro de 2011 do Ministério da Saúde para o parâmetro de turbidez em água potável.

Desta forma, estes dados mostram que o sistema de floculação e flotação foram responsáveis por uma redução de 80 % na turbidez, e somando o efeito do filtro de areia uma redução de aproximadamente 99,5 %.

O pH no floculador praticamente se manteve na faixa de 8,3 a 8,7 ao longo do ensaio, devido à variação das condições intrínsecas da floculação, não afetando drasticamente a turbidez da água pós-flotador. Isto indica que a manutenção das vazões de tanino e aluminato de sódio pelas bombas P04 e P05, respectivamente, foram suficientes para manutenção da floculação já que a vazão de efluente na alimentação também é constante.

Entretanto, este resultado mostrou que seria interessante uma malha de controle para regular o pH no floculador e padronizar a etapa de floculação, ficando como sugestão para trabalhos posteriores.

Um fator que também interfere no processo de FAD é a temperatura da água utilizada no vaso TQ05. Conforme detalhado na seção 2.2, a pressão e a temperatura interferem na dissolução de ar em água.

Com os dados aquisitados, foi possível calcular para cada instante do ensaio o valor máximo de saturação de ar na água (Ca_{max}) pela Lei de Henry, apresentada na Equação 2.1,

e a predição de dissolução de ar em vaso saturador não empacotado (Ca_p) pela Equação 2.3 proposta por Bahadori *et al.* (2013).

A Figura 62 apresenta a comparação entre Ca_{max} e Ca_p para o ensaio em malha aberta para a turbidez.

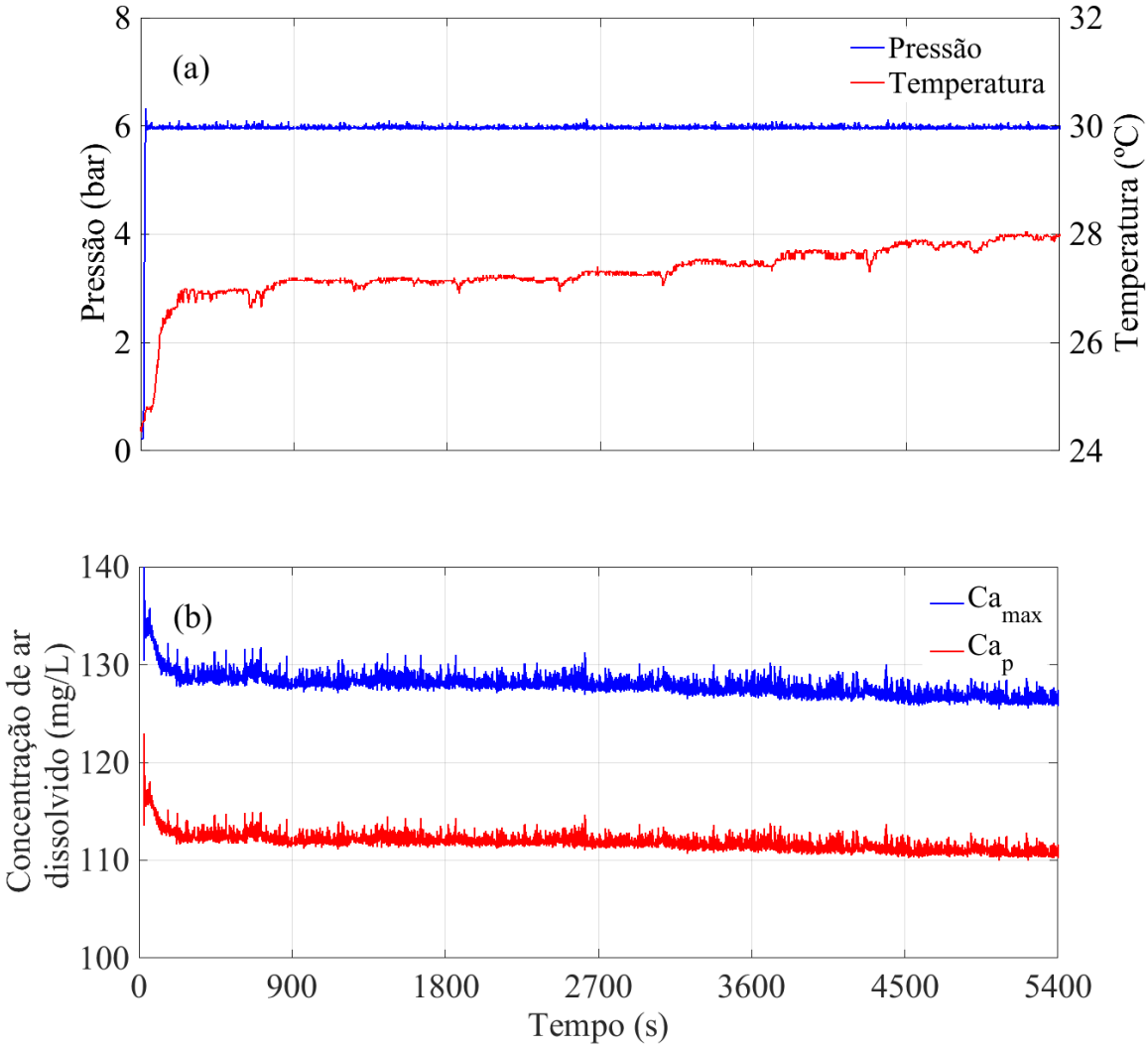


Figura 62 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 em malha aberta (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b).

É possível verificar que com o aumento da temperatura da água, há uma ligeira queda em Ca_{max} e, consequentemente, em Ca_p. Isto implica que mesmo mantendo F_r e a pressão em TQ05, a concentração de micro-bolhas no flotador é obviamente reduzida, provocando um aumento na turbidez da água pós-flotador.

Os dados calculados de Ca_p, a partir das equações propostas por Bahadori *et al.* (2013), referem-se a um vaso saturador com eficiência de saturação igual a aproximadamente 87 %.

Como o vaso saturador TQ05 utilizado na planta de FAD possui dimensões e tempo de retenção hidráulico diferentes, Ca_p não representa fielmente o valor de ar dissolvido em água no ensaio em malha aberta, mas permite ter uma ideia da variação de ar dissolvido em função de temperatura e pressão.

Tendo sido observada a estabilização da turbidez em aproximadamente 8 NTU com uma fração de reciclo igual a 11 % e pressão no vaso saturador igual a 6 bar, foi escolhido um valor de *setpoint* para a turbidez em malha fechada igual a 4 NTU, de modo que o sistema de controle fosse requisitado para reduzir a turbidez da água atuando na abertura da válvula V01a ou na pressão do vaso saturador.

4.5.6 Controle da turbidez

Uma malha de controle *Single-Input-Single-Output* (SISO) possui uma única variável de processo e uma única variável manipulada, sendo a configuração mais simples, clássica e utilizada nos processos industriais (STEPHANOPOULOS, 1984; SEBORG, 2004; SMITH; CORRIPIO, 2008).

Por outro lado, uma malha de controle *Multiple-Input-Single-Output* (MISO) possui múltiplas entradas e apenas uma variável de saída, o que permite uma melhor avaliação do processo através das múltiplas entradas para se tomar a ação de controle. Entretanto, isto torna seu projeto mais complexo em relação a uma malha SISO, mas que pode ser facilitado com o uso de lógica *Fuzzy* como argumentado na seção 2.3.2.1.

Desta forma, foram testadas estratégias SISO e MISO para o controle da turbidez da água clarificada atuando em diferentes variáveis manipuladas, com o intuito de verificar o desempenho do sistema de controle e seu consumo energético.

4.5.6.1 Estratégia SISO I

A primeira estratégia SISO utiliza a pressão do vaso saturador como variável manipulada já que esta interfere na dissolução de ar em água (BRATBY; MARAIS, 1975). Nesta malha, foi usado um controlador PI com proteção *anti-reset wind-up* e *tracking time constant* τ_t igual a 1,5 s.

A sintonia deste controlador foi realizada utilizando os parâmetros identificados de uma FOPDT para a variação de turbidez em função da pressão, conforme apresentada na Figura 63 para um *step* de -1 bar, e o *toolbox Signal Constraint* do MatLab® para tempo de resposta menor que 1500 s.

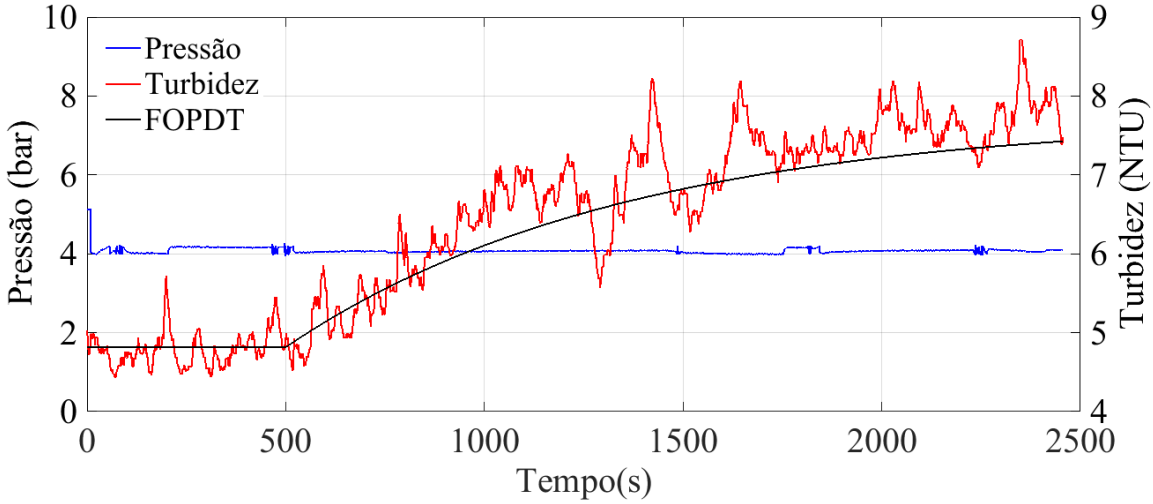


Figura 63 – Identificação da FOPDT para a turbidez em função da pressão por curva de resposta.

A Tabela 10 apresenta os valores da FOPDT identificada para a turbidez em função da pressão, além dos parâmetros do controlador PI sintonizados no *toolbox Signal Constraint* e seus valores após re-sintonia, em que o ganho K_c teve seu valor dobrado para acelerar resposta do sistema em malha fechada.

Tabela 10 – Parâmetros do controlador PI e do modelo FOPDT para turbidez em função da pressão.

FOPDT		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_p	-2,9	[NTU/bar]
τ_p	850	[s]
t_d	500	[s]
Controlador - *Signal Constraint*		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	0,26	[bar/NTU]
τ_i	185,7	[s]
Controlador - Re-Sintonia		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	0,52	[bar/NTU]
τ_i	185,7	[s]

A Figura 64 apresenta a implementação no MatLab® da estratégia SISO I de controle da turbidez pós-flotador.

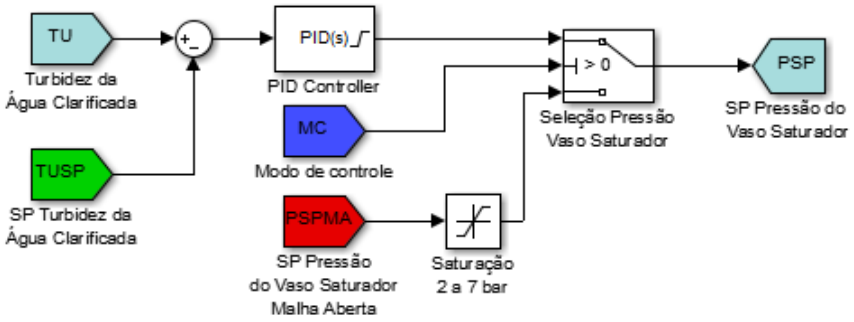


Figura 64 – Malha de controle da turbidez na estratégia SISO I.

Para uma mesma abertura da válvula V01a, variações na pressão do vaso resultam em diferentes valores de vazão de reciclo, conforme apresentado na Figura 65. Desta forma, exclusivamente nesta estratégia de controle da turbidez, para manter a fração de reciclo constante ao longo do experimento e apenas atuar na pressão do vaso TQ05 foi implementado um controlador PI para corrigir a abertura da válvula agulha de modo que F_r fosse mantida constante. A Figura 66 apresenta a malha de controle da F_r implementada na estratégia SISO I.

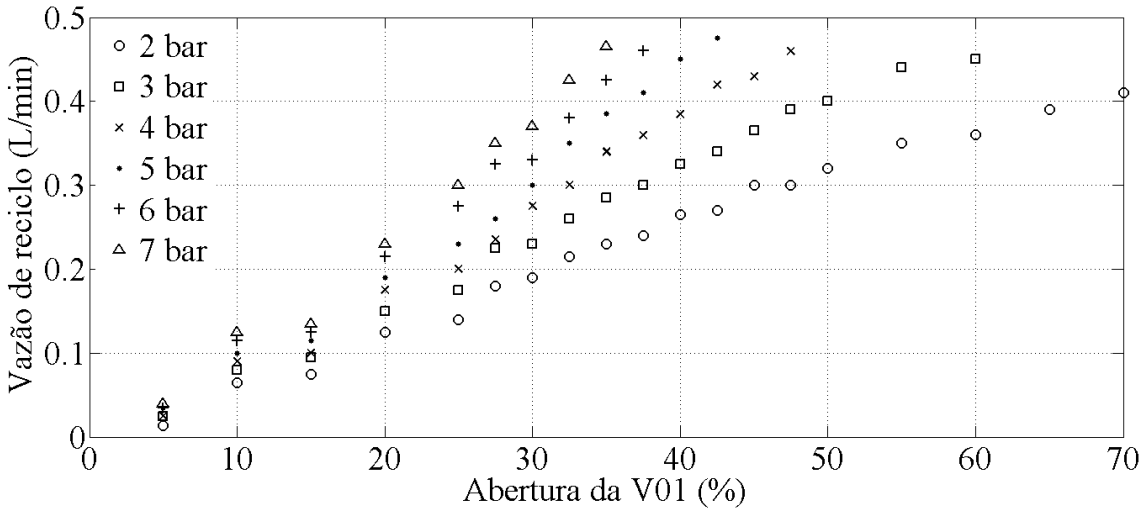


Figura 65 – Variação da vazão de reciclo em função da abertura da válvula V01a e da pressão do vaso TQ05.

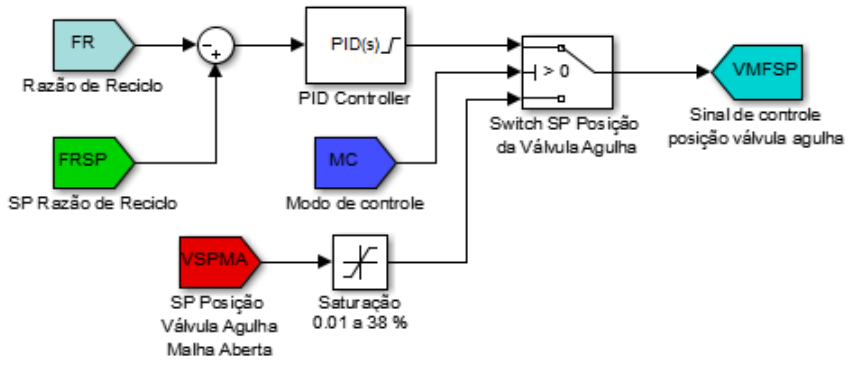


Figura 66 – Malha para controle da fração de reciclo na estratégia SISO I.

A Figura 67 apresenta o comportamento dinâmico das variáveis do processo FAD durante o ensaio com a estratégia de controle SISO I. A resposta da turbidez da água pós-flotador com a estratégia SISO I apresentada na Figura 67(a) mostra que o uso da pressão como variável manipulada resulta em um sistema com resposta lenta, e o quão não linear é o sistema de flotação. Isto porque a redução da turbidez com o aumento da pressão não possui o mesmo comportamento dinâmico que o aumento da turbidez pela redução da pressão no vaso TQ05.

Inicialmente no experimento com a malha SISO I, a pressão foi reduzida para 4 bar pois a turbidez era muito menor que o valor de *setpoint*. Isto provocou uma redução significativa da geração de micro-bolhas e propiciou um *overshoot* na turbidez da água pós-flotador de aproximadamente 100 %.

Com o aumento da turbidez, o controlador PI atuou aumentando a pressão no vaso saturador, entretanto a quantidade insuficiente de micro-bolhas geradas no início do ensaio contaminou a zona de separação do flotador com grande quantidade de flocos não flotados. Isto pode ser observado a partir do tempo 2700 s pelos picos na medição da turbidez gerados por grandes flocos que eram admitidos no ponto de amostragem do turbidímetro *online*.

Na Figura 68 é possível verificar que a concentração máxima de ar dissolvido na água de reciclo estava muito baixa no início do ensaio devido à baixa pressão aplicada ao vaso TQ05, comprometendo o desempenho da malha SISO I.

Nota-se ao término do ensaio que a turbidez ainda não havia sido corrigida para o valor de *setpoint*, com a presença dos picos na leitura decorrentes da contaminação da zona de separação. Deste modo, embora a pressão interfira na dissolução de ar na água e, consequentemente, na concentração de micro-bolhas geradas no flotador, não apresentou um bom desempenho como MV em uma malha SISO.

É possível que o uso de pressões acima do limite estabelecido em 7 bar para a MV permitiria um melhor ajuste da turbidez, entretanto, seria necessário que o tanque TQ05 tivesse estanqueidade a pressões maiores, e o consumo de energia para a compressão do ar e para o bombeamento de água clarificada para TQ05 seria maior.

A Tabela 11 apresenta os valores de turbidez da água filtrada e o pH na floculação medidos em intervalos de 30 min no ensaio. Nota-se que mesmo com elevada turbidez da água pós-flotador, o filtro de areia foi capaz de reduzir a turbidez da água para até 0,17 NTU, abaixo do limite de 1 NTU estabelecido pelo Ministério da Saúde para fins de potabilidade. Entretanto, como a flotação apresentou baixa eficiência, a redução da turbidez de aproximadamente 8 para 0,17 NTU provocada pelo filtro reduz a carreira de filtração, sendo uma desvantagem desta estratégia de controle.

Na Figura 67(a) é possível verificar que a fração de reciclo foi constantemente corrigida para o valor de 11 % ao longo de todo o ensaio. Nos instantes 1200 s, 2800 s e 4000 s, por exemplo, foram observadas variações expressivas em F_r devido a mudanças bruscas na

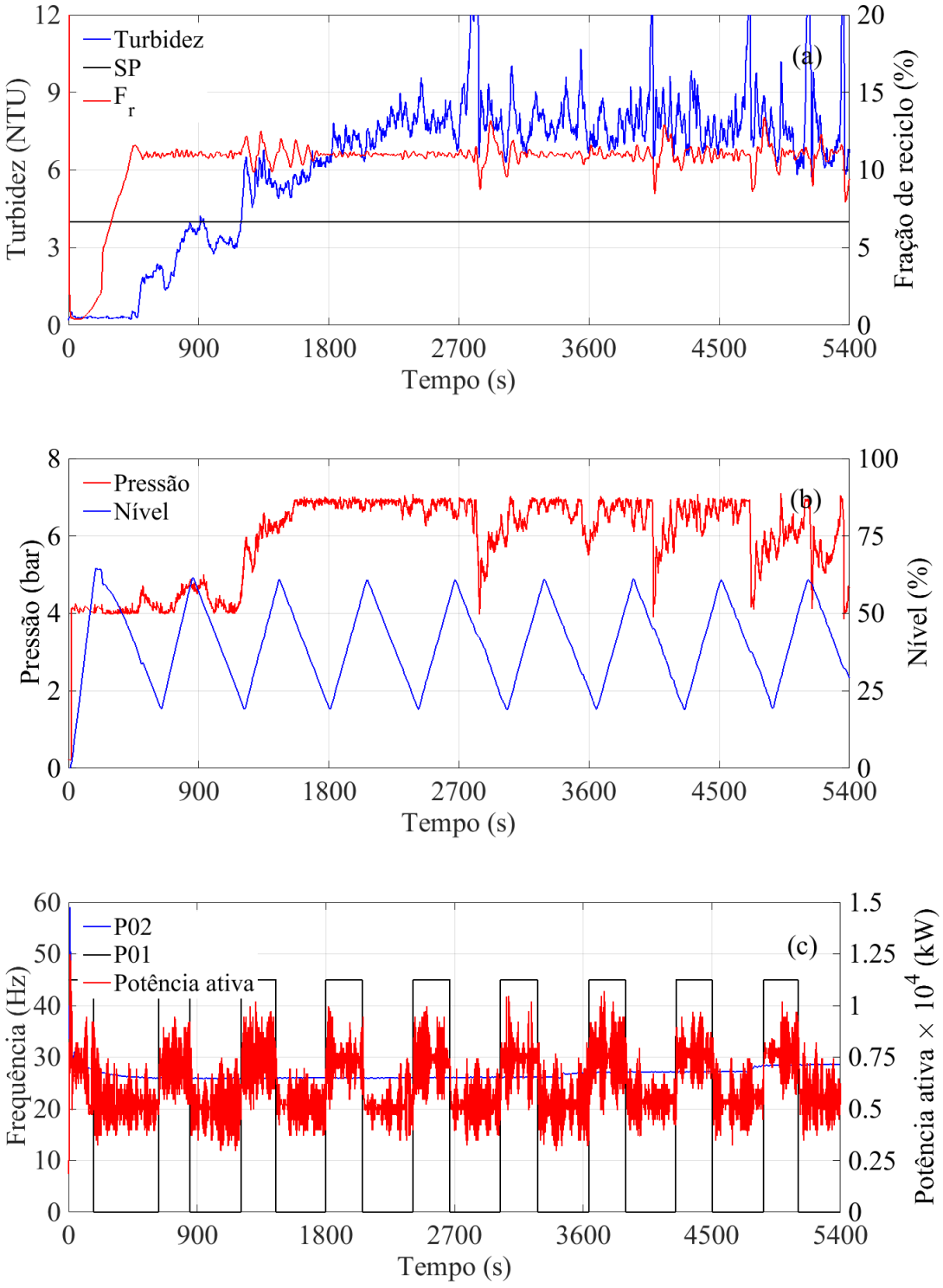


Figura 67 – Comportamento dinâmico das variáveis com a estratégia SISO I.

pressão do vaso TQ05 pela malha de controle SISO I da turbidez. Mesmo com o filtro de sinal *Noise Spike Filter* na leitura da turbidez, os picos de turbidez provocaram grande variações no sinal de controle para a válvula V02, que consequentemente resultaram em variações na fração de reciclo. Todavia, F_r era corrigido em seguida para 11 % devido a implementação da sua malha de controle atuando na abertura da válvula agulha.

