UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

LUANN RODRIGUES SANTOS

MODELAGEM E CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA EM UMA PLANTA DIDÁTICA

VITÓRIA
2019

LUANN RODRIGUES SANTOS

MODELAGEM E CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA EM UMA PLANTA DIDÁTICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Luann Rodrigues Santos**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. D.Sc. Celso José Munaro

VITÓRIA
2019

LUANN RODRIGUES SANTOS

MODELAGEM E CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA EM UMA PLANTA DIDÁTICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Luann Rodrigues Santos**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 20 de dezembro de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof D.Sc. Celso José Munaro
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. D.Sc. Alessandro Mattedi
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. D.Sc. José Leandro Félix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

RESUMO

As áreas de controle e automação contribuem para a melhoria dos processos utilizados pelas indústrias, permitindo uma linha de produção rápida, aprimorando a qualidade do produto final e reduzindo os custos de produção. Boas ferramentas de pesquisas nestas áreas são as plantas didáticas, pois proporcionam um contato direto com equipamentos semelhantes ou até mesmo usados no setor industrial. Em vista desse cenário, este trabalho realiza a modelagem e o controle de nível e temperatura do tanque de processo presente em uma planta didática. É feito uma descrição sobre os equipamentos da planta, o comissionamento, a configuração da rede para aquisição de dados e estratégias de controle. Além disso, é realizada a modelagem da planta que para o nível foi feito através da resposta ao degrau e para temperatura foi feito pelas equações diferenciais físicas do processo. Os modelos obtidos são validados pela comparação entre a resposta real e simulada. Então é feito o projeto de controladores que após serem simulados, são inseridos no processo, e o resultado é exibido para o sistema atuando em algumas referências, possibilitando o controle de nível e temperatura.

Palavras-chaves: Temperatura. Planta Didática. Nível**.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planta Didática CE117.....16
Figura 2 – Módulo de experimentos da planta didática CE177.....17
Figura 3 – Módulo de controle da planta didática CE177.....17
Figura 4 – Seção ADA (analógico/digital).....18
Figura 5 – Esquemático do painel impresso do módulo de controle.....18
Figura 6 – Conexões do *kit* didático CE117.....19
Figura 7 – Circuito do processo resfriador.....20
Figura 8 – Circuito do processo aquecedor.....21
Figura 9 – Tela do CE2000.....22
Figura 10 – Opções de comunicação do CE2000.....23
Figura 11 – Tela de um circuito do CE2000 funcionando em tempo real.....23
Figura 12 – Bomba 1 (esquerda), válvula (meio) e bomba 2 (direita).....25
Figura 13 – Controle de temperatura por bomba.....25
Figura 14 – Controle de nível por válvula (esquerda) e por bomba (direita).....26
Figura 15 – Chave flutuante do reservatório.....26
Figura 16 – Tanque Aquecedor.....27
Figura 17 – Curva de aquecimento do tanque aquecedor na potência máxima.....28
Figura 18 – Esquemático do *cooler* no circuito do fluxo processo resfriador.....28
Figura 19 – *Cooler*.....29
Figura 20 – Termômetro na base do tanque de processo.....29
Figura 21 – Medidor de vazão para o fluxo do processo aquecedor (esquerda) e medidor de vazão pra o fluxo do processo resfriador (direita).....30
Figura 22 – Potenciômetros de ajuste de zero e *span*.....31
Figura 23 – Medidor de nível do tipo capacitivo.....31
Figura 24 – Relação entre a tensão do transmissor e o nível de água em milímetros.....33
Figura 25 – Válvula de *by-pass*.....33
Figura 26 – Válvula de dreno.....34
Figura 27 – Misturador giratório.....34
Figura 28 – Ensaio de entrada ao degrau na bomba 2.....35
Figura 29 – Resposta ao degrau de $G_{nível1}(s)$.....37
Figura 30 – Resposta ao degrau de $G_{nível2}(s)$.....37
Figura 31 – Resposta ao degrau de $G_{nível3}(s)$.....38