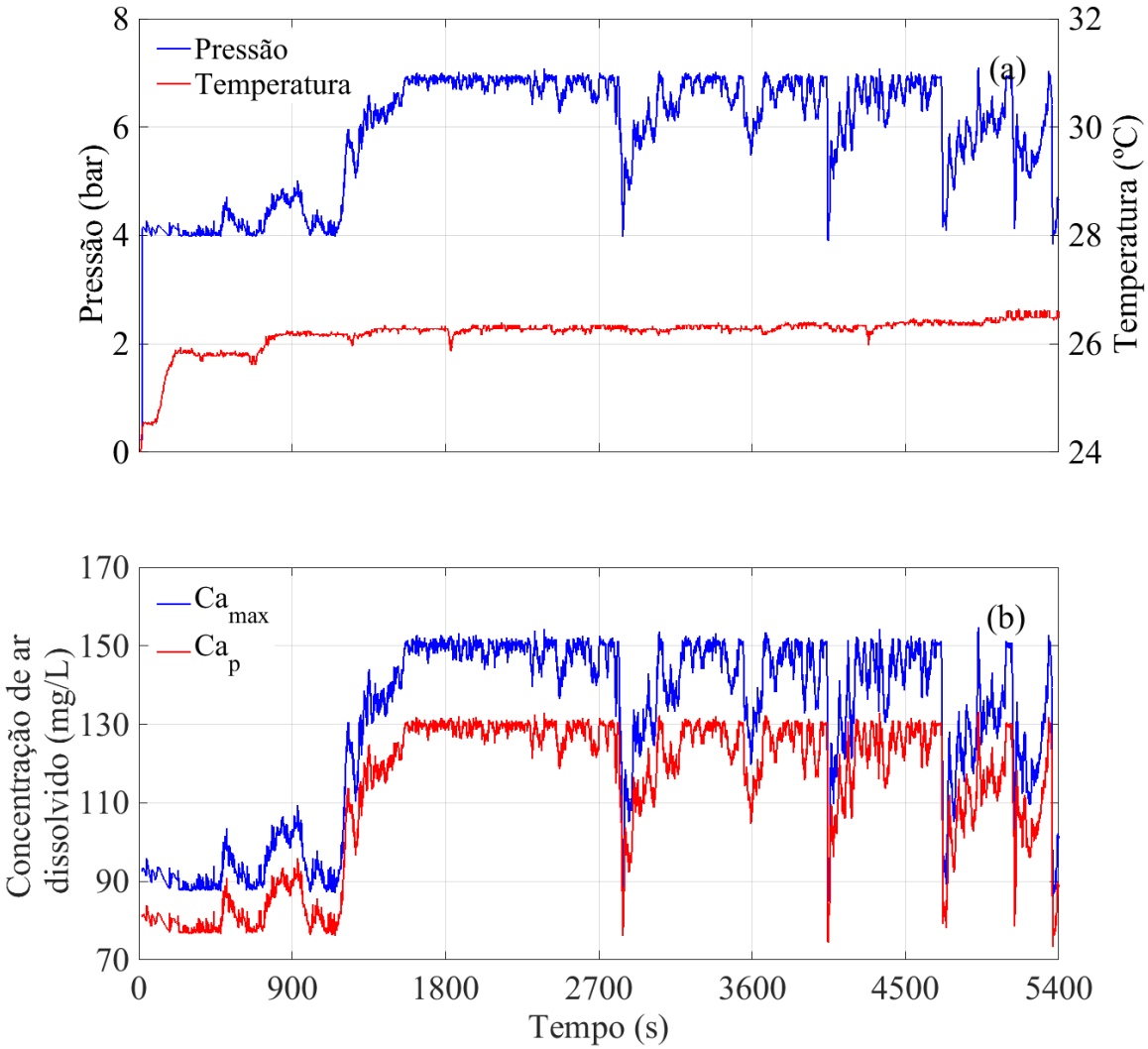


Figura 68 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com SISO I (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b).

Assim como em malha aberta, a bomba P01 também foi acionada 9 vezes durante o ensaio, pois trabalhou-se com a mesma F_r de 11 %; e a bomba P02 apresentou um aumento na sua frequência de acionamento pelos mesmos motivos discutidos na seção 4.5.5. Desta forma, a potência ativa total consumida na planta com esta estratégia foi equivalente a 0,33095 kW, o que representa um consumo de 0,49643 kWh.

Tabela 11 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia SISO I.

Tempo [s]	*Turbidez Pós-Filtro* [NTU]	*pH*
0	0,89	7,9
1800	0,49	8,2
3600	0,22	8,1
5400	0,17	8,3

Em comparação à malha aberta, em termos de consumo energético, praticamente não apresentou grande vantagem, além disto produziu uma baixa performance do sistema de controle pois a PV não foi corrigida ao valor de *setpoint*. A Tabela 12 apresenta os valores de IAE, ISE, EC_{V01a} e EC_{V02} calculados para a malha SISO I.

Tabela 12 – Critérios de desempenho IAE e ISE e esforços de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha SISO I.

Critério	*Valor*	*Unidade*
IAE	17883,565	[NTU×s]
ISE	74153,924	[NTU^2 × s]
EC_{V01a}	1226,384	[$V01a^2_{(\%)}$ × s]
EC_{V02}	140,796	[bar^2 × s]

O critério ISE foi fortemente afetado pelo *overshoot* no início do experimento e pelos picos observados na leitura da turbidez, assim como o critério IAE que também foi penalizado pela resposta lenta do processo. O critério EC_{V01a} também foi penalizado pela constante correção da posição de abertura da V01a para manter F_r em 11 %, assim como EC_{V02} foi afetada pelas constantes correções da pressão em TQ05 pela malha de controle da turbidez.

A Figura 69 apresenta o comportamento dinâmico da pressão no vaso TQ05 e o sinal de controle enviado à válvula V02 pela malha de controle da turbidez, sendo possível verificar que o atuador foi demasiadamente requisitado pelo sistema de controle na estratégia SISO I, resultando em um elevado valor de EC_{V02}.

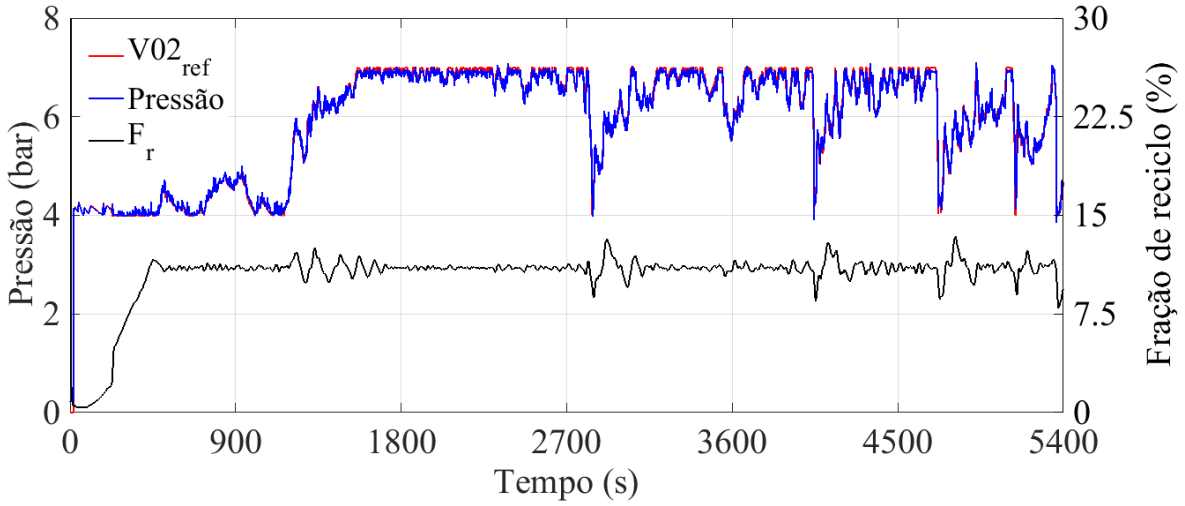


Figura 69 – Comportamento dinâmico da MV e do sinal de controle da V02 na estratégia SISO I em comparação com F_r.

4.5.6.2 Estratégia SISO II

A estratégia SISO II foi proposta com a abertura da válvula agulha V01a como variável manipulada, o que significa indiretamente a manipulação da fração de reciclo do sistema FAD. Variar a abertura da válvula V01a fornece quantidade variável de micro-bolhas na zona de contato do flotador, que permite o controle da turbidez da água clarificada pela maior ou menor flotação do material floculado.

Assim, a 6 bar de pressão em TQ05, foi identificada uma FOPDT para a turbidez em função da vazão de reciclo, conforme mostra a Figura 70, para um *step* de 420 a 370 $\mathrm{mL/min}$.

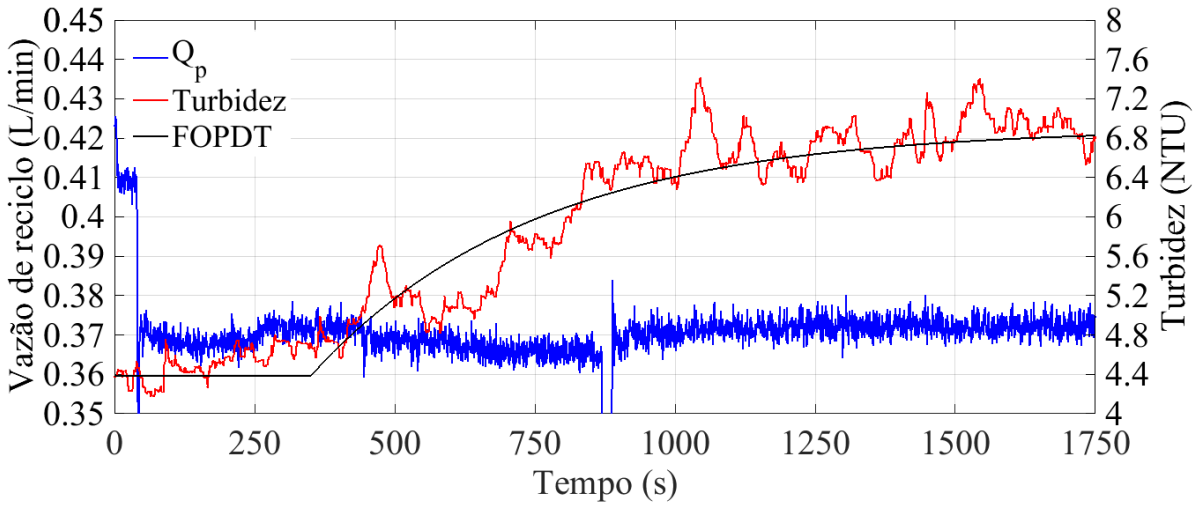


Figura 70 – Identificação da FOPDT para a turbidez em função da vazão de reciclo por curva de resposta.

A Tabela 13 apresenta os valores identificados da FOPDT para a turbidez em função da vazão de reciclo, além dos valores de K_c e τ_i sintonizados pelo *toolbox Signal Constraint* para o controlador PI, e seus valores após re-sintonia para evitar uma atuação muito agressiva no conjunto motor de passo e válvula agulha.

Conforme mostrado na Figura 65, a 6 bar em TQ05, para as vazões de 420 e 370 $\mathrm{mL/min}$ têm-se aberturas da válvula V01a aproximadamente iguais a 34 % e 31 %, respectivamente. Logo, o *step* na identificação foi de -3 % na abertura da V01a.

O controlador utilizado foi um PI com *anti-reset wind-up* e τ_t igual a 1,5; além de parâmetros sintonizados usando FOPDT e o *toolbox Signal Constraint* do MatLab®, com meta de tempo de resposta menor que 1500 s.

No MatLab® foi implementada a malha de controle da turbidez para a estratégia SISO II, conforme mostra a Figura 71, sendo que a pressão nesta estratégia foi submetida a valor constante de *setpoint* igual a 6 bar.

Tabela 13 – Parâmetros do controlador PI e do modelo FOPDT para a turbidez em função da vazão de reciclo.

FOPDT		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_p	-0.81	[NTU/$V01a_{(\%)}$]
τ_p	400	[s]
t_d	350	[s]
Controlador - *Signal Constraint*		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	0,048	[$V01a_{(\%)}$/NTU]
τ_i	19,2	[s]
Controlador - Re-Sintonia		
Parâmetro	*Valor*	*Unidade*
K_c	0,015	[$V01a_{(\%)}$/NTU]
τ_i	66,7	[s]

A Figura 72 apresenta o comportamento dinâmico das variáveis do processo FAD durante o ensaio com a estratégia de controle SISO II.

O controle da turbidez da água clarificada na estratégia SISO II em que a variável manipulada é a abertura de V01a, foi muito mais efetiva do que a estratégia SISO I que emprega a pressão do vaso TQ05, como pode ser observado na Figura 72(a).

O *overshoot* com a estratégia SISO II foi de aproximadamente 25 %, uma melhoria significativa no controle da turbidez em relação à estratégia SISO I que produziu *overshoot* de praticamente 100 %.

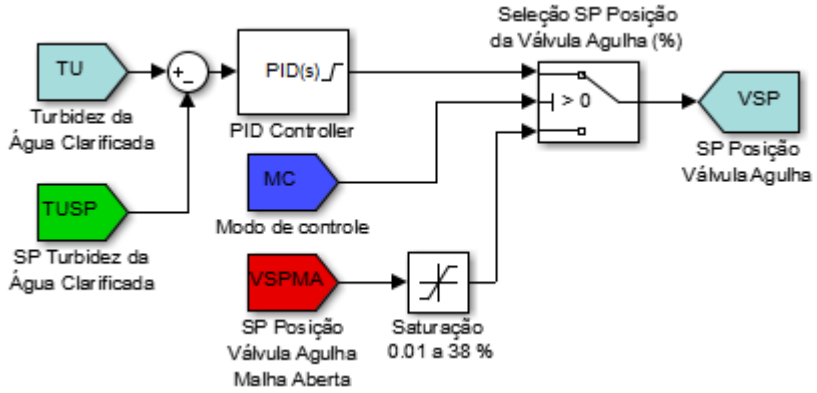


Figura 71 – Malha de controle da turbidez na estratégia SISO II.

A Figura 72(b) mostra que durante o ensaio houve o acionamento da bomba P01 por 9 vezes, assim como na estratégia SISO I e em malha aberta. Na Figura 72(c), nota-se que embora a pressão do tanque TQ05 fosse menor, exigindo menor esforço da bomba P01 em

bombear água para o vaso, houve um pequeno aumento na potência ativa total consumida na planta em relação ao ensaio com a estratégia SISO II.

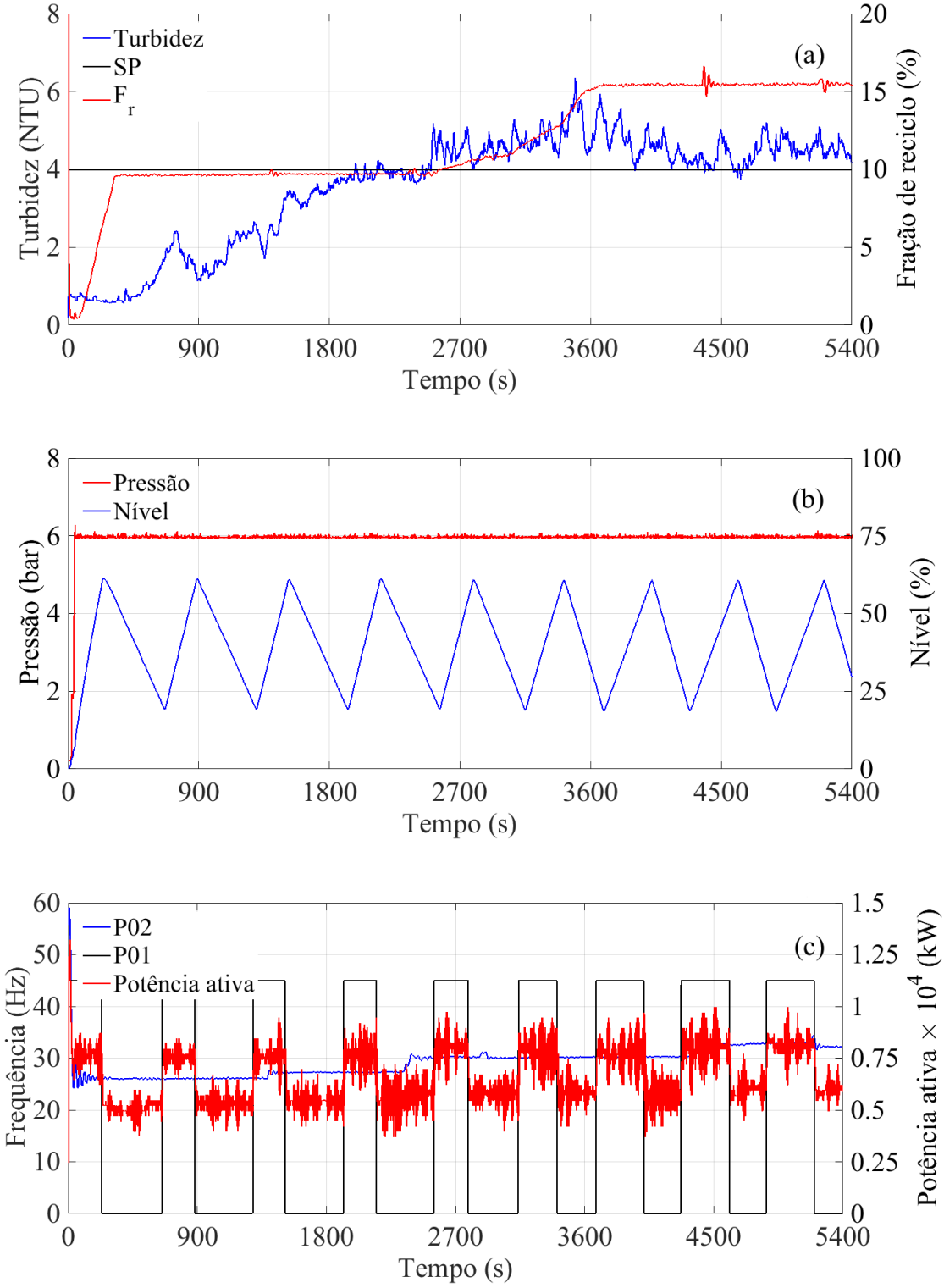


Figura 72 – Comportamento dinâmico das variáveis com a estratégia SISO II.

Isto foi observado devido ao maior consumo de energia pela bomba P02 que exigiu maior frequência de rotação para manter a vazão de alimentação da planta em 3 $\mathrm{L/min}$. A

potência ativa total consumida na estratégia SISO II foi de 0,35650 kW, o que representa um consumo energético Pot_t equivalente a 0,53475 kWh.

A Figura 73 apresenta a variação de Ca_{max} e Ca_p para o ensaio com a estratégia SISO II. Nota-se que há uma redução na concentração máxima ao longo do ensaio por conta do aquecimento da água, entretanto a dissolução de ar na água foi suficiente para gerar uma quantidade adequada de micro-bolhas no flotador e permitir o controle da turbidez da água pós-flotador.

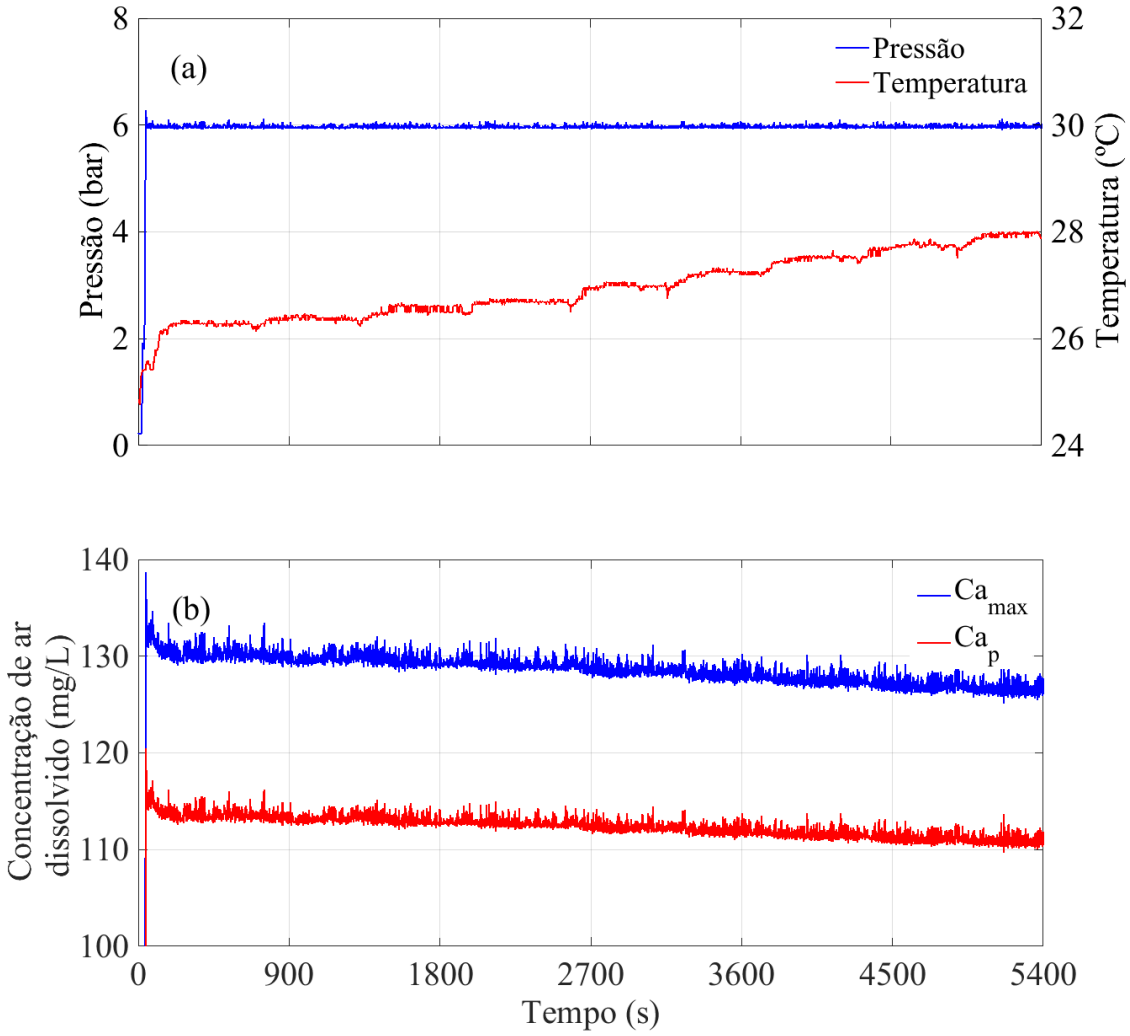


Figura 73 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com SISO II (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b).

O melhor desempenho da estratégia SISO II também se revela nos valores finais dos critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02}, indicados na Tabela 14. Com menor *overshoot*, o critério ISE foi fortemente reduzido e com menor desvio da PV em relação ao *setpoint*, o critério IAE também foi reduzido em relação à estratégia SISO I.

Como na estratégia SISO II a pressão foi mantida constante ao longo do ensaio, o esforço de controle da válvula V02 foi consideravelmente reduzido. Embora a estratégia SISO

II manipule a abertura da válvula V01a, o esforço de controle obtido foi menor do que para a estratégia SISO I.

Tabela 14 – Critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha SISO II.

Critério	*Valor*	*Unidade*
IAE	5920,416	[NTU×s]
ISE	12092,872	[NTU^2 × s]
EC_{V01a}	946,743	[$V01a^2_{(\%)}$ × s]
EC_{V02}	36,0	[bar^2 × s]

Desta forma, tanto pelo comportamento dinâmico da PV como pelos resultados de IAE, ISE, EC_{V01a} e EC_{V02}, a estratégia SISO II que emprega indiretamente a variação de F_r para regular a turbidez da água pós-flotador se mostrou mais eficiente do que a estratégia SISO I que emprega a pressão do vaso TQ05.

A Figura 74 apresenta o comportamento dinâmico do atuador da malha SISO II durante o ensaio. Nota-se que a abertura de V01a saturou em 38 % do instante 3660 s até o final do ensaio por conta da dinâmica lenta do controlador que mesmo tendo sido capaz de regular a turbidez em seu valor de *setpoint*, permitiu uma ligeira contaminação da zona de separação do flotador nos instantes iniciais ao empregar uma fração de reciclo baixa.

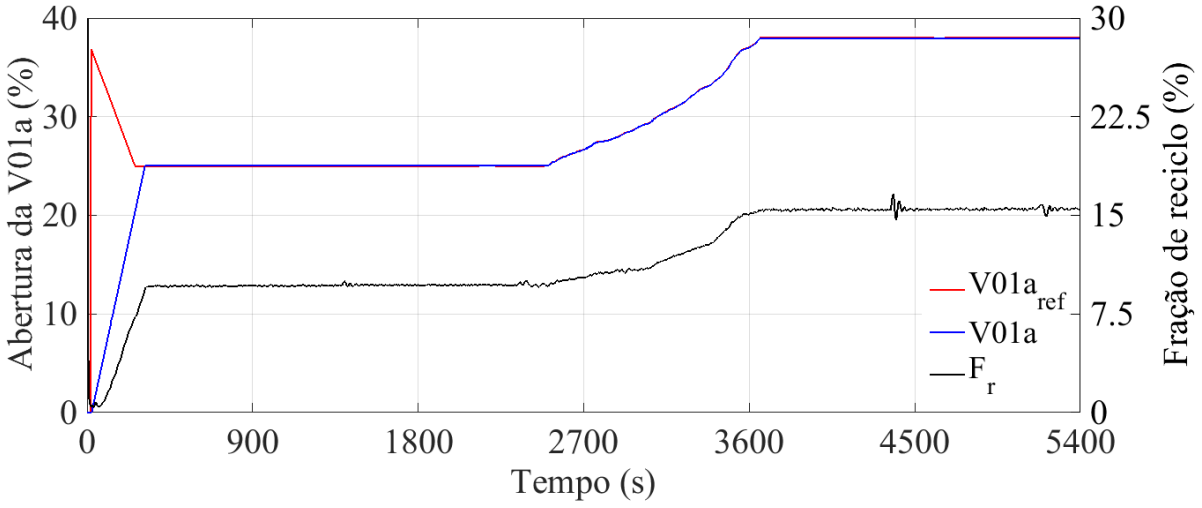


Figura 74 – Abertura da válvula V01a na estratégia SISO II em comparação com F_r.

A Tabela 15 apresenta os valores de turbidez do efluente, da água filtrada e do pH medidos em intervalos de 30 min no ensaio com a estratégia SISO II. É possível verificar que, assim como para malha aberta e SISO I, a turbidez da água clarificada foi bastante reduzida após a filtragem rápida, chegando a valores de até 0,23 NTU. Isto implica que a flotação foi

responsável em reduzir aproximadamente 90 % da turbidez inicial, e com a filtração foi alcançado 99,4 % de remoção da turbidez ao final do ensaio.

Tabela 15 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia SISO II.

Tempo [s]	*Turbidez Pós-Filtro* [NTU]	*pH*
0	0,84	8,0
1800	0,64	8,2
3600	0,42	8,3
5400	0,23	8,4

Assim, verifica-se que o uso da abertura de V01a como MV no processo de FAD para controle da turbidez da água na saída do flotador é muito mais vantajoso do que o uso da pressão do vaso saturado, pois melhora o desempenho do sistema de controle, com base nos valores de IAE, ISE, EC_{V01a} e EC_{V02} e com praticamente o mesmo consumo energético.

4.5.6.3 Estratégia MISO

Uma estratégia com múltiplas entradas e uma variável de saída (MISO) foi investigada neste trabalho, na qual as entradas são o valor do erro instantâneo da turbidez (e_{tu}) e a variação do erro atrasado em 3 $\min$ (Δe_{tu}). A escolha da entrada Δe_{tu} foi tomada para auxiliar o controlador com informação que permitisse verificar o comportamento dinâmico da variável de processo ao longo do experimento.

Inicialmente, o controlador foi projetado com universos de discurso para as entradas e_{tu} e Δe_{tu} nas faixas de -2 a 2 NTU e -0.4 a 0.4 NTU, respectivamente, e para a variável de saída de -0,03 a 0,03 %. Para a entrada e_{tu}, foram configuradas 5 MFs com os seguintes antecedentes: *Muito Baixo* (MB), *Baixo* (B), *Zero* (Z), *Alto* (A) e *Muito Alto* (MA). Por sua vez, a entrada Δe_{tu} foi configurada com 3 MFs e os seguintes antecedentes: *Negativo* (N), *Zero* (Z) e *Positivo* (P).

Desta forma, o controlador *Fuzzy* necessitou do projeto de apenas 15 regras, apresentadas na Tabela 16. A variável de saída $\Delta V01a_{ref}$, que representa o incremento na posição da válvula agulha V01a em %, foi configurada com 5 MFs referenciadas com os seguintes consequentes: *Muito Baixa Vazão* (MBV), *Baixa Vazão* (BV), *Média Vazão* (MV), *Alta Vazão* (AV) e *Muito Alta Vazão* (MAV).

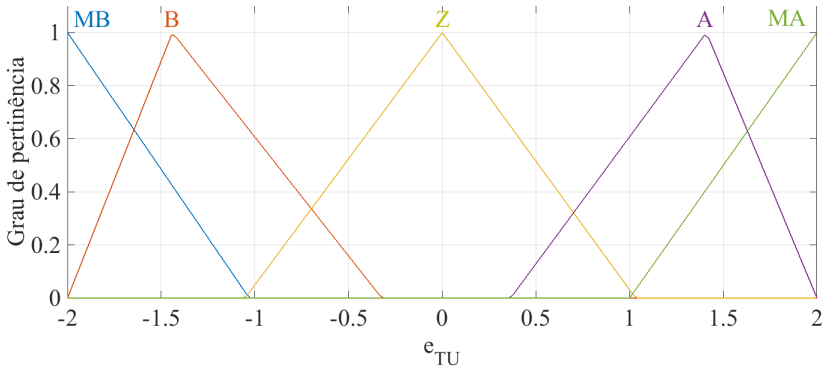
Tabela 16 – Base de regras do controlador *Fuzzy* da estratégia MISO.

Δe_{tu} / e_{tu}	*Muito Baixo*	*Baixo*	*Zero*	*Alto*	*Muito Alto*
Negativo	MBV	MBV	BV	AV	AV
Zero	BV	BV	MV	AV	MAV
Positivo	BV	MV	AV	MAV	MAV

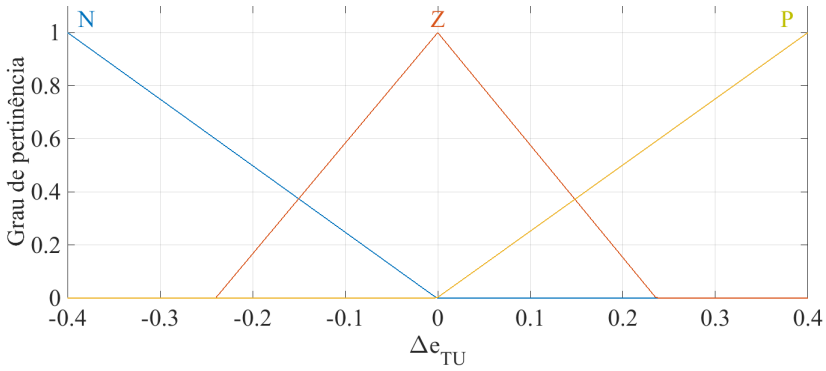
A base de regras do controlador *Fuzzy* foi projetada utilizando o conhecimento especialista adquirido sobre a planta FAD durante a montagem e realização de seus testes de

validação. Esta base de regras levou em consideração, por exemplo, a não linearidade do processo de flotação, em que para baixos valores de F_r havia um aumento rápido e intenso da turbidez da água pós-flotador e para valores altos de F_r havia uma redução mais lenta e menos intensa da turbidez.

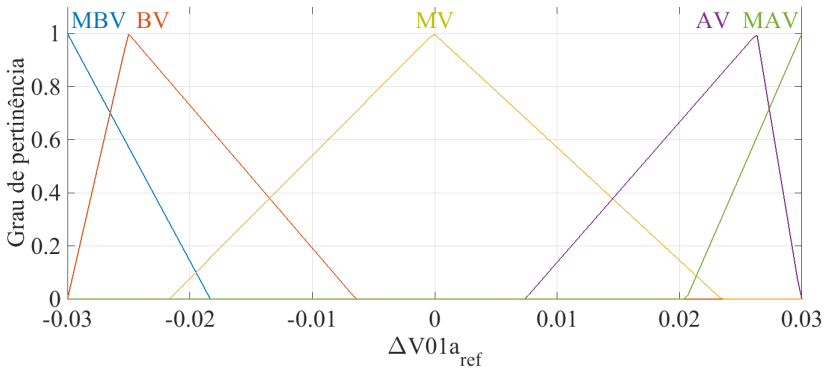
Todas as MFs, quer sejam das variáveis de entrada ou de saída, foram configuradas no formato triangular, pois são mais fáceis para projetar a resposta do controlador *Fuzzy* e apresentam bons resultados no controle de processos (GHANSEM, 2006; FONSECA *et al.*, 2013; FONSECA *et al.*, 2016). A Figura 75 apresenta as MFs para as entradas e saída do controlador *Fuzzy*.



(a) MFs para a variável de entrada e_{tu}.



(b) MFs para a variável de entrada Δe_{tu}.



(c) MFs para a variável de saída $\Delta V01a_{ref}$.

Figura 75 – MFs das variáveis de entrada e saída do *Fuzzy* I projetado para a malha MISO.

Na Figura 75(a), as MFs foram distribuídas de forma não equidistante em seu universo de discurso com o intuito de favorecer a atuação do controlador *Fuzzy* em situações em que a PV se encontrava distante do valor de *setpoint*. Já na Figura 75(b), a MF que representa o erro zero foi configurada com suporte de -0.24 a 0.24 NTU e grau de pertinência máximo quando a Δe_{tu} é nulo, de modo que permitisse incorporar ao controlador *Fuzzy* uma forma de interpretação da estabilização da PV. Por fim, na Figura 75(c), as MFs da variável de saída $\Delta V01a_{ref}$ foram configuradas para que fosse possível uma atuação mais intensa quando necessário aumentar ou diminuir F_r na planta para corrigir a turbidez da água pós-flotador.

Portanto, com estas configurações e base de regras projetadas para o *Fuzzy*, a superfície de resposta obtida para o controlador segue representada na Figura 76.

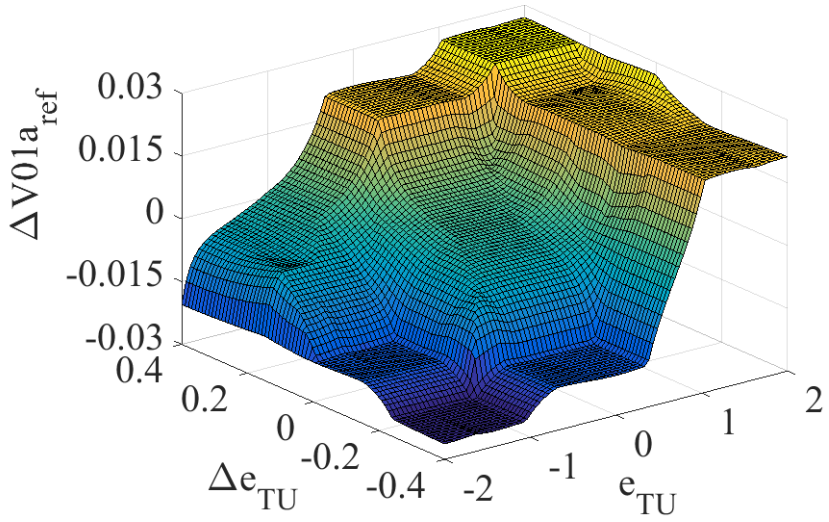


Figura 76 – Superfície de resposta do controlador *Fuzzy*.

Nota-se pela superfície de resposta que a atuação do controlador tende a ser mais intensa em situações em que e_{tu} e Δe_{tu} estão localizados próximos aos limites de seus universos de discurso. Verifica-se também que há tendência a uma atuação pouco mais branda quando e_{tu} encontra-se próximo do suporte da MF *Zero* e Δe_{tu} possui maior grau de pertinência para as MFs *Negativo* e *Positivo*.

Este comportamento foi projetado buscando a possível redução em F_r quando a PV estiver estabilizando no seu valor de *setpoint* após o *overshoot* inicial provocado pelo *start-up* da planta, como uma tentativa de reduzir o consumo energético da planta com a diminuição da vazão de reciclo em situação próxima ao estado estacionário. Assim, a malha de controle da estratégia MISO utilizando lógica *Fuzzy* para a turbidez da água pós-flotação é apresentada na Figura 77.

Nesta estratégia, assim como em SISO II, a pressão do vaso saturador foi mantida constante de acordo com um valor de *setpoint* igual a 6 bar, sendo manipulada a abertura da válvula V01a que reflete na modificação da fração de reciclo F_r e permite o controle da

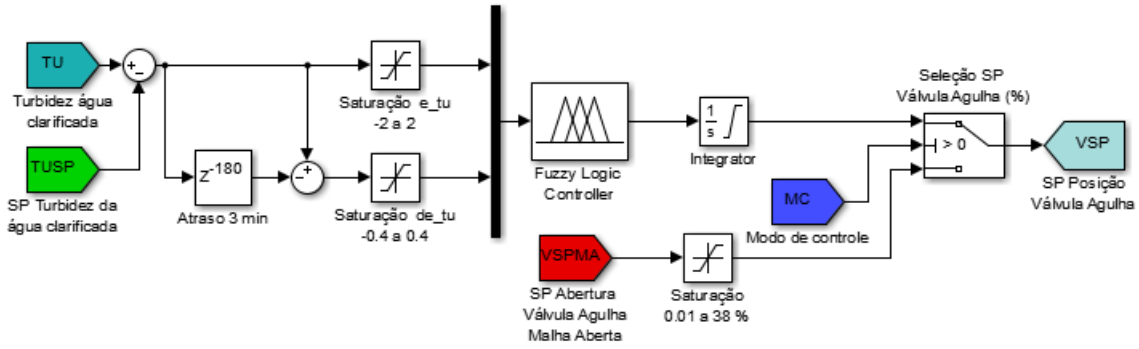


Figura 77 – Malha de controle da turbidez na estratégia MISO.

turbidez da água pós-flotador. A Figura 78 apresenta o comportamento dinâmico das variáveis na estratégia MISO usando o controlador *Fuzzy* descrito na seção 3.3.5.2, aqui denominado *Fuzzy* I.

A Figura 78(a) mostra que o controlador *Fuzzy* foi capaz de regular a turbidez da água pós-flotador, apresentando a capacidade de tentar reduzir F_r em situações em que a turbidez estava próxima ao valor de *setpoint* e com tendência de queda, o que é desejável como tentativa de reduzir o consumo energético do protótipo de FAD.

Na Figura 78(b) é possível verificar que a bomba P01 foi acionada 10 vezes ao longo do ensaio. Apesar de o controlador *Fuzzy* ter tentado reduzir F_r próximo a estabilização da PV, houve uma maior demanda de água saturada no início do ensaio. Isto acabou afetando o consumo de energia da planta de FAD que apresentou uma demanda de 0,34406 kW, representando um consumo Pot_t de 0,51609 kWh.

A dissolução de ar na água de reciclo, assim como para os ensaios em malha aberta e com SISO II, apresentou ligeira queda ao longo do ensaio decorrente do aumento da temperatura da água, conforme pode ser observado na Figura 79. Entretanto, essa queda não prejudicou a flotação, pois foi possível gerar micro-bolhas em quantidade suficiente para manter a turbidez em torno do seu valor de *setpoint*.

A análise do desempenho da estratégia MISO empregando o controlador *Fuzzy* I a partir dos dados apresentados na Tabela 17 permite verificar que, em relação ao ensaio da estratégia SISO II, houve uma pequena perda de desempenho.

Tabela 17 – Critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha *Fuzzy* I.

Critério	*Valor*	*Unidade*
IAE	6067,777	[NTU×s]
ISE	12649,641	[NTU^2 × s]
EC_{V01a}	951,832	[$V01a^2_{(\%)}$ × s]
EC_{V02}	36,0	[bar^2 × s]

Com exceção ao esforço de controle EC_{V02} que se manteve igual pois a pressão em TQ05 também foi mantida constante em 6 bar na estratégia MISO, todos os outros critérios apresentaram ligeiro aumento em seus valores finais em comparação à estratégia SISO II. Porém, a estratégia MISO ainda se mantém com desempenho muito superior à estratégia SISO I que empregava a pressão de TQ05 como MV.