Figura 32 – Variação do ganho e da constante de tempo em função do nível em milímetros..39
Figura 33 – Ensaio de entrada ao degrau na bomba 1 para vazão.....40
Figura 34 – Segundo ensaio de entrada ao degrau para vazão na bomba 1.....40
Figura 35 – Resposta ao degrau de $G_{vazão1}(s)$.....42
Figura 36 – Resposta ao degrau de $G_{vazão2}(s)$.....42
Figura 37 – Resposta ao degrau de $G_{vazão3}(s)$.....43
Figura 38 – Esquemático do tanque de processo.....43
Figura 39 – Esquemático da malha de controle do processo.....46
Figura 40 – Esquemático da malha de controle do aquecedor.....46
Figura 41 – Ensaio de entrada ao degrau na bomba 1.....47
Figura 42 – Diagrama de blocos do sistema da temperatura.....49
Figura 43 – Comparação entre a resposta real e a simulada para bomba 1 em 1,7 V.....52
Figura 44 – Comparação entre a resposta real e a simulada para bomba 1 em 2 V.....52
Figura 45 – Comparação entre a resposta real e a simulada para bomba 1 variando de 1,7 V para 2,2 V.....53
Figura 46 – Histograma da temperatura do tanque para valores medidos com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V.....53
Figura 47 – Histograma da temperatura do tanque para valores simulados com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V.....54
Figura 48 – Histograma da temperatura do aquecedor para valores medidos com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V.....54
Figura 49 – Histograma da temperatura do aquecedor para valores simulados com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V.....55
Figura 50 – Resposta de nível simulada para controlador com os parâmetros considerando a saturação da bomba 1 e do medidor de nível.....59
Figura 51 – Esquemático do *anti-windup*.....59
Figura 52 – Diagrama de blocos para a simulação do controle de nível.....60
Figura 53 – Resposta do nível simulada para o controlador com e sem o *anti-windup*.....60
Figura 54 – Diagrama de blocos para aplicar o controle de nível na planta.....61
Figura 55 – Resposta do nível em malha fechada.....62
Figura 56 – Lugar das raízes para o sistema em malha fechada.....63
Figura 57 – Lugar das raízes para o sistema em malha fechada ampliado para os polos e zeros em torno da origem.....64
Figura 58 – Resposta da função de transferência pra o controlador usado.....64

Figura 59 – Diagrama de blocos para simulação do controle de temperatura.....65
Figura 60 – Resposta da temperatura simulada para sistema com controlador.....65
Figura 61 – Diagrama de blocos para aplicar o controle de temperatura na planta.....66
Figura 62 – Resposta da temperatura em malha fechada.....66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Medidores e atuadores presentes na planta.....24
Quadro 2 – Ensaio para vazão do circuito aquecedor variando de 0 a $2,8x10^{-5}$ m^3/s (bomba 1 de 0 para 2 V).....50
Quadro 3 – Ensaio para vazão do circuito aquecedor variando de 0 a $2,17x10^{-5}$ m^3/s (bomba 1 de 0 para 1,7 V).....50
Quadro 4 – Ensaio para vazão do circuito aquecedor variando de $2,17x10^{-5}$ a $3,27x10^{-5}$ m^3/s (bomba 1 de 1,7 para 2,2 V).....51
Quadro 5 – Valores de equilíbrio usados na linearização considerando a região de operação da bomba 1 em 2 V.....56
Quadro 6 – Projeto de sintonia do controlador PID.....71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Calibração do medidor de nível.....32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADA	Seção do módulo de controle do *kit* didático que permite a conversão analógico/digital ou digital/analógica dos sinais
CC	Corrente contínua
CE117	Planta didática que foi usada no projeto
CE2000	*Software* que permite implementar os controladores na planta didática CE117
CT	Centro Tecnológico
FT1	Medidor de vazão do tipo impulsor presente no circuito do fluxo aquecedor
FT2	Medidor de vazão do tipo impulsor presente no circuito do fluxo resfriador
LED	Diodo emissor de luz
LT	Medidor de nível capacitivo
PID	Controlador proporcional, integral e derivativo
PT	Medidor de pressão
S	Válvula proporcional
TT1	Termômetro de resistência de platina no aquecedor
TT2	Termômetro de resistência de platina na saída do trocador de calor
TT3	Termômetro de resistência na saída do reservatório
TT4	Termômetro de resistência na saída do *cooler*
TT5	Termômetro de resistência no tanque de processo
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