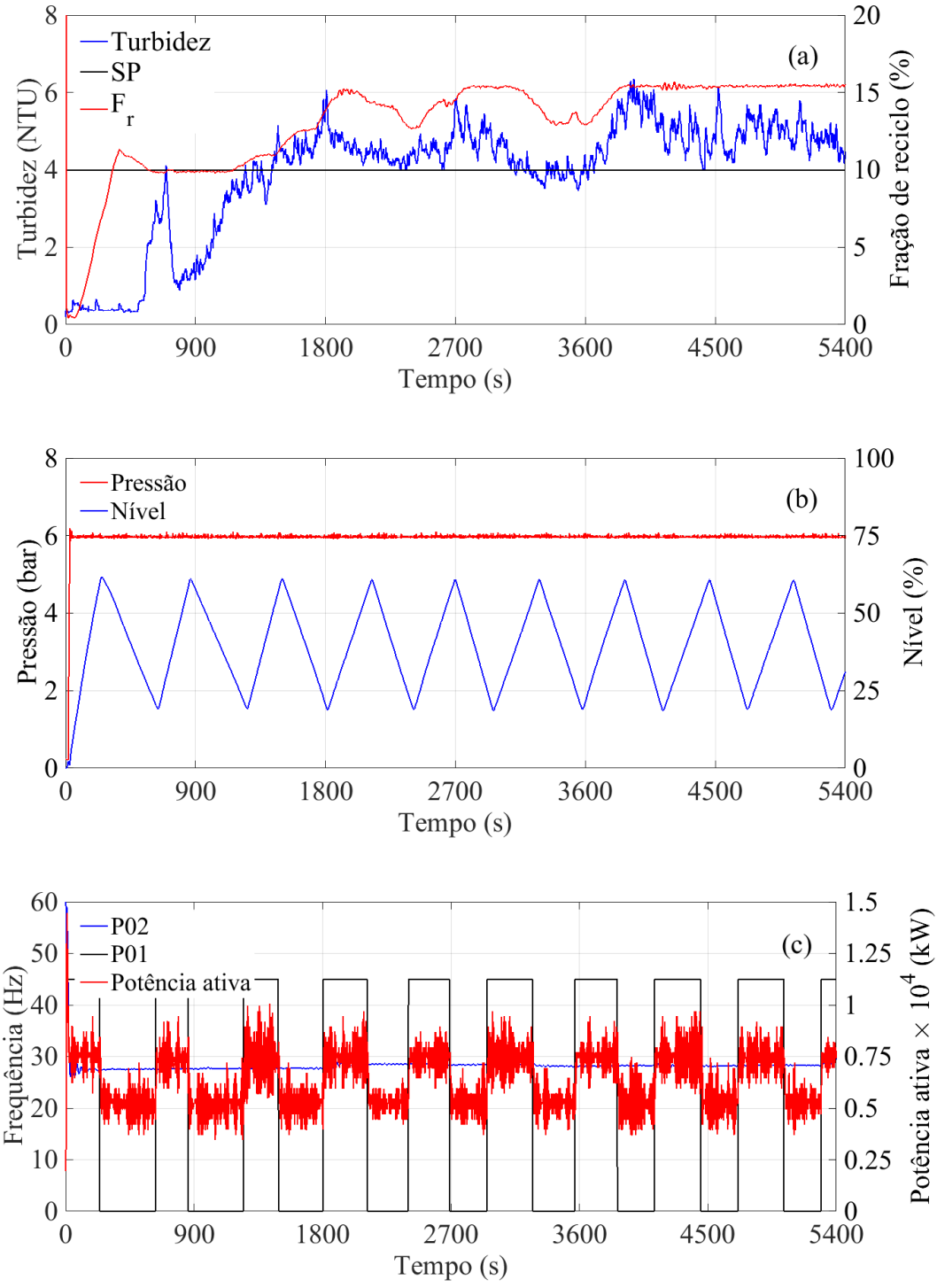


Figura 78 – Comportamento dinâmico das variáveis do protótipo de FAD com a estratégia MISO usando o controlador *Fuzzy* I.

O esforço de controle EC_{V01a} foi mais penalizado com o controlador *Fuzzy* I devido à tentativa de reduzir F_r conforme mencionado anteriormente.

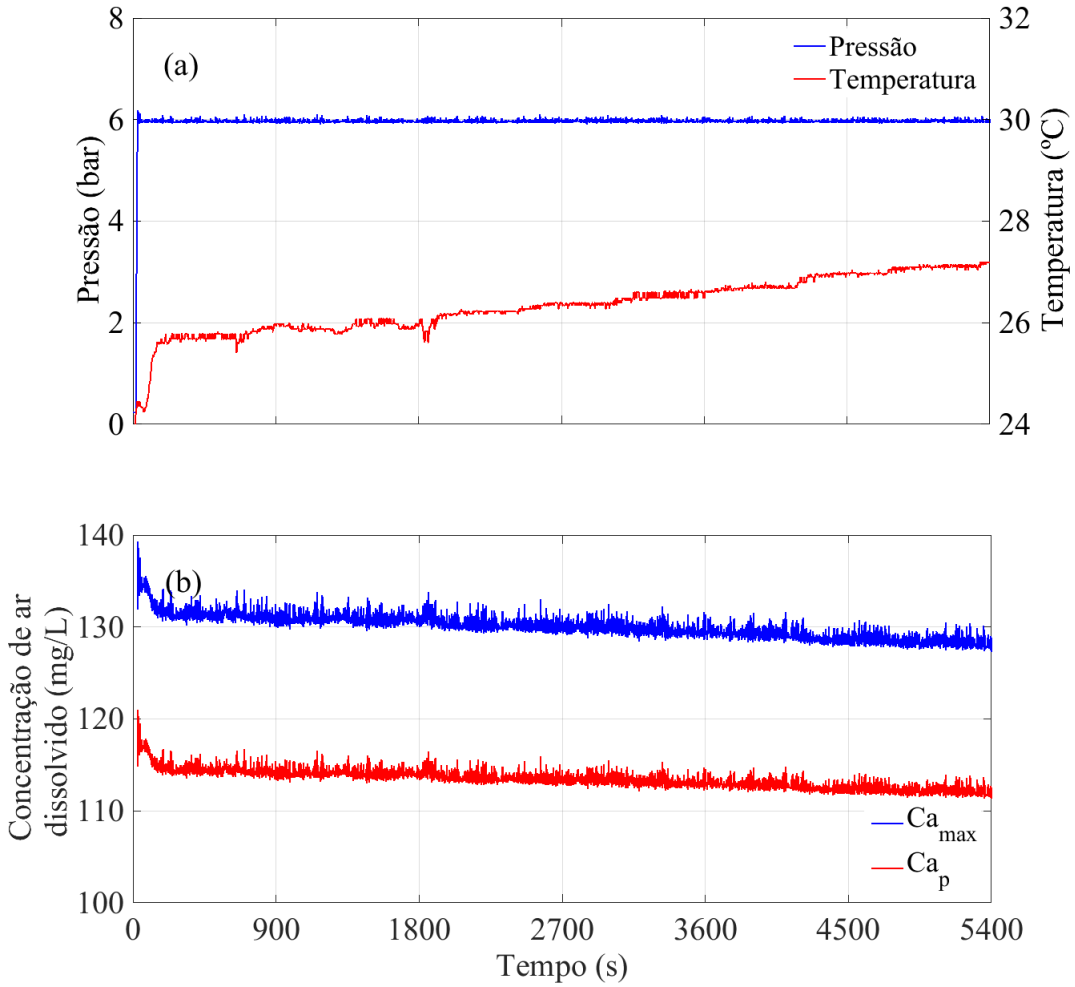


Figura 79 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com *Fuzzy* I (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b).

A Figura 80 apresenta o comportamento dinâmico do atuador e o reflexo em F_r na malha MISO com o controlador *Fuzzy* I, e a Tabela 18 apresenta os valores de turbidez da água filtrada e do pH no floculador medidos em intervalos de 30 min.

Tabela 18 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia MISO com *Fuzzy* I.

Tempo [s]	*Turbidez Pós-Filtro* [NTU]	*pH*
0	0,27	8,2
1800	0,31	8,1
3600	0,20	8,1
5400	0,40	8,0

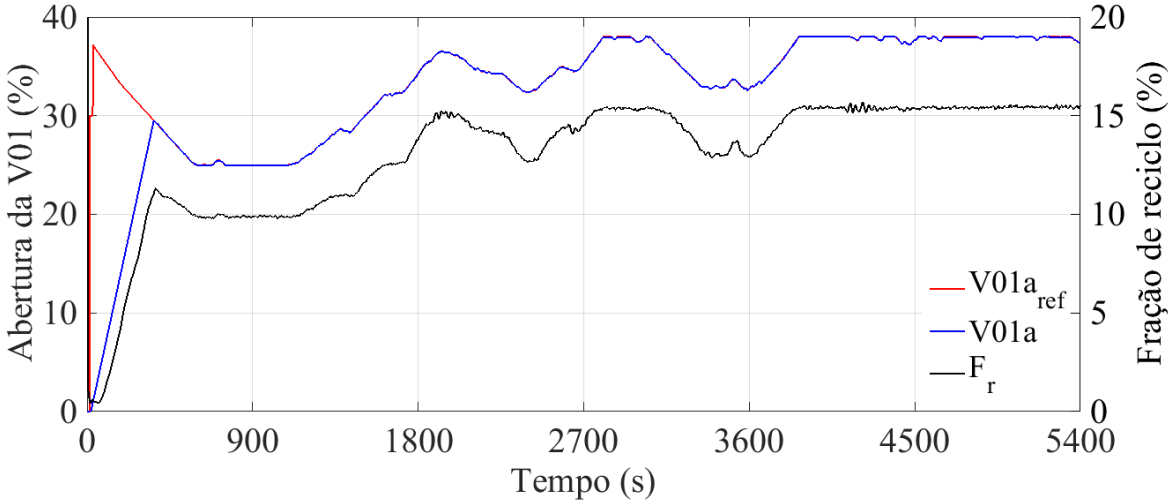


Figura 80 – Abertura da válvula V01a na estratégia MISO com *Fuzzy* I em comparação com F_r.

Como é possível verificar, o pH se manteve praticamente estável ao longo do ensaio, e a água filtrada teve sua turbidez reduzida até a 0,2 NTU.

O sistema de flotação foi capaz de remover aproximadamente 90 % da turbidez inicial do efluente, e a filtragem rápida capaz de aumentar a remoção de turbidez para 99,5 %, assim como observado para a estratégia SISO II.

Como uma forma de tentar melhorar o desempenho do *Fuzzy* I, uma modificação em sua configuração foi proposta. O universo de discurso da variável de saída $\Delta V01a_{ref}$ do controlador *Fuzzy* I estava configurado para a faixa -0,03 a 0,03 %. O aumento desta faixa permitiria ao controlador apresentar uma resposta mais rápida, possibilitando um possível melhor desempenho no controle da turbidez.

Desta forma, o universo de discurso da saída $\Delta V01a_{ref}$ foi reajustado para a faixa de -0,045 a 0,045 %, gerando uma nova configuração do controlador *Fuzzy*, agora denominado de *Fuzzy* II.

A Figura 81 apresenta o comportamento dinâmico das variáveis do processo de FAD com a malha MISO, porém agora empregando o controlador *Fuzzy* II.

É possível verificar na Figura 81(a) que a variação da saída do controlador foi acelerada em relação ao controlador *Fuzzy* I, e a turbidez da água pós-flotador também foi controlada em seu valor de *setpoint*. Nota-se que a partir do instante 3100 s a saída do controlador foi decrementada com o intuito de tentar reduzir F_r e assim buscar economizar energia.

Analisando também a Figura 82, verificamos que a dissolução máxima de ar na água de reciclo foi praticamente a mesma observada para as estratégias SISO II e MISO com o *Fuzzy* I, permitindo deduzir que a quantidade de micro-bolhas fornecidas no flotador variou apenas devido a F_r entre os ensaios.

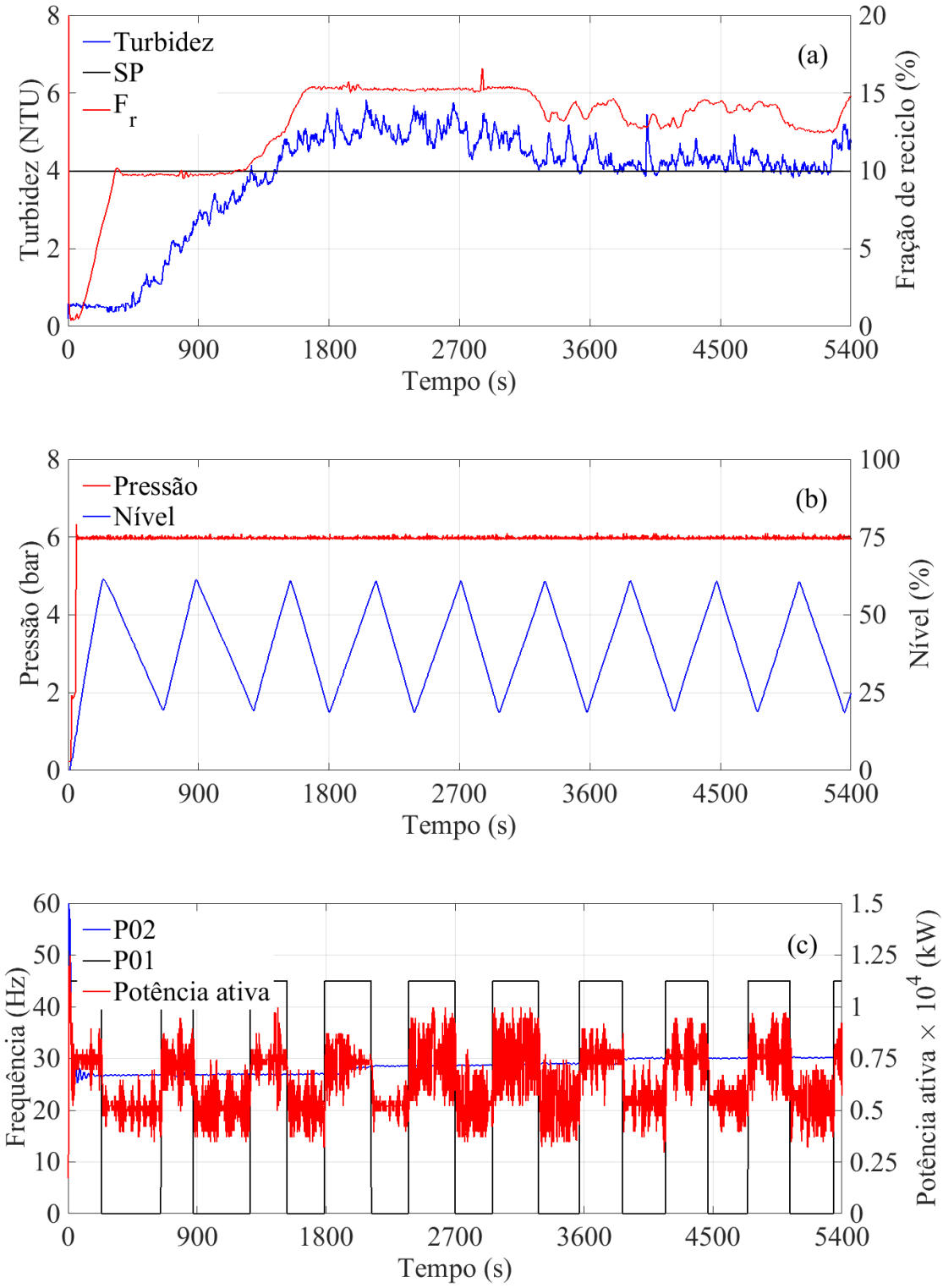


Figura 81 – Comportamento dinâmico das variáveis do protótipo de FAD com a estratégia MISO usando o controlador *Fuzzy* II.

A Figura 83 apresenta o comportamento dinâmico do atuador V01a e de F_r empregando o controlador *Fuzzy* II. Entretanto, analisando a Figura 81(b) é observado que a bomba P01 foi acionada 10 vezes, assim como quando foi empregado o controlador *Fuzzy* I.

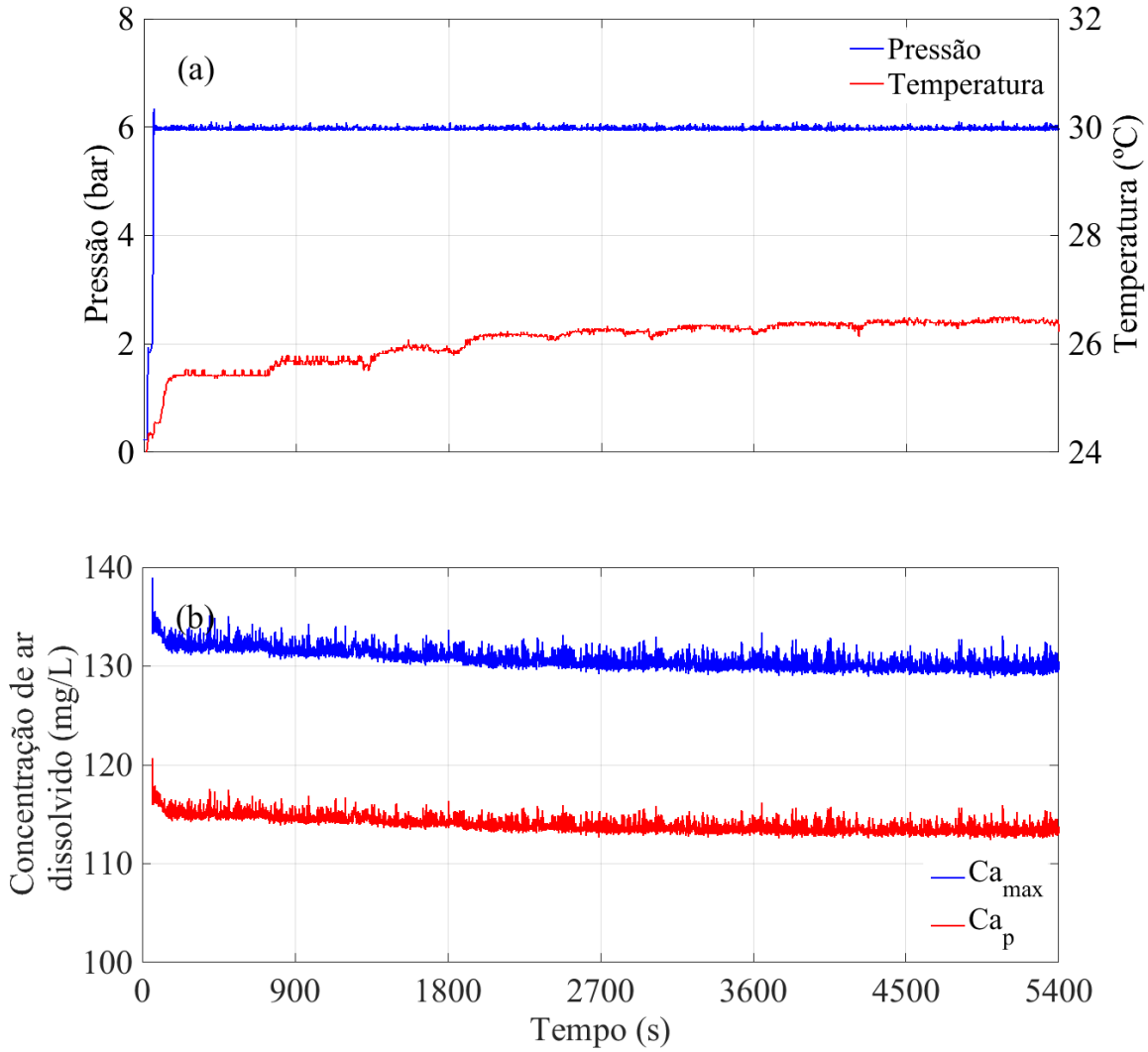


Figura 82 – Temperatura e pressão no vaso TQ05 com *Fuzzy* II (a) e comparação entre Ca_{max} e Ca_p calculados (b).

Esse aumento é decorrente do rápido aumento de F_r nos instantes iniciais do ensaio para regular a turbidez, requerendo maior volume de água de reciclo até o término do ensaio. Porém, devido à redução de F_r a partir do instante 3100 s, se os ensaios tivessem sido prolongados por mais tempo, provavelmente poderia ser observada uma redução no consumo de energia pelo menor número de acionamentos da P01.

Deste modo, a potência ativa totalizada com a estratégia MISO durante o ensaio empregando o controlador *Fuzzy* II foi igual a 0,34398 kW, o que equivale a um consumo Pot_t de 0,51596 kWh, que é praticamente o mesmo consumo obtido com a utilização do controlador *Fuzzy* I.

Portanto, verificamos que o uso dos controladores *Fuzzy* projetados neste trabalho, apesar de terem permitido o controle da variável de processo, não permitiram a redução do consumo de energia. Este fato não significa que não seja possível reduzir o consumo de energia

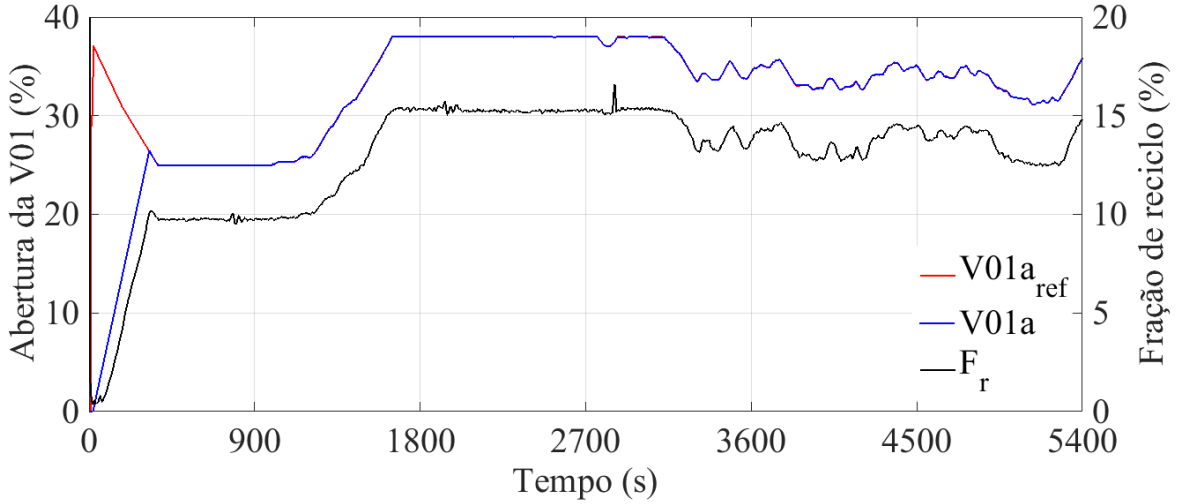


Figura 83 – Abertura da válvula V01a na estratégia MISO com *Fuzzy* II em comparação com F_r.

neste processo utilizando estratégias de controle, mas apenas que a estratégia proposta não permitiu simultaneamente o controle da PV com menor gasto de energia nos ensaios realizados.

Entretanto, em termos de desempenho do sistema de controle, com o controlador *Fuzzy* II foi observado uma redução nos valores finais dos critérios de desempenho IAE e ISE, com praticamente o mesmo esforço de controle verificado com o controlador *Fuzzy* I. Os valores de critérios de desempenho e esforços de controle usando o controlador *Fuzzy* II podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 – Critérios de desempenho IAE e ISE e de esforço de controle EC_{V01a} e EC_{V02} com a malha *Fuzzy* II.

Critério	*Valor*	*Unidade*
IAE	5255,286	[NTU×s]
ISE	10536,189	[NTU^2 × s]
EC_{V01a}	952,209	[$V01a^2_{(\%)}$ × s]
EC_{V02}	36,0	[bar^2 × s]

Com os valores de critérios de desempenho e esforços de controle para todas as malhas de controle testadas para a turbidez, foi possível construir a Tabela 20, que relaciona a redução destes parâmetros com os calculados com a estratégia SISO I. Desta forma, fica evidente o melhor desempenho da estratégia MISO empregando o controlador *Fuzzy* II, com os maiores valores de redução para os parâmetros.

O melhor desempenho na regulação da turbidez da água pós-flotador com o controlador *Fuzzy* II na estratégia MISO é uma vantagem que possivelmente permite maiores carreiras de filtração em uma planta de FAD. Isto porque menos flocos não seriam flotados e enviados para o filtro de areia, contaminando o elemento filtrante e acelerando a saturação do filtro.

Tabela 20 – Redução dos critérios de desempenho e esforços de controle em relação a SISO I.

Controle da Turbidez	IAE	ISE	EC_{V01a}	EC_{V02}
SISO II	66,89 %	83,69 %	22,80 %	74,43 %
MISO - Fuzzy I	66,07 %	82,94 %	22,39 %	74,43 %
MISO - Fuzzy II	70,61 %	85,79 %	22,36 %	74,43 %

Embora não tenha sido observado economia de energia com as estratégias manipulando a abertura da válvula V01a, como é possível verificar na Tabela 21, possivelmente maior economia de energia seria obtida com a etapa de retro-lavagem uma vez que viabilizaria uma maior carreira de filtração. Isto implica em menor consumo de água empregada para manter a planta operando, já que a retro-lavagem é realizada com água tratada na própria estação de tratamento, e o efluente gerado na retro-lavagem devendo ser retratado na estação.

Tabela 21 – Consumos de energia Pot_t e Pot_l nos ensaios.

Controle da Turbidez	Pot_t [kWh]	Pot_l [kWh/L]
Malha aberta	0,49924	0,001850
SISO I	0,49643	0,001832
SISO II	0,53475	0,001983
MISO -Fuzzy I	0,51609	0,001912
MISO - Fuzzy II	0,51596	0,001912

Por fim, analisando os valores de turbidez da água filtrada na Tabela 22, nota-se que assim como nos demais ensaios a turbidez foi reduzida a valores abaixo de 1 NTU com a estratégia MISO e o controlador *Fuzzy* II. Portanto, se enquadrando dentro do limite para o parâmetro de turbidez dos critérios de potabilidade.

Tabela 22 – Valores de pH no floculador e turbidez da água filtrada com a estratégia MISO com *Fuzzy* II.

Tempo [s]	*Turbidez Pós-Filtro* [NTU]	*pH*
0	0,51	8,0
1800	0,53	8,1
3600	0,30	8,2
5400	0,33	8,4

5 Conclusão

Neste projeto foi montada um planta em escala laboratorial para a realização de diversos trabalhos de pesquisa no desenvolvimento de novas tecnologias para o processo de flotação por ar dissolvido (FAD). Esta planta foi automatizada com instrumentos de medição de vazão, pressão, temperatura, nível, pH e turbidez, e com atuadores como inversores de frequência, válvula reguladora de pressão e motor de passo acoplado a válvula agulha.

Todos os equipamentos utilizados possuem transmissores de sinal de instrumentação que enviam e recebem estes sinais de um controlador lógico programável (CLP). Neste CLP foi implementada uma lógica em linguagem Ladder para aquisição de dados dos instrumentos e acionamento dos atuadores, além de realizar a comunicação via protocolo Ethernet com o sistema supervisório de controle e aquisição de dados (SCADA). O SCADA foi desenvolvido especificamente para a planta de FAD para facilitar a sua utilização posteriormente por outros pesquisadores.

Os sensores foram calibrados, tendo sido necessária a utilização de filtros digitais de sinal para remoção de interferências eletromagnéticas no sinal de instrumentação. Além disto, um filtro *Noise Spike Filter* teve que ser implementado para o sinal de turbidez da água pós-flotação por motivos relacionados a picos de leitura. Todos os filtros implementados apresentaram os efeitos desejados de eliminação de ruídos e picos nos sinais de leitura.

Por questão de segurança operacional, na planta de FAD foram implementadas malhas em *override* para a pressão no vaso saturador e para a vazão de reciclo. A malha *override* da pressão foi projetada para atuar na válvula reguladora de pressão sempre que a pressão do vaso saturador ultrapassar 7,5 bar por risco de danos aos equipamentos, e quando for reduzida a menos de 1 bar, por risco de contra fluxo na linha de reciclo ou ausência de micro-bolhas no flotador.

Já a malha *override* para a vazão de reciclo foi implementada porque vazões de reciclo acima de 500 $\mathrm{mL/min}$ danificam o medidor de vazão desta linha. Assim, essa malha *override* foi projetada para reduzir a abertura da válvula agulha sempre que a vazão de reciclo fosse maior que 501 $\mathrm{mL/min}$. Ambas as malhas foram testadas nas condições de insegurança operacional e foram capazes de corrigir a variável de processo para uma faixa de segurança.

Em termos de controle das variáveis envolvidas no processo de FAD, foram implementadas malhas de controle para a vazão de efluente na planta de FAD, para controle de posição do motor de passo que realiza a abertura e fechamento da válvula agulha e para controle do nível de água no vaso saturador.

Outro objetivo alcançado com este trabalho foi o desenvolvimento de estratégias de controle da turbidez da água pós-flotador. Duas variáveis manipuladas foram testadas no protótipo, a pressão do vaso saturador e a abertura da válvula agulha.

O controle da turbidez utilizando a pressão do vaso saturador como MV (SISO I) e mantendo a fração de reciclo controlada em 11 % apresentou uma resposta muito lenta, sem a estabilização da PV ao final do ensaio. Notou-se também que a manutenção de uma pressão muito baixa no início do ensaio contamina a zona de separação com flocos não agregados às micro-bolhas, resultando em diversos picos na leitura da turbidez da água flotada.

Além de ter apresentado os piores valores de IAE e ISE entre as malhas de controle da turbidez propostas neste projeto, demandou também os maiores esforços de controle da válvula reguladora de pressão e da válvula agulha. E, em termos de consumo de energia, apresentou consumo de mesma ordem de grandeza observado para operação em malha aberta para a turbidez.

Por outro lado, o controle da turbidez atuando na abertura da válvula agulha que permite a variação da fração de reciclo do sistema de FAD (SISO II), apresentou bons resultados na regulação da variável de processo. Com esta variável manipulada, três controladores diferentes foram testados sendo um proporcional-integral (PI) e outros dois *Fuzzy*. Nos três ensaios, a turbidez da água flotada foi controlada para próximo do valor de *setpoint*, tendo sido observadas diferenças nos critérios de desempenho e nos esforços de controle da válvula agulha.

Utilizando a estratégia SISO II, foi verificado o menor esforço de controle da válvula agulha, entretanto a variável manipulada ficou saturada no valor máximo em boa parte do ensaio. Em comparação à estratégia SISO I, foram observadas reduções de 66,89 %, 83,69 %, 22,80 % e 74,43 % nos critérios IAE, ISE e esforços de controle das válvulas agulha e reguladora de pressão, respectivamente.

O objetivo de desenvolvimento de controladores *Fuzzy* foi alcançado com a implementação de dois controladores (*Fuzzy* I e *Fuzzy* II) na malha de controle da turbidez. O desempenho do sistema de controle da turbidez utilizando o controlador *Fuzzy* inicialmente projetado neste trabalho (*Fuzzy* I) foi ligeiramente inferior ao desempenho da malha com o controlador PI. Em relação à malha empregando a pressão do vaso como MV, foram verificadas reduções de 66,07 %, 82,94 %, 22,39 % e 74,43 % nos critérios IAE, ISE e esforços de controle das válvulas agulha e reguladora de pressão, respectivamente.

Os resultados do ensaio com o *Fuzzy* modificado (*Fuzzy* II) para acelerar sua ação de controle proporcionaram o melhor ajuste da turbidez da água pós-flotador em relação às demais estratégias em termos de critérios de desempenho. Em comparação à estratégia SISO I, foram notadas reduções de 70,61 %, 85,79 %, 22,36 % e 74,43 % nos critérios IAE, ISE e esforços de controle das válvulas agulha e reguladora de pressão, respectivamente.

Desta forma, os resultados positivos alcançados empregando o controlador *Fuzzy* nas condições específicas avaliadas neste trabalho, evidenciam o seu potencial uso no controle da

turbidez em sistemas FAD em escala industrial. Este foi um dos primeiros trabalhos desenvolvidos projetando sistemas de controle para FAD, abrindo amplas possibilidades para estudos aprofundados na área, com vistas à difusão desta tecnologia.

Quanto ao consumo de energia pelo protótipo de FAD, embora tenha sido possível realizar o controle da turbidez atuando na abertura da válvula agulha e com um controlador *Fuzzy*, foi verificado um aumento de aproximadamente 3,2 % no consumo de energia em relação à operação da planta em malha aberta. Porém, esse pequeno aumento do consumo de energia durante o processo de flotação é compensado pelo aumento da carreira de filtração, devido à padronização da turbidez da água na saída do flotador.

Com a flutuação incontrolada da turbidez em malha aberta, há a saturação mais rápida do elemento filtrante no filtro de areia. Em contrapartida, com a turbidez controlada em malha fechada é possível mantê-la próxima ao valor de *setpoint* e reduzir a carga de flocos não flotados enviados ao sistema de filtragem, evitando consumo adicional de água limpa na lavagem do filtro.

Portanto, embora tenha sido observado um aumento muito pequeno no consumo de energia com a implementação de malha fechada para a turbidez, a regulação desta variável no processo de flotação mostrou-se vantajosa, por ser capaz de lidar com alterações nas condições de operação, motivando o uso da automação em sistemas FAD e o desenvolvimento de novos testes e tecnologias nesta área.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos com a utilização de malha fechada para a turbidez da água pós-flotador foram promissores e motivam a realização de trabalhos futuros com a planta de FAD. A seguir seguem algumas sugestões para trabalhos futuros como continuidade deste projeto:

- Projeto de malha de controle do pH de floculação atuando nas vazões de biopolieletrólito e aluminato de sódio para melhor padronizar as condições de floculação;
- Comparação entre válvulas agulhas com diferentes valores de Cv para geração de microbolhas e regulação da fração de reciclo, e sua eficiência na FAD;
- Análise da eficiência do vaso saturador com e sem recheio na dissolução do ar na água de reciclo e sua eficiência na FAD;
- Desenvolvimento de um controlador *Fuzzy* multivariável que tenha como entrada a concentração de ar dissolvido predita pelo método de Bahadori *et al.* (2013), e que atue tanto na fração de reciclo como na pressão do vaso saturador;

- Avaliar o desempenho dos sistemas de controle da turbidez na rejeição dos efeitos de perturbações introduzidas no processo como a alteração da turbidez do efluente a ser tratado;
- Testes envolvendo outros efluentes e agentes floculantes e coagulantes;
- Uso da técnica de redes neurais para gerar modelos caixa-preta do processo de flotação por ar dissolvido.

Referências Bibliográficas

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, AND WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard Methods for the Examination of WAter and Waste Water*. 21. ed. Washington, DC, 2005.

BACELO, H. A. M.; SANTOS, S. C. R.; BOTELHO, C. M. S. Tannin-based biosorbents for environmental applications - a review. *Chemical Engineering Journal*, v. 303, p. 575 – 587, 2016.

BAHADORI, A.; ZAHEDI, G.; ZENDEHBOUDI, S.; BAHADORI, M. Estimation of air concentration in dissolved air flotation (daf) systems using a simple predictive tool. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 91, p. 184 – 190, 2013.

BELLO, O.; HAMAN, Y.; DJOUANI, K. Fuzzy dynamic modelling and predictive control of a coagulation chemical dosing unit for water treatment plants. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, v. 1, p. 129 – 143, 2014.

BERGH, L. G.; YIANATOS, J. B. Flotation column automation: state of the art. *Control Engineering Practice*, v. 11, p. 67 – 72, 2003.

BOUCHARD, J.; DESBIENS, A.; DEL VILLAR, R.; NUNEZ, E. Column flotation simulation and control: An overview. *Minerals Engineering*, v. 22, p. 519 – 529, 2009.

BRADY, N. C. *Natureza e propriedade dos solos*. 7ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Freitas Bastos, 1989.

BRATBY, J.; MARAIS, G. V. R. Saturator performanc in dissolved-air (pressure) flotation. *Water Research*, v. 9, p. 929 – 936, 1975.

CARVALHO, M. T.; DURÃO, F. Control of a flotation column using fuzzy logic inference. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 125, p. 121 – 133, 2002.

CARVALHO, M. T.; SOUSA, J. M.; DURÃO, F.; MARTINS, P. M. Real time fuzzy control of column flotation process. *Annual Review in Automatic Programming*, v. 19, p. 73 – 78, 1994.

CHEN, A.; WANG, Z.; YANG, J. Influence of bubble size on the fluid dynamic behavior of a daf tank: A 3d numerical investigation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 495, p. 200 – 207, 2016.

COSTA, T. V.; FILETI, A. M. F.; OLIVEIRA-LOPES, L. C.; DA SILVA, F. V. Reconfigurable stabilizing control applied to a neutralization process. *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 31, p. 1652 – 1656, 2012.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, K. J. H. D. W.; TCHOBANOGLOUS, G. *MWH´S Water Treatment: Principles and Design*. 3ª. ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.

CROSSLEY, I. A.; VALADE, M. T. A review of the technological developments of dissolved air flotation. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, v. 55.7-8, p. 479 – 491, 2006.

DA SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. *Automação e controle discreto*. 9ª. ed. São Paulo: Editora Érica, 1998.

DASSEY, A.; THEEGALA, C. Optimizing the air dissolution parameters in an unpacked dissolved air flotation system. *Water*, v. 4, p. 1 – 11, 2012.

DE ALBUQUERQUE, P. U. B.; DE ALEXANDRIA, A. R. *Redes Industriais: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído*. 2ª. ed. Fortaleza: Edições Livro Técnico, 2007. 193 - 194 p.

DE MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. *Engenharia de Automação Industrial*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2015. 143 - 145 p.

EDZWALD, J. K. Principles and application of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, v. 31.3-4, p. 1 – 23, 1995.

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. *Water Research*, v. 44, p. 2077 – 20106, 2010.

FILETI, A. M. F.; PEDROSA, L. S.; PEREIRA, J. A. F. R. A self tuning controller for multicomponent batch distillation with soft sensor inference based on a neural network. *Computers and Chemical Engineering*, v. 23.1, p. 261 – 264, 1999.

FONSECA, R. R.; FILETI, A. M. F.; FRANCO, I. C.; DA SILVA, F. V. Experimental fuzzy/split-range control: novel strategy for biodiesel batch reactor temperature control. *Chemical Engineering Communications*, v. 203, p. 1251 – 1259, 2016.

FONSECA, R. R.; SCHMITZ, J. E.; FILETI, A. M. F.; DA SILVA, F. V. A fuzzy - split range control system applied to a fermentation process. *Bioresource Technology*, v. 142, p. 475 – 482, 2013.

GHANSEM, N. M. Design of fuzzy logic controller for regulating the temperature in industrial polyethylene fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 84(A2), p. 97 – 106, 2006.

GRAHAM, N.; GANG, F.; FOWLER, G.; WATTS, M. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based cationic polymer: A preliminary assessment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 327, p. 9 – 16, 2008.

HAARHOFF, J. Dissolved air flotation: progess and prospects for drinking water treatment. *Journal of Water Supply: Reserach and Tecnology - Aqua*, v. 57.8, p. 555 – 567, 2008.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation modelling: Insigths and shortcomings. *Journal of Water Supply: Reserach and Tecnology - Aqua*, v. 53.3, p. 127 – 150, 2004.

HAMEED, Y. T.; IDRIS, A.; HUSSAIN, S. A.; ABDULLAH, N. A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to polyaluminum chloride, and application in a pilot plant. *Journal of Environmental Management*, v. 184, p. 494 – 503, 2016.

HAN, M. Y. Modeling of daf: The effect of particle and bubble characteristics. *Journal of Water Supply: Reserach and Tecnology - Aqua*, v. 51.1, p. 27 – 34, 2002.

HARNISCHMACHER, G.; MARQUARDT, W. Nonlinear model predictive control of multivariable processes using block-structured models. *Control Engineering Practice*, v. 15, p. 1238 – 1256, 2007.

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size. *Water Research*, v. 68, p. 262 – 272, 2015.

LEPPINEN, D. M. Trajectory analysis and collision efficiency during microbubble flotation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 212, p. 431 – 442, 1999.

LEPPINEN, D. M. A kinetic model of dissolved air flotation including the effects of interparticle forces. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, v. 49.5, p. 259 – 268, 2000.

NASCIMENTO JR., C. L.; YONEYAMA, T. *Inteligência artificial em controle e automação*. 3ª. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2004. 68 - 91 p.

OGUNNAIKE, B. A.; RAY, W. H. *Process Dynamics, Modeling, and Control*. 1ª. ed. New York: Oxford University Press, 1994.

REALI, M. A. P. *Avaliação de um sistema original compacto para clarificação de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação e filtração com taxa declinante*. 373 p. Tese (doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater tratment technique. *Minerals Engineering*, v. 15, p. 139 – 155, 2002.

RYKAART, E. M.; HAARHOFF, J. Behaviour of air injection nozzles in dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, v. 31.3-4, p. 25 – 35, 1995.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; SOLERA-HERNÁNDEZ, C. Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. pilot plant trials. *Journal of Environmental Management*, v. 91, p. 2051 – 2058, 2010.

SEBORG, D. *Process Dynamics and Control*. 2ª. ed. Hoboken, NJ: Editora Wiley, 2004.

SHEAN, B. J.; CILLIERS, J. J. A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing*, v. 100, p. 57 – 71, 2011.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2ª. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007. 13 - 16 e 45 - 56 p.

SKRJANC, I.; BLAZIC, S.; OBLAK, S.; RICHALET, J. An approach to predictive control of multivariable time-delayed plant: Stability and design issues. *ISA Transactions*, v. 43, p. 585 – 595, 2004.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

STEPHANOPOULOS, G. *Chemical Process Control*. 1ª. ed. New Jersey: Editora Prentice Hall, 1984. 407 - 409 p.

TCHOBANOGLOUS, G. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse / Metcalf & Eddy Inc.* 3ª. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

THOMPSON JR, J. P. *Investigação da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente de lavanderia industrial utilizando coagulante de fonte renovável: Tanino.* Tese (Mestrado em Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

VIEIRA, S. M.; SOUSA, J. M. C.; DURÃO, F. O. Fuzzy modelling strategies applied to a column flotation process. *Minerals Engineering*, v. 18, p. 725 – 729, 2005.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

XIAOPING, Y.; ALDRICH, C. Optimizing control of coal flotation by neuro-immune algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 23, p. 407 – 413, 2013.

YINFEI, L.; JIONGTIAN, L.; YONGTIAN, W.; YIJUN, C. Simulating a fuzzy level controller for flotation columns. *Mining Science and Technology (China)*, v. 21, p. 815 – 818, 2011.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338 – 353, 1965.