$x(h)$	Nível de água em função da tensão do transmissor de nível em V (mm)
h	Tensão do transmissor de nível (V)
T	Temperatura do fluido no tanque (K)
$G(s)$	Função de transferência
K	Ganho da função de transferência
τ	Constante de tempo da função de transferência (s)
L	Tempo morto (s)
$G_{nível1}(s)$	Função de transferência que relaciona a entrada da bomba 2 com a tensão do transmissor de nível, para variação da bomba 2 de 0 para 5 V
$G_{nível2}(s)$	Função de transferência que relaciona a entrada da bomba 2 com a tensão do transmissor de nível, para variação da bomba 2 de 5 para 5,5 V
$G_{nível3}(s)$	Função de transferência que relaciona a entrada da bomba 2 com a tensão do transmissor de nível, para variação da bomba 2 de 5,5 para 6 V
$K(x)$	Ganho da função de transferência em função do nível em milímetros
$\tau(x)$	Constante de tempo em função do nível em milímetros (s)
$G_{vazão1}(s)$	Função de transferência que relaciona a entrada da bomba 1 com a vazão, para variação da bomba 1 de 0 para 2 V
$G_{vazão2}(s)$	Função de transferência que relaciona a entrada da bomba 1 com a vazão, para variação da bomba 1 de 0 para 1,7 V
$G_{vazão3}(s)$	Função de transferência que relaciona a entrada da bomba 1 com a vazão, para variação da bomba 1 de 1,7 para 2,2 V
ρ	Densidade do fluido (kg/m^3)
C	Calor específico do fluido (J/kgK)
V	Volume do fluido no tanque de processo (m^3)
w_i	Vazão mássica de saída (kg/s)
w	Vazão mássica de entrada (kg/s)
U_{int}	Energia interna (J)
Q	Taxa de calor fornecida. (W)
H	Entalpia que sai do sistema (J)
T_{ref}	Temperatura de referência (K)
H_i	Entalpia que entra no sistema (J)
T_i	Temperatura do fluido que entra no tanque (K)

KU_{fan}	Constante do resfriador que depende da tensão aplicada (W/K)
q	Vazão volumétrica do circuito resfriador (m^3/s)
q_h	Vazão volumétrica do circuito aquecedor (m^3/s)
ρ_h	Densidade do fluido no tanque aquecedor (kg/m^3)
V_h	Volume de fluido no tanque aquecedor (m^3)
T_h	Temperatura do fluido no tanque aquecedor (K)
P	Potência elétrica de entrada do aquecedor (W)
T_o	Temperatura do fluido após passar pelo trocador de calor (K)
A	Matriz de estados
B	Matriz de entradas
C	Matriz de saídas
D	Matriz de alimentação direta
Δx	Vetor de estados
Δu	Vetor de entradas
Δy	Vetor de saídas
$G_{temp}(s)$	Função de transferência para o sistema linearizado de temperatura
K_p	Ganho proporcional do PID
Ti	Tempo do ganho integrativo do PID
T_d	Tempo do ganho derivativo do PID
λ	Constante usada na sintonia do controlador PID
T_t	Tempo do ganho do sistema *anti-windup*
K_i	Ganho do integrador do PID
ζ	Constante de amortecimento
τ_1	Uma das constantes de tempo para função de transferência de segunda ordem (s)
τ_2	Uma das constantes de tempo para função de transferência de segunda ordem (s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....14
2 DESCRIÇÃO DA PLANTA DIDÁTICA CE117.....16
2.1 Apresentação da Planta.....16
2.2 Visão Geral da Planta CE117.....16
2.2.1 Circuito do Processo Resfriador.....19
2.2.2 Circuito do Fluxo do Processo Aquecedor.....21
2.2.3 *Software* CE2000.....22
2.3 Descrição dos Medidores e Atuadores.....24
2.3.1 Aspectos Gerais.....24
2.3.2 Válvulas e Bombas.....24
2.3.3 Aquecedor e *Cooler*.....27
2.3.4 Medidores de Temperatura.....29
2.3.5 Medidor de Pressão.....30
2.3.6 Medidores de Vazão.....30
2.3.7 Medidor de Nível.....30
2.3.8 Válvula de *By-pass*, Válvula de Dreno e Misturador Giratório.....33
3 MODELAGEM DOS SISTEMAS.....35
3.1 Modelagem do Nível.....35
3.1.1 Região de Operação do Nível.....35
3.1.2 Modelagem do Nível.....35
3.1.3 Validação do Modelo de Nível.....37
3.2 Modelagem de Vazão da Bomba 1.....39
3.2.1 Região de Operação da Vazão da Bomba 1.....39
3.2.2 Modelagem da Vazão da Bomba 1.....40
3.2.3 Validação do Modelo da Vazão da Bomba 1.....41
3.3 Modelagem de Temperatura.....43
3.3.1 Obtenção das Equações Diferenciais para Temperatura.....43
3.3.2 Região de Operação da Temperatura.....47
3.3.3 Modelagem da Temperatura.....48
3.3.4 Validação do Modelo de Temperatura.....51
3.3.5 Linearização do Modelo de Temperatura.....55
4 CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA.....58

4.1 Controle de Nível.....58
4.1.1 Sintonia da Malha de Controle de Nível.....58
4.1.2 Simulação do Controle de Nível.....60
4.1.3 Controle de Nível Aplicado na Planta.....61
4.2 Controle de Temperatura.....62
4.2.1 Sintonia da Malha de Controle de Temperatura.....62
4.2.2 Simulação do Controle de Temperatura.....65
4.2.3 Controle de Temperatura Aplicado na Planta.....66
5 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS.....68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....70
ANEXO A – PROJETO DE SINTONIA DO CONTROLADOR PID.....71

1 INTRODUÇÃO

Plantas didáticas são plataformas tecnológicas que constituem alternativas práticas no ensino de controle de processos. Elas possibilitam a criação de ambientes e situações controladas, permitindo em conjunto com a fundamentação teórica, o desenvolvimento de soluções para problemas reais existentes no setor industrial (FONSECA, 2012).

Diversos trabalhos têm feito uso de plantas didáticas ou piloto. Fonseca (2012) usa uma planta didática para modelagem e controle de nível com instrumentação industrial. Thomas (2010) utiliza uma planta didática para mostrar o desenvolvimento do modelo de uma planta didática não linear e multivariável usando a resposta ao degrau. Silva (2015) realiza a modelagem, controle, e simulação de falhas das malhas de uma planta piloto.

Neste contexto, a Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, adquiriu a planta do *kit* didático CE117, para estudos de controle de processos industriais. O *kit*, que está localizado no Centro Tecnológico, CT, apresenta um manual que já fornece o ganho dos controladores para os experimentos. Porém, não é fornecido a modelagem necessária para a determinação desses ganhos. Então, para estudos de controle de processos, envolvendo essa planta, é necessário obter modelos matemáticos que permitam o desenvolvimento de controladores.

Com essa perspectiva, neste projeto será apresentado o processo de automação da planta didática CE117, descrevendo o funcionamento de seus sistemas. Além disso, será mostrada a modelagem dos sistemas de nível e temperatura do tanque de processo, assim como o projeto de controladores, provenientes desses modelos. Este trabalho está dividido em mais quatro capítulos, os quais abordam para a descrição dos equipamentos da planta, a modelagem, o controle e a conclusão.

No capítulo 2 são apresentados a estrutura da planta didática, os equipamentos e suas funções e comissionamento, abordando a conexão dos equipamentos para aquisição de dados, assim como as estratégias de controle possíveis.

No capítulo 3 é feita a modelagem dos sistemas de nível e temperatura do tanque de processo da planta. Para o sistema de nível a modelagem é feita pela resposta ao degrau. No caso da

temperatura, são usadas as equações diferenciais físicas do processo para a obtenção de parâmetros.

No capítulo 4, os controladores são projetados, usando os modelos obtidos. Através de simulações e testes na planta o desempenho desses controladores é avaliado. No capítulo 5 é feita a análise dos resultados, bem como a propostas para trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DA PLANTA DIDÁTICA CE117

2.1 Apresentação da Planta

Na Figura 1 é mostrada a planta presente no *kit* didático CE117, que é um ambiente que permite o estudo de processos de controle. Ela possibilita, na prática, a implementação de estratégias de controle, modelagem, sintonia dos controladores e análise do efeito de perturbações. Os equipamentos presentes na planta permitem o estudo de processos que envolvem: fluxo, nível, pressão e temperatura.