Apêndices

APÊNDICE A – P&IDs da planta de FAD

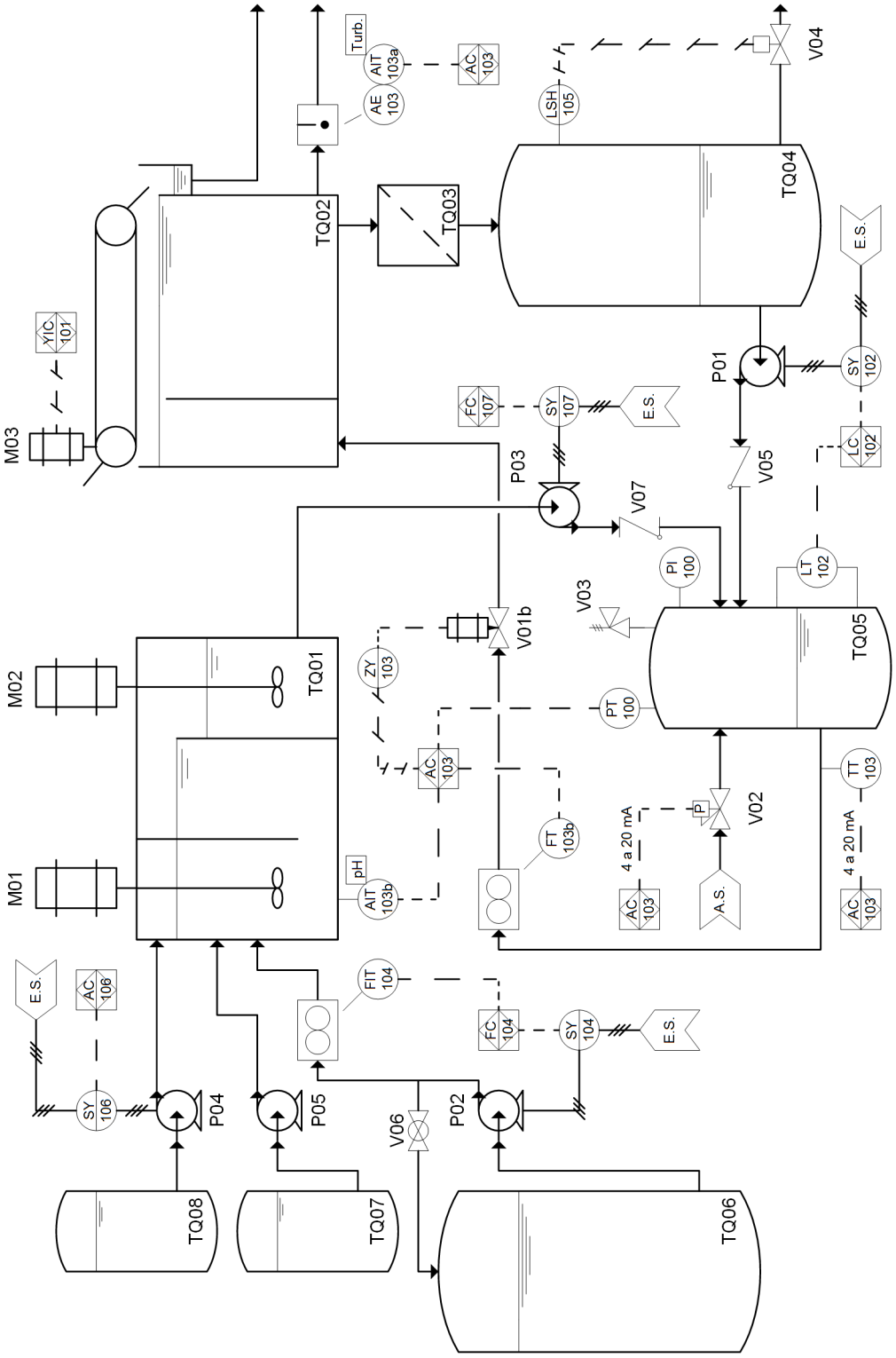


Figura 84 – P&ID no modo Pressurização Total.

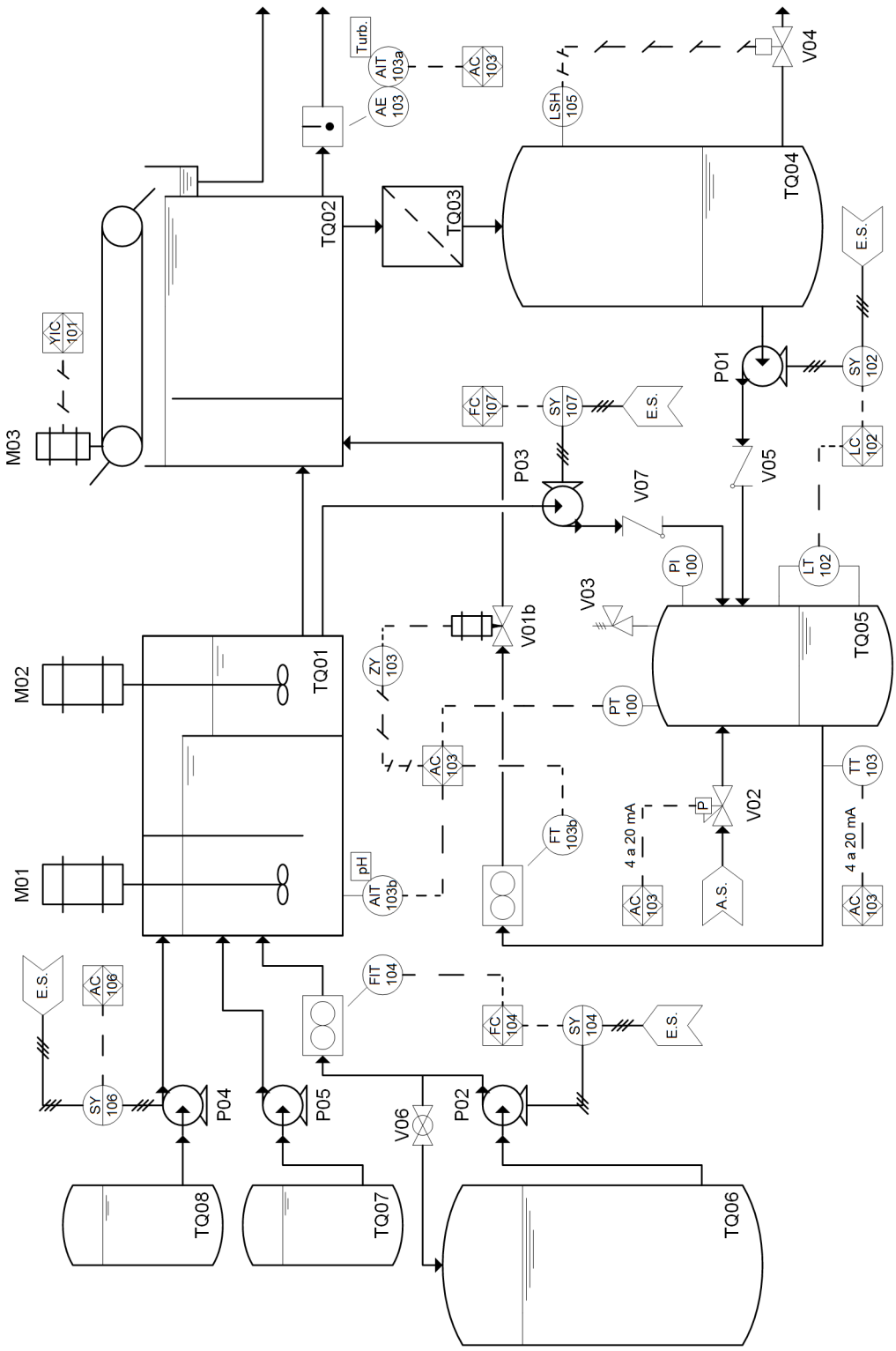


Figura 85 – P&ID no modo Pressurização Parcial.

APÊNDICE B – Mapa de conexão elétrica - Fornecimento de energia

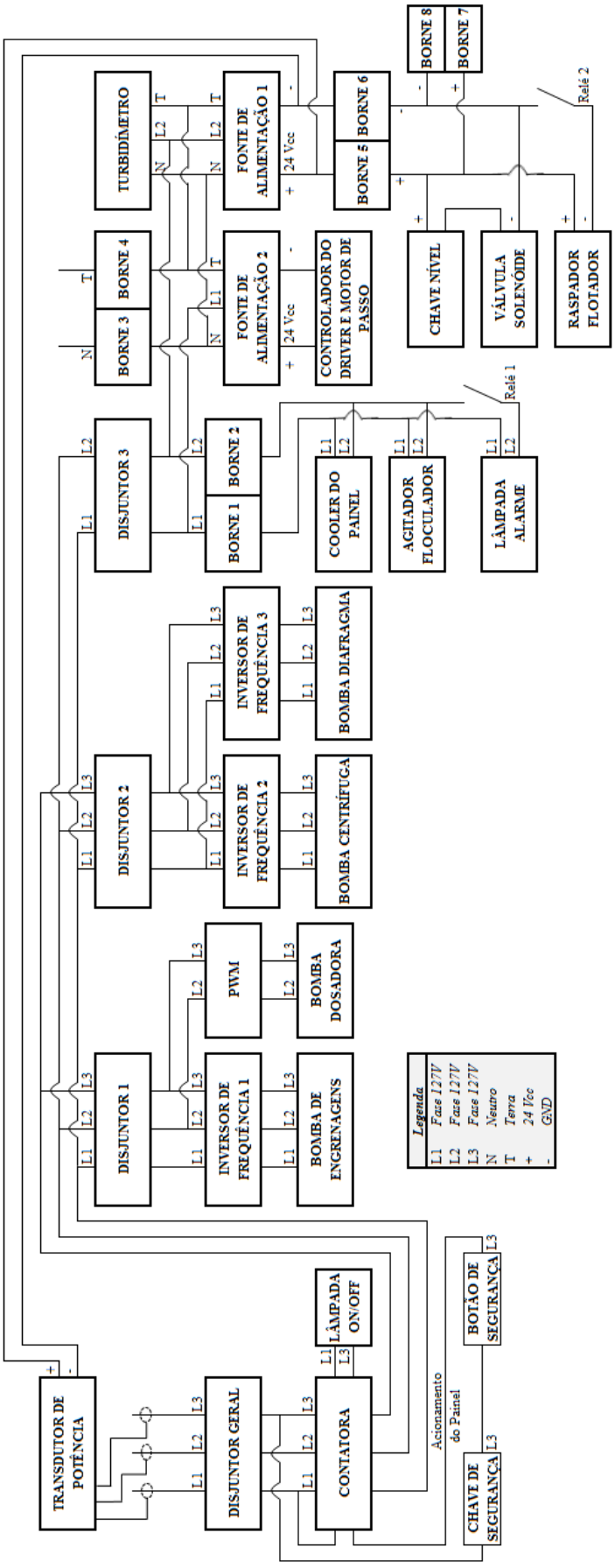


Figura 86 – Mapa de conexão elétrica para energização do protótipo de FAD.

APÊNDICE C – Mapa de conexão elétrica - Instrumentação

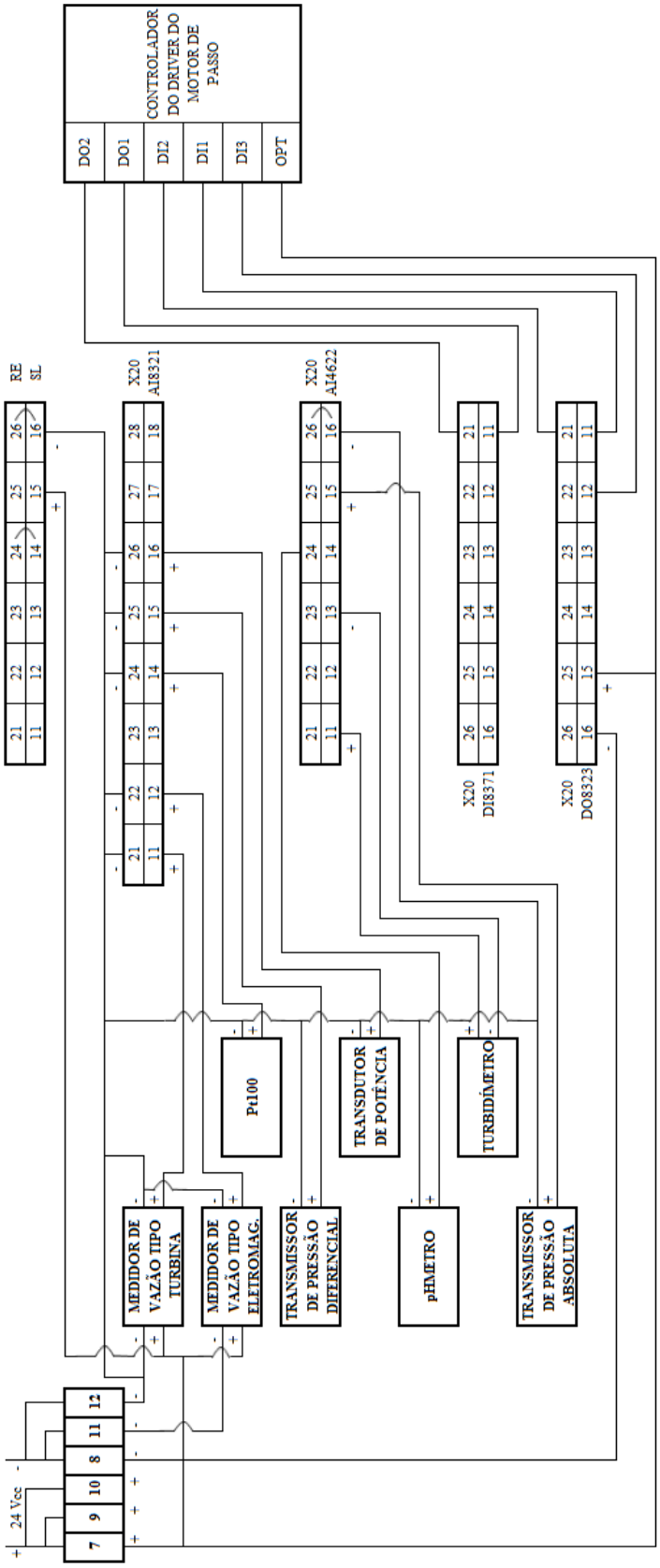


Figura 87 – Mapa de conexão elétrica para instrumentação do protótipo de FAD. (Parte I)

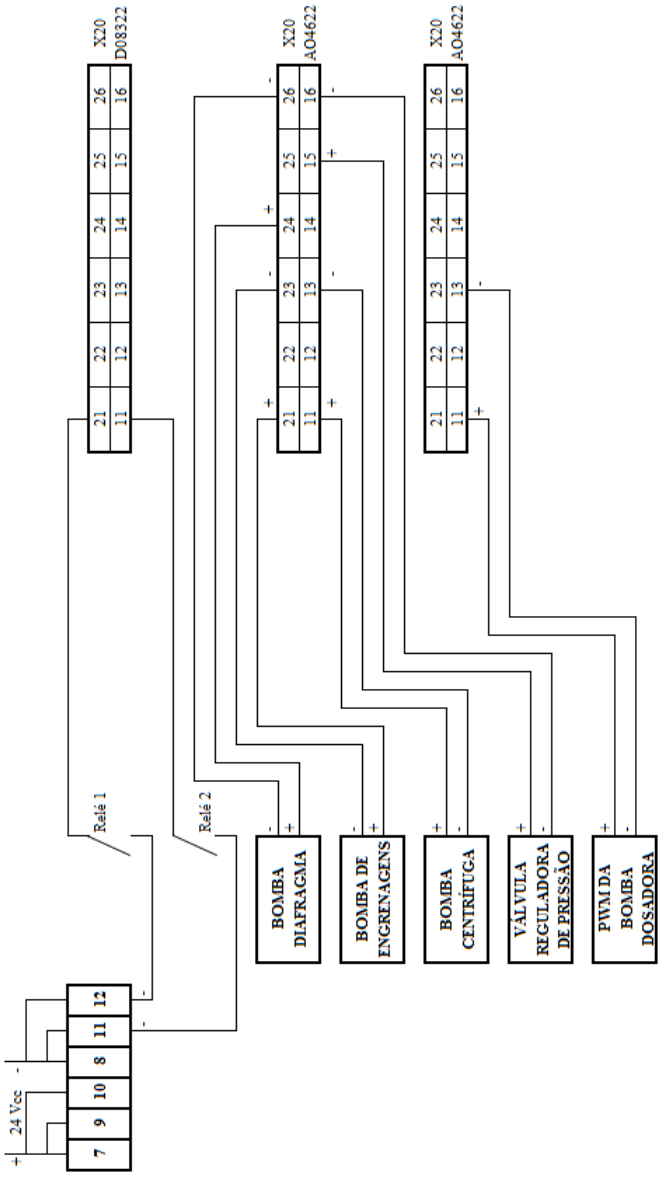


Figura 88 – Mapa de conexão elétrica para instrumentação do protótipo de FAD. (Parte II)

APÊNDICE D – Programa de aplicação do CLP

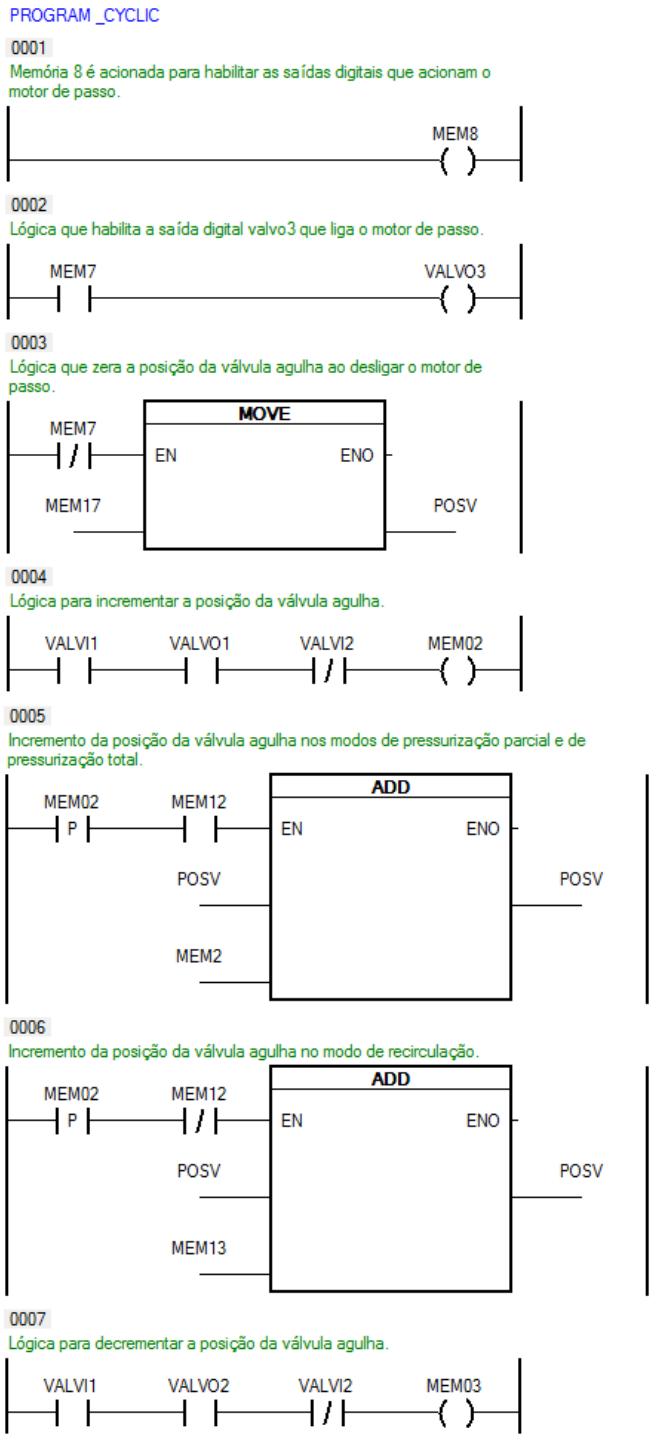


Figura 89 – Programa de aplicação do CLP. (Parte I)

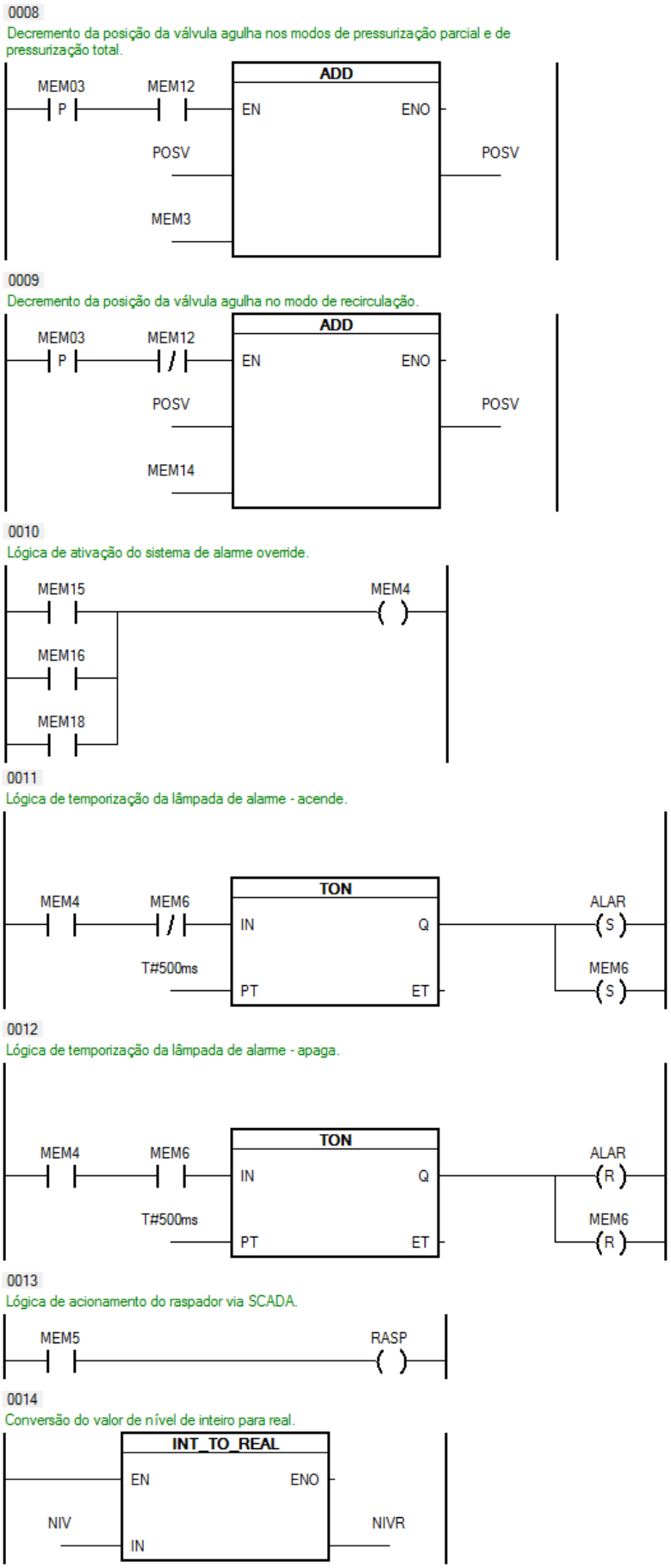


Figura 90 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte II)