Figura 1 – Planta Didática CE117

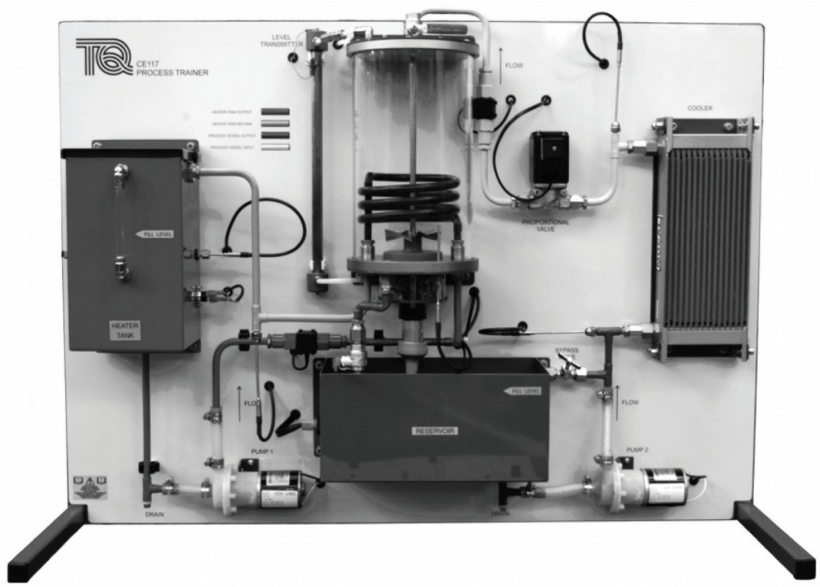
Fonte: Tecquipment (2011).

2.2 Visão Geral da Planta CE117

A planta é dividida em duas partes principais: o módulo de experimentos e o módulo de controle.

O módulo de experimentos, apresentado na Figura 2, é uma unidade para montagem em bancada que suporta todo o *hardware* de controle de processos do CE117 no seu painel frontal. Esta parte também contém as fontes de alimentação para cada um dos dispositivos e circuitos do CE117, assim como os amplificadores de potência para os atuadores e circuitos condicionadores de sinal para os transmissores.

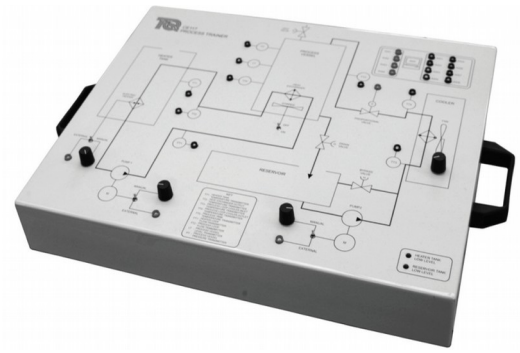
Figura 2 – Módulo de experimentos da planta didática CE177



Fonte: Tecquipment (2011).

O módulo de controle, mostrado na Figura 3, fornece acesso a todos os circuitos transmissores e atuadores contidos no módulo de experimentos. Ele também fornece a interface entre o *kit* CE117 e o computador para quatro canais de conversão analógico/digital e oito canais de conversão digital/analógico.

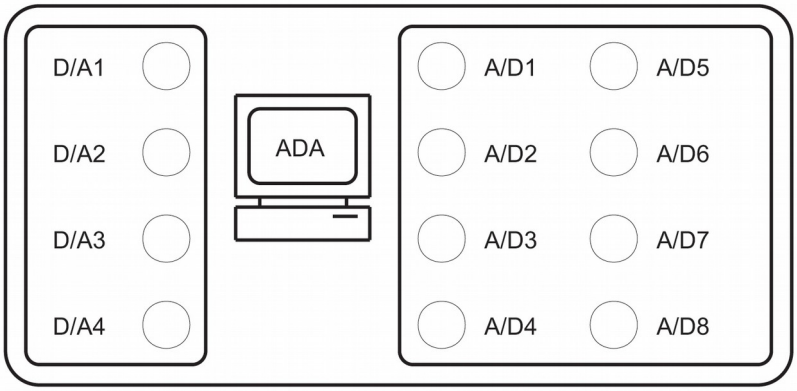
Figura 3 – Módulo de controle da planta didática CE177



Fonte: Tecquipment (2011).

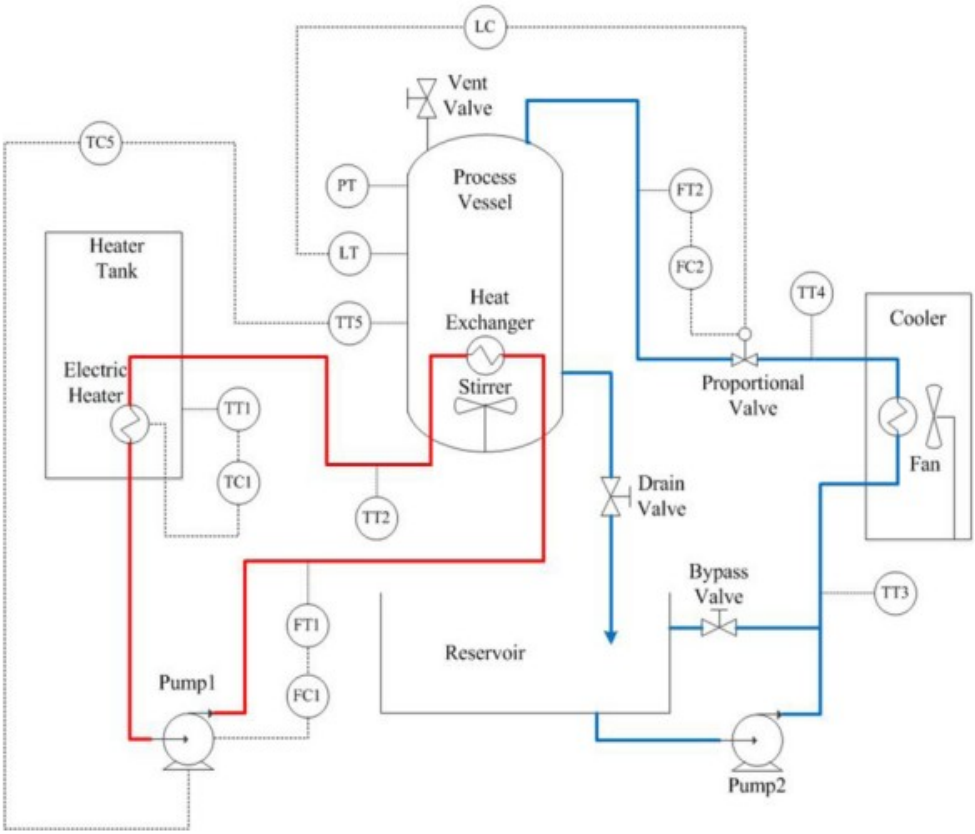
Na Figura 4 mostra a seção ADA, presente no módulo de controle, que fornece 8 entradas analógica/digital de 12 *bits*, e 4 saídas digital/analógica de 12 *bits*. Essa seção permite a comunicação entre a planta CE117 e o computador. Já na Figura 5 exibe-se um esquemático didático do que é mostrado no painel impresso.

Figura 4 – Seção ADA (analógico/digital)



Fonte: Tecquipment (2011).