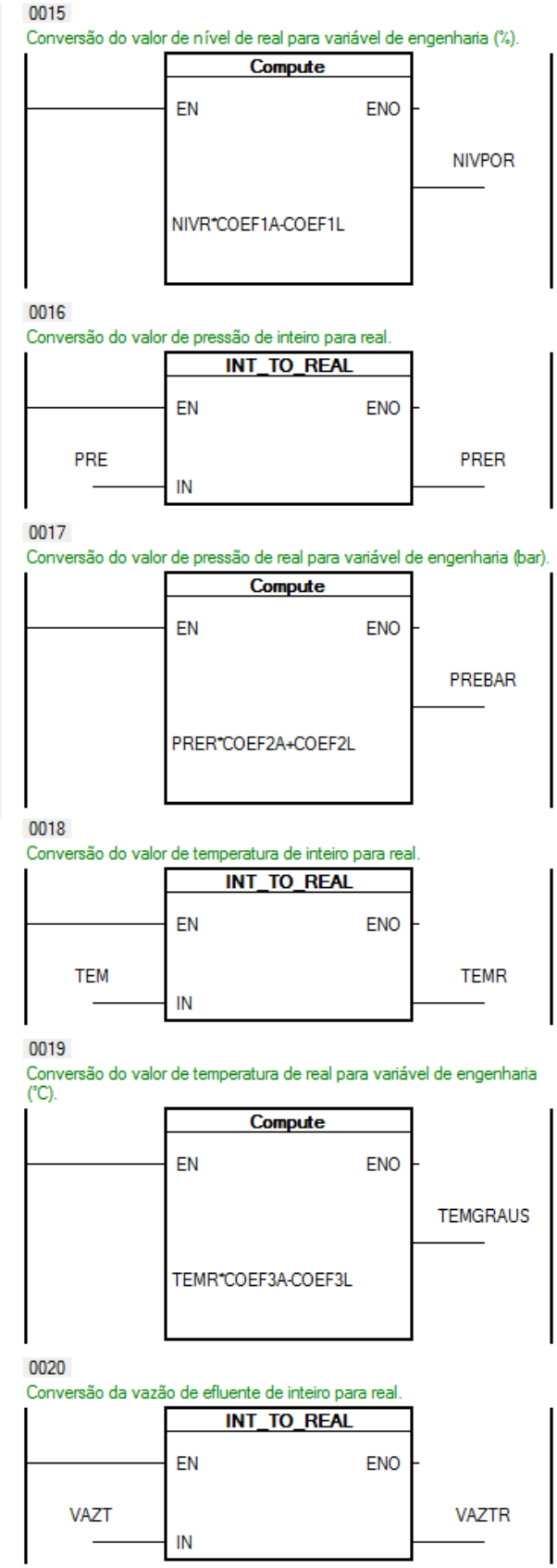


Figura 91 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte III)

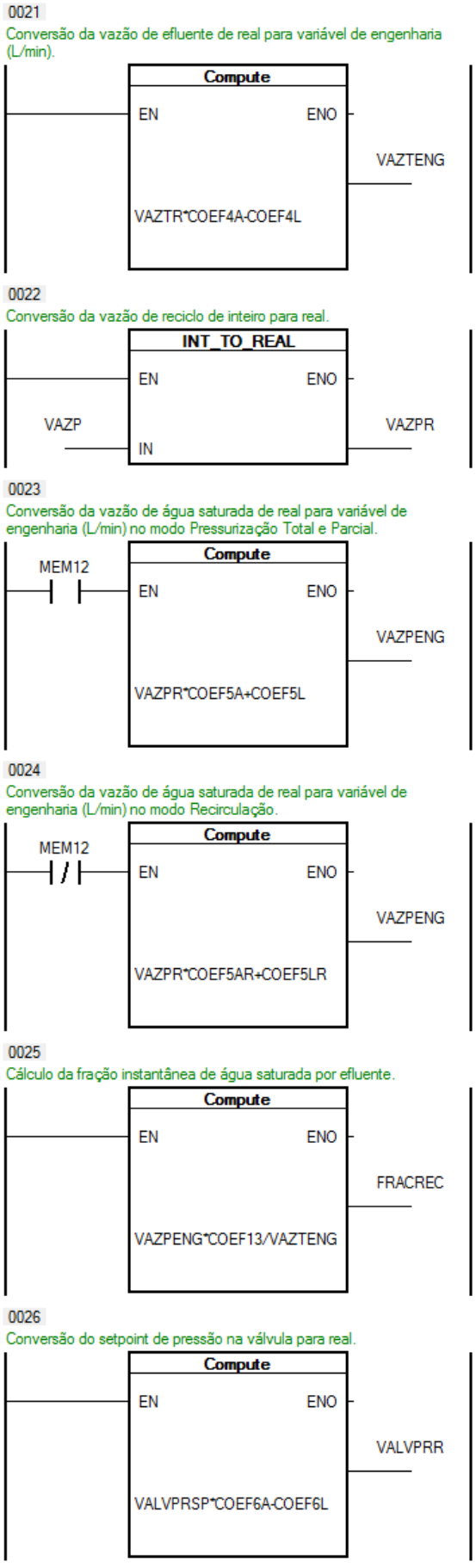


Figura 92 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte IV)

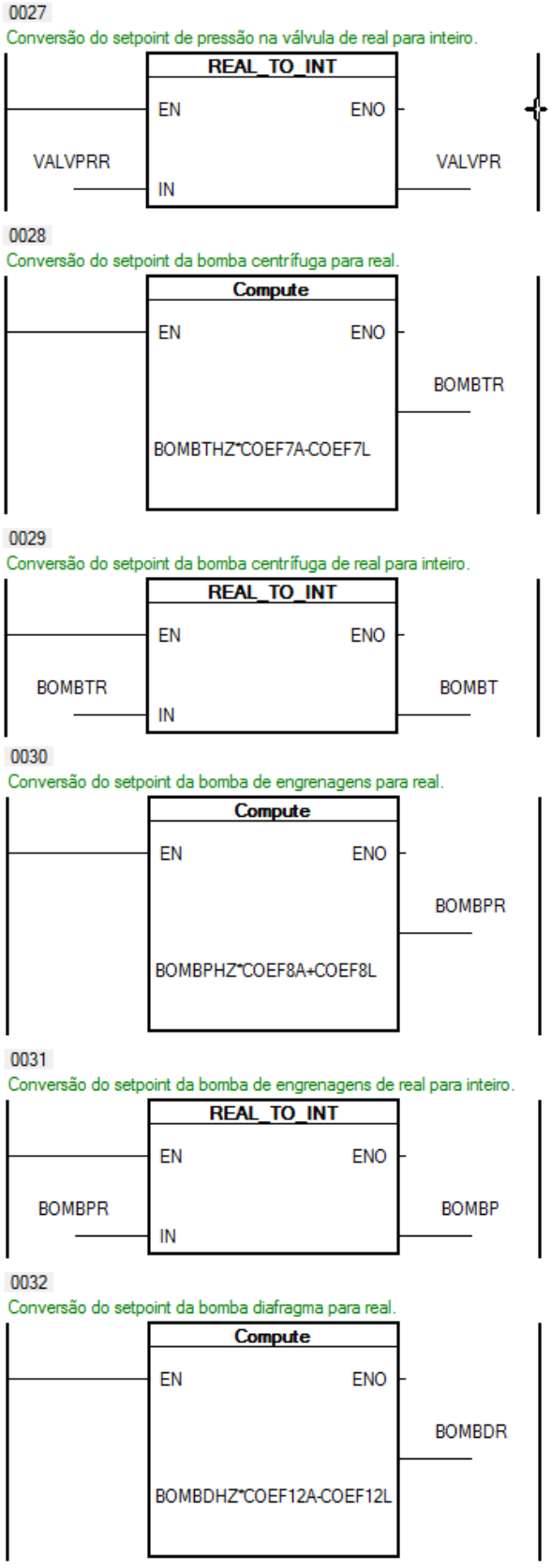


Figura 93 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte V)

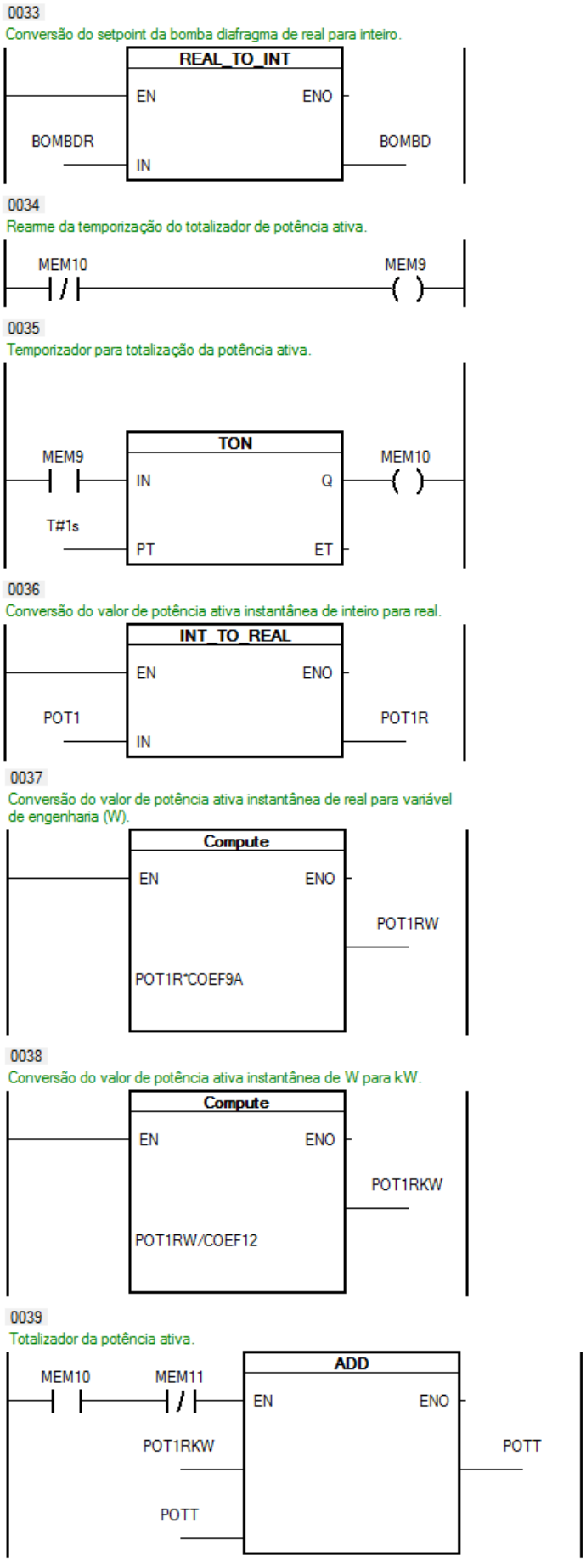


Figura 94 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte VI)

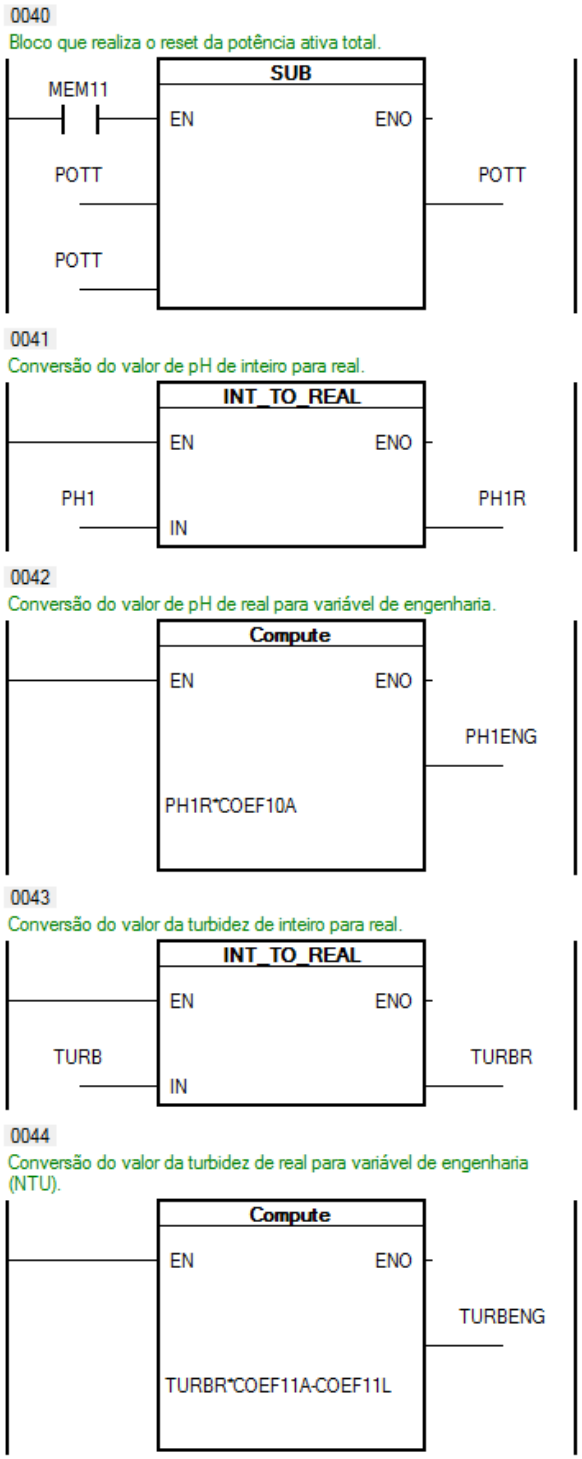


Figura 95 – Continuação do programa de aplicação do CLP. (Parte VII)

APÊNDICE E – Mapa de memórias do CLP

Tabela 23 – Mapa de memórias do CLP. (Parte I)

TAG	Descrição	Tipo	Valor
TURB	Turbidez da água pós-flotador	INT	-
TURBR	Turbidez da água pós-flotador em var. real	REAL	-
TURBENG	Turbidez da água pós-flotador em NTU	REAL	-
NIV	Nível de água no vaso saturador	INT	-
NIVR	Nível de água no vaso saturador em var. real	REAL	-
NIVPOR	Nível de água no vaso saturador em $\%$	REAL	-
PRE	Pressão manométrica do vaso saturador	INT	-
PRER	Pressão manométrica do vaso saturador em var. real	REAL	-
PREBAR	Pressão manométrica do vaso saturador em bar	REAL	-
TEM	Temperatura da água no vaso saturador	INT	-
TEMR	Temperatura da água no vaso saturador em var. real	REAL	-
TEMGRAUS	Temperatura da água no vaso saturador em $^{\circ}\mathrm{C}$	REAL	-
VAZT	Vazão de efluente na planta	INT	-
VAZTR	Vazão de efluente na planta em var. real	REAL	-
VAZTENG	Vazão de efluente na planta em m^3/h	REAL	-
VAZP	Vazão da linha de reciclo	INT	-
VAZPR	Vazão da linha de reciclo em var. real	REAL	-
VAZPENG	Vazão da linha de reciclo em L/min	REAL	-
FRACREC	Fração instantânea de reciclo	REAL	-
PH1	pH do efluente no floculador	INT	-
PH1R	pH do efluente no floculador em var. real	REAL	-
PH1ENG	pH do efluente no floculador em unid. de engenharia	REAL	-
VALVI1	Entrada para controle de posição da V01	BOOL	1
VALVI2	Entrada de indicação de saturação da V01	BOOL	1
BOMBT	Sinal de contr. da bomba de efluente	INT	-
BOMBTR	Sinal de contr. da bomba de efluente em var. real	REAL	-
BOMBTHZ	Valor de ref. da bomba de efluente em Hz	REAL	-
BOMBP	Sinal de contr. da bomba de reciclo	INT	-
BOMBPR	Sinal de contr. da bomba de reciclo em var. real	REAL	-
BOMBPHZ	Valor de ref. da bomba de reciclo em Hz	REAL	-
BOMBD	Sinal de contr. da bomba diafragma	INT	-
BOMBDR	Sinal de contr. da bomba diafragma em var. real	REAL	-
BOMBDHZ	Valor de ref. da bomba diafragma em Hz	REAL	-
BOMBPERI	Sinal de contr. da bomba peristáltica	INT	-
BOMBPERIR	Sinal de contr. da bomba peristáltica em var. real	REAL	-
BOMBPERIPOR	Valor de ref. da bomba peristáltica em $\%$	REAL	-

Tabela 24 – Mapa de memórias do CLP. (Parte II)

TAG	**Descrição**	**Tipo**	**Valor**
RASP	Acionamento do raspador	BOOL	0
ALAR	Indicação de alarme - malha *override*	BOOL	0
VALVPR	Sinal contr. V02	INT	-
VALVPRR	Sinal contr. V02 em var. real	REAL	-
VALVPRSP	Valor *setpoint* da pressão da V02	REAL	-
VALVO1	Saída digital incremento na posição da V01a	BOOL	0
VALVO2	Saída digital decremento na posição da V01a	BOOL	0
VALVO3	Saída para acionamento do motor de passo	BOOL	0
HOME	Variável não utilizada	BOOL	0
LIMINF	Variável não utilizada	BOOL	0
LIMSUP	Variável não utilizada	BOOL	0
POT1	Potência ativa instantânea	INT	0
POT1R	Potência ativa instantânea em var. real	REAL	-
POT1RW	Potência ativa instantânea em W	REAL	-
POT1RKW	Potência ativa instantânea em kW	REAL	-
POTT	Potência ativa totalizada em W	REAL	-
POSV	Posição instantânea da válvula agulha em $\%$	REAL	-
MEM02	Mem. booleana para ativação do incremento V01a	BOOL	0
MEM2	Mem. cálc. incremento da V01b	REAL	0.0110091
MEM03	Mem. booleana para ativação do decremento V01a	BOOL	0
MEM3	Mem. cálc. decremento da V01b	REAL	-0.0110091
MEM4	Mem. aux. para ativação do alarme de *override*	BOOL	0
MEM5	Mem. aux. para acionamento do raspador	BOOL	0
MEM6	Mem. aux. de intertravamento do alarme	BOOL	0
MEM7	Mem. interna para acionamento o motor de passo	BOOL	0
MEM8	Mem. aux. para saídas do cartão DO8323	BOOL	1
MEM9	Mem. aux. 1 acionamento do módulo de soma da pot.	BOOL	0
MEM10	Mem. aux. 2 acionamento do módulo de soma da pot.	BOOL	0
MEM11	Mem. aux. 3 *reset* da soma da pot. ativa total	BOOL	0
MEM12	Mem. aux. para modos press. total e parcial	BOOL	0
MEM13	Mem. cálc. incremento da V01a	REAL	0.0093168
MEM14	Mem. cálc. decremento da V01a	REAL	-0.0093168
MEM15	Mem. aux. de acionamento do *override* do nível	BOOL	0
MEM16	Mem. aux. de acionamento do *override* da pressão	BOOL	0
MEM17	Mem. aux. que zera a posição V01a	REAL	0.0
MEM18	Mem. aux. de acionamento *override* Q_r	BOOL	-
COEF1A	Coef. angular correlação nível	REAL	0.006642
COEF1L	Coef. linear correlação nível	REAL	3.157.755
COEF2A	Coef. angular correlação pressão	REAL	0.000613
COEF2L	Coef. linear correlação pressão	REAL	0.269505
COEF3A	Coef. angular correlação temperatura	REAL	0.002985
COEF3L	Coef. linear correlação temperatura	REAL	0.067674
COEF4A	Coef. angular correlação vazão de efluente	REAL	0.000124
COEF4L	Coef. linear correlação vazão de efluente	REAL	0.016118

Tabela 25 – Mapa de memórias do CLP. (Parte III)

TAG	**Descrição**	**Tipo**	**Valor**
COEF5A	Coef. angular ajuste Q_r modo press. total e parcial	REAL	0.000328
COEF5L	Coef. linear ajuste Q_r modo press. total e parcial	REAL	0.352501
COEF5AR	Coef. angular ajuste Q_r modo reciclo	REAL	0.0000159
COEF5LR	Coef. linear ajuste Q_r modo reciclo	REAL	0.0118753
COEF6A	Coef. angular ajuste V02	REAL	3.120.479.204
COEF6L	Coef. linear ajuste V02	REAL	161.234.177
COEF7A	Coef. angular ajuste bomba P02	REAL	54.163.333
COEF7L	Coef. linear ajuste bomba P02	REAL	40.266.667
COEF8A	Coef. angular ajuste bomba P01	REAL	549.006.804
COEF8L	Coef. linear ajuste bomba P01	REAL	3.380.718
COEF9A	Coef. angular ajuste transdutor de potência	REAL	0.000025432
COEF10A	Coef. angular ajuste do pHmetro	REAL	0.000427
COEF11A	Coef. angular ajuste do turbidímetro	REAL	0.003052
COEF11L	Coef. linear ajuste do turbidímetro	REAL	-
COEF12A	Coef. angular ajuste da bomba P03	REAL	529.115
COEF12L	Coef. linear ajuste da bomba P03	REAL	239.19
COEF12	Coef. para ajuste da potência em W para kW	REAL	1000
COEF13	Coef. para cálculo da F_r	REAL	100
COEF14A	Coef. angular para ajuste da bomba P04	REAL	17.682.198
COEF14L	Coef. linear para ajuste da bomba P04	REAL	101.995.221
CICLOS	Mem. acionamento da lógica dos ciclos	BOOL	0

APÊNDICE F – Mapa de endereçamento das I/Os do CLP

Tabela 26 – Mapa de endereçamento da entradas do CLP.

Variável de Entrada	Slot	Cartão	Porta
Vazão Efluente	1	AI8321	11
Vazão Ág. Satur.	1	AI8321	12
Temperatura	1	AI8321	14
Nível	1	AI8321	15
Potência Ativa	1	AI8321	16
Turbidez	2	AI4622	11
Pressão	2	AI4622	14
pH	2	AI4622	24
DO1 do contr. driver	3	DI8371	11
DO2 do contr. driver	3	DI8371	21

Tabela 27 – Mapa de endereçamento das saídas do CLP.

Variável de Saída	Slot	Cartão	Porta
Raspador	4	DO8322	11
Lâmp. Alarmes	4	DO8322	21
Bomba P02	5	AO4622	11
Válv. Reg. Pressão	5	AO4622	15
Bomba P01	5	AO4622	21
Bomba P03	5	AO4622	24
DI1 do contr. driver	6	DO8323	11
DI3 do contr. driver	6	DO8323	12
DI5 do contr. driver	6	DO8323	13
DI2 do contr. driver	6	DO8323	21
DI4 do contr. driver	6	DO8323	22
DI6 do contr. driver	6	DO8323	23
Bomba P04	7	AO4622	11

APÊNDICE G – Algoritmo do *driver* para controle de posição

```
HSPD=5000
LSPD=1000
ACC=600
ABS
PX=0
V1=0
V2=0
V3=32000
V4=10
V5=31990
WHILE 1 = 1
 IF DI3 = 1
  EO=1
  GOSUB 1
 ELSEIF V1 = 0
  EO=0
 ELSE
  XV2
  WAITX
  EO=0
  V1=V2
 ENDIF
ENDWHILE
END
;***************
SUB 1
IF DI1 = 1
 IF V1 >= V5
  DO2=1
 ELSE
  DO1=0
  DO2=0
  V1=V1+3
  XV1
  WAITX
  DO1=1
  DELAY=50
 ENDIF
ELSEIF DI2 = 1
 IF V1 <= V4
  DO2=1
 ELSE
  DO1=0
  DO2=0
  V1=V1-3
  XV1
  WAITX
  DO1=1
  DELAY=50
 ENDIF
ENDIF
ENDSUB
```

APÊNDICE H – Avaliação dos filtros digitais e *Noise Spike Filter*

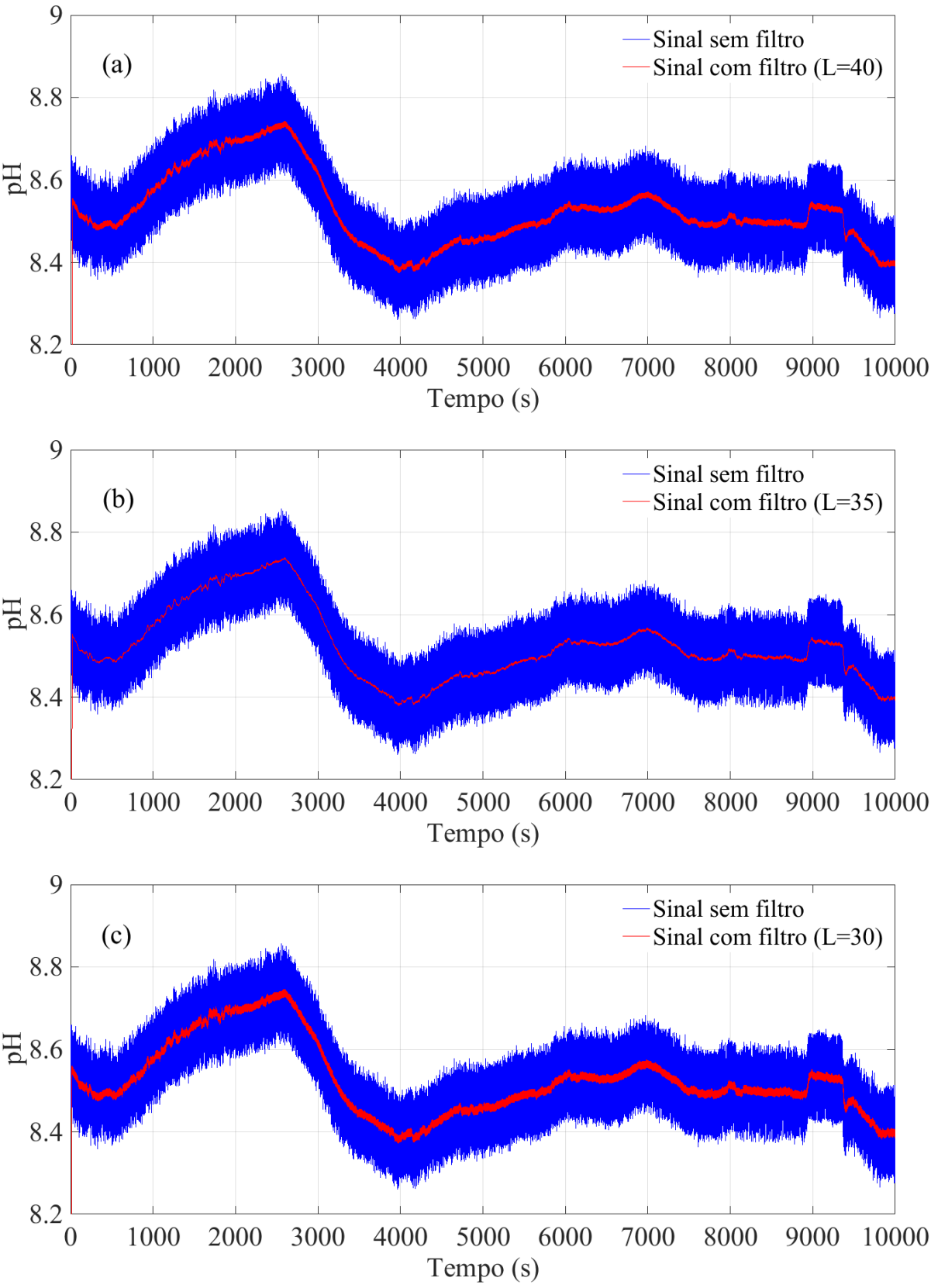


Figura 96 – Determinação de L para o filtro do sinal de pH.

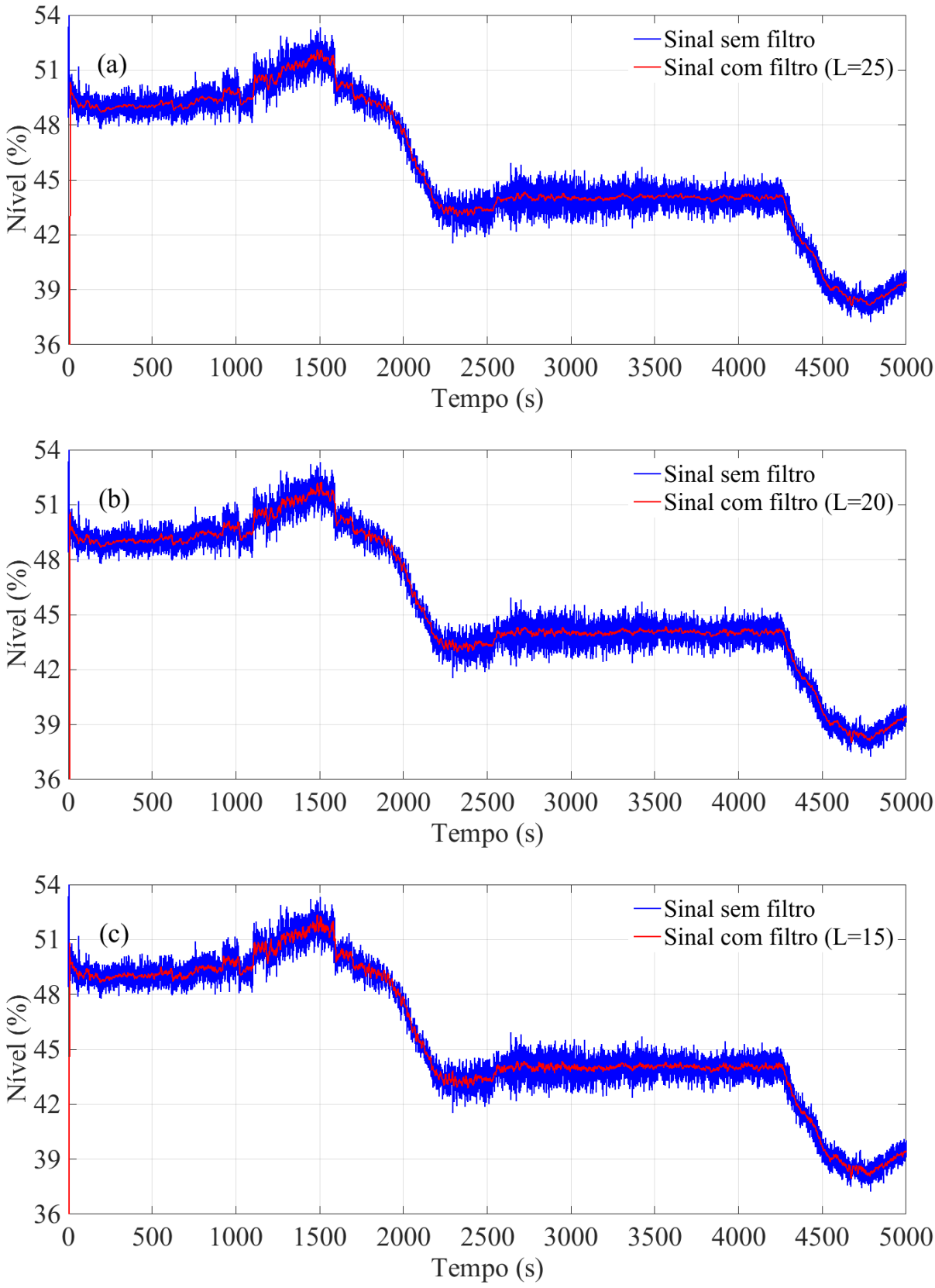


Figura 97 – Determinação de L para o filtro do sinal de nível.

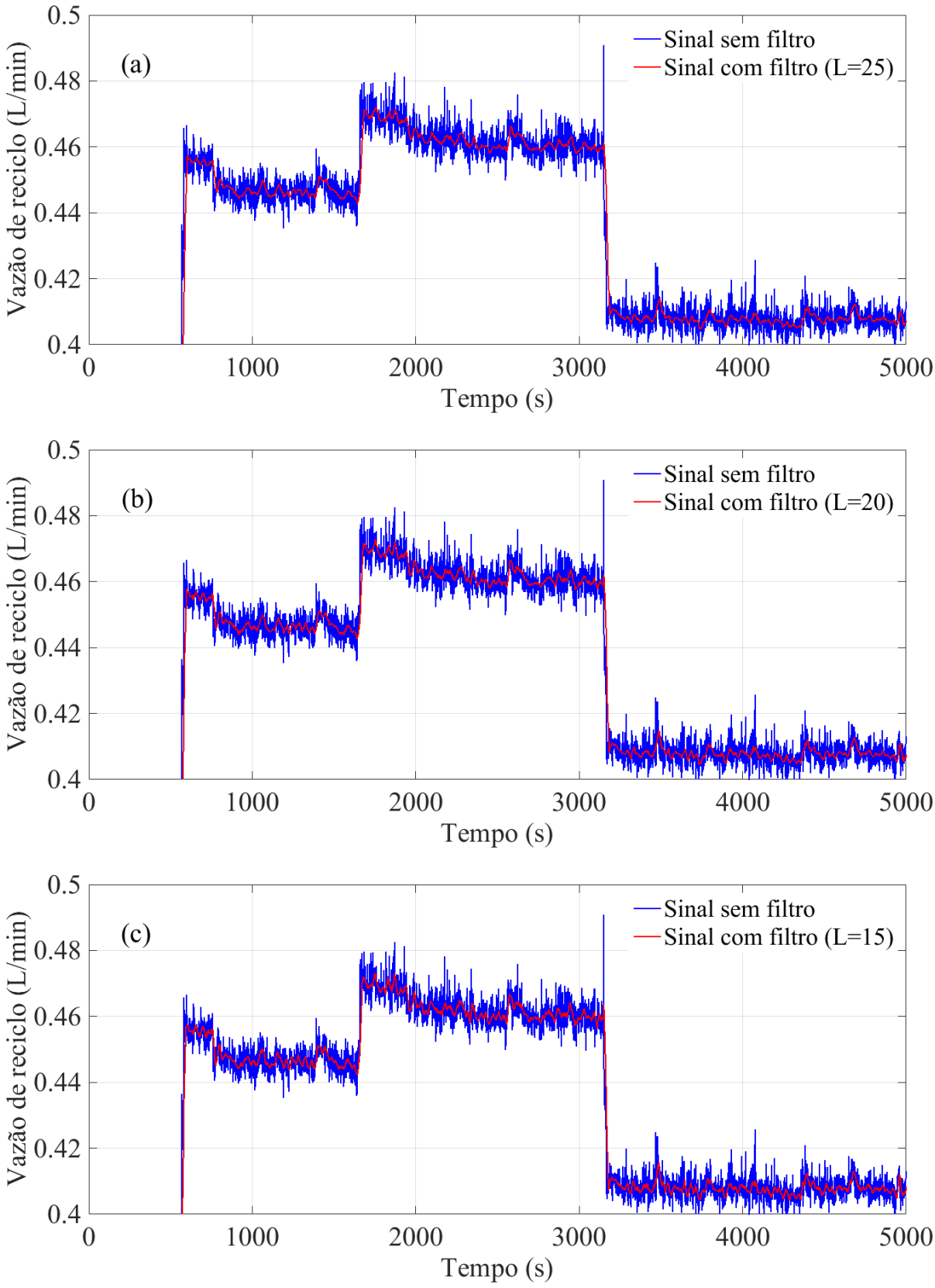


Figura 98 – Determinação de L para o filtro do sinal de vazão de reciclo.

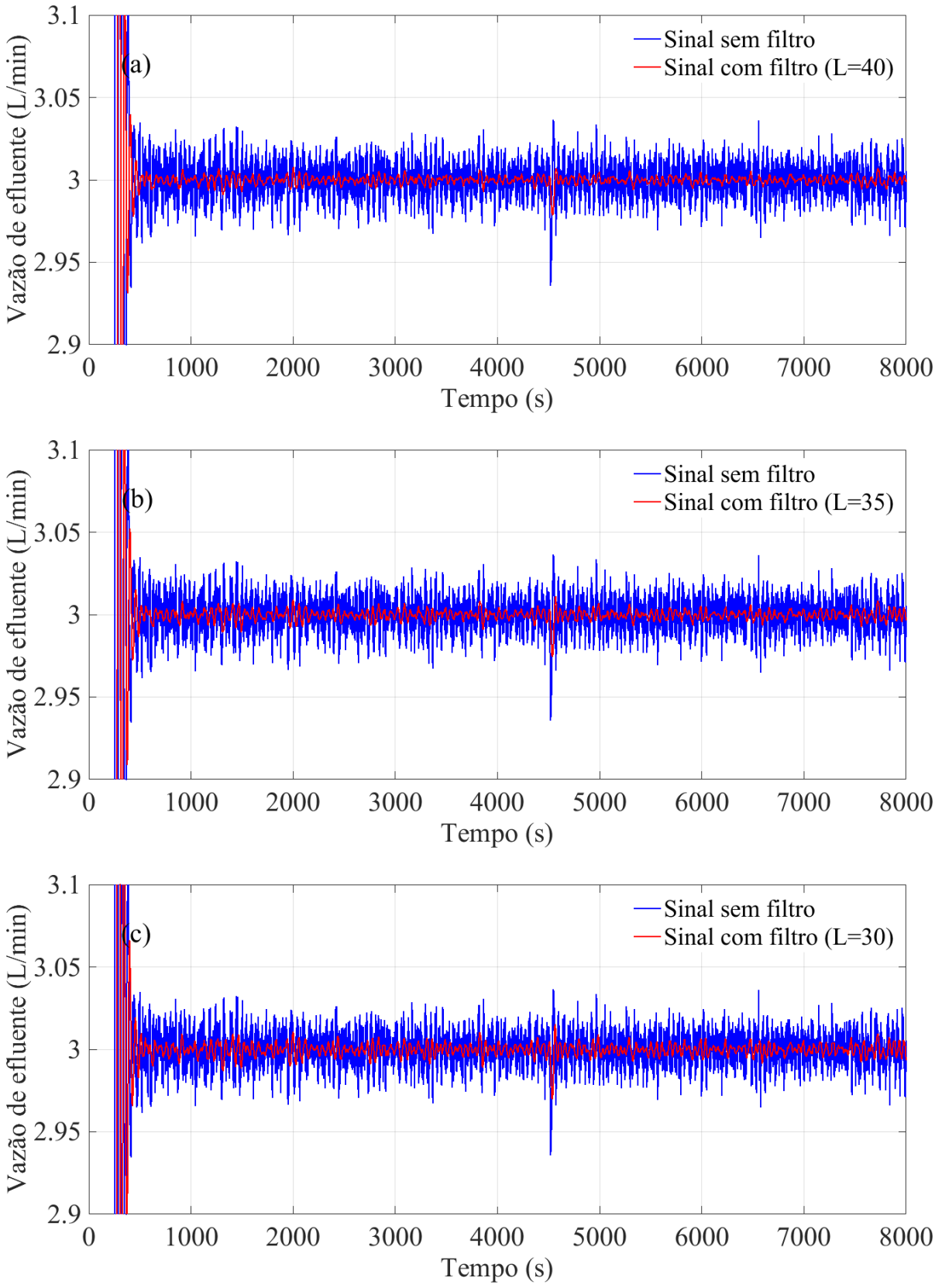


Figura 99 – Determinação de L para o filtro do sinal de vazão de efluente.

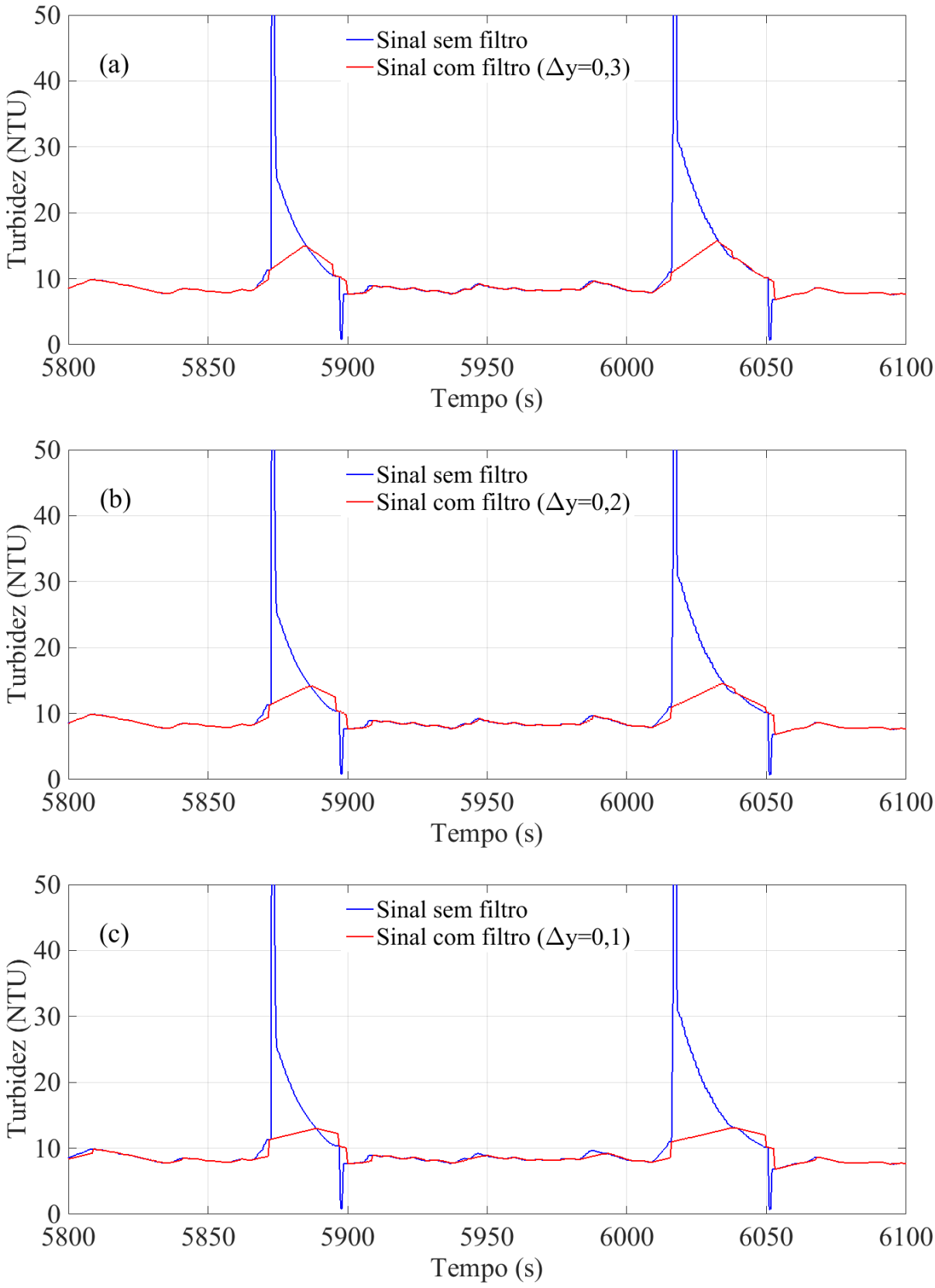


Figura 100 – Determinação de Δy para o filtro do sinal de turbidez.