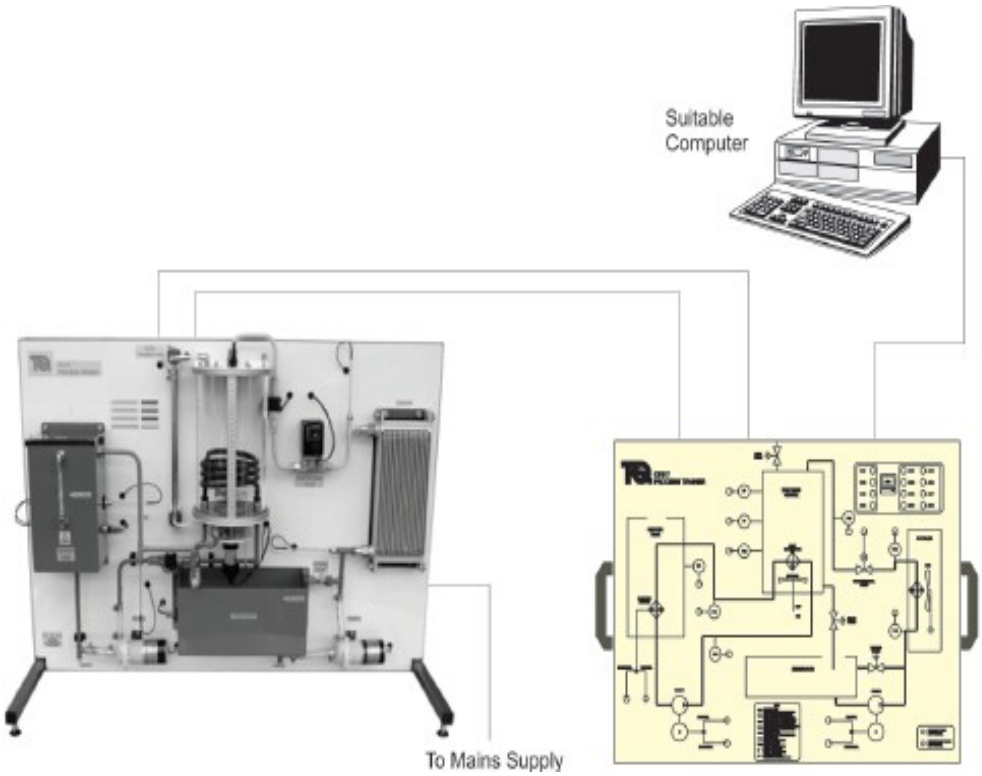
Figura 5 – Esquemático do painel impresso do módulo de controle



Fonte: Song e Shi (2018).

Esses dois módulos são conectados junto a um computador, conforme a Figura 6. Os dados, que passam por esses módulos, são usados pelo *software* CE2000 que permite, em tempo real, monitorar e controlar o CE117.

Figura 6 – Conexões do *kit* didático CE117



Fonte: Tecquipment (2011).

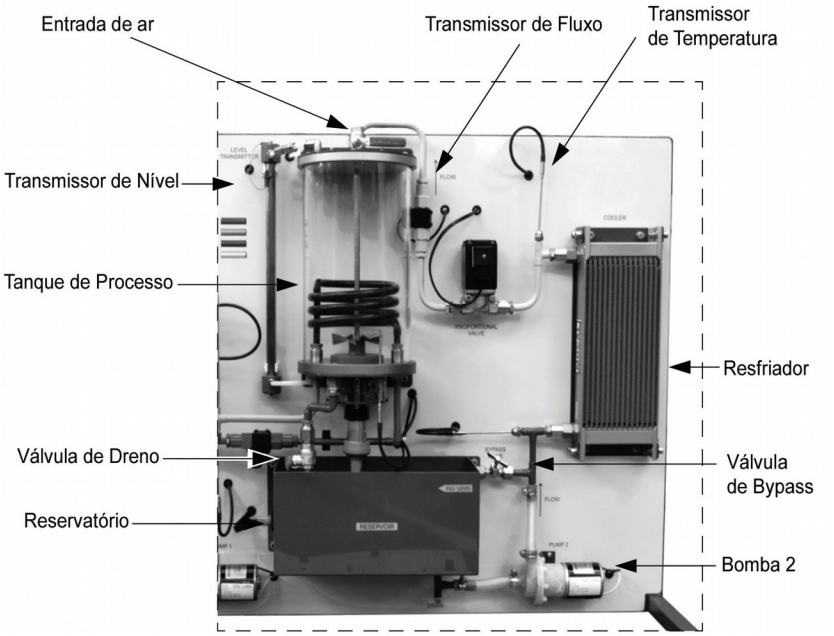
Além disso, a planta pode ser dividida em dois circuitos de fluxo: o processo aquecedor e o processo resfriador. Estes circuitos e o *software* CE2000 serão discutidos com mais detalhes nas próximas seções a seguir.

2.2.1 Circuito do Processo Resfriador

O circuito de fluxo do processo/resfriador, apresentado na Figura 7, inclui:

- Um tanque de processo com válvula de dreno e uma entrada de ar;
- Um reservatório com uma bomba que usa um motor CC de velocidade variável;
- Um resfriador que consiste de um radiador e um ventilador de velocidade variável;
- Uma válvula proporcional servo-controlada;
- Uma válvula de *by-pass* da malha do processo.

Figura 7 – Circuito do processo resfriador



Fonte: Tecquipment (2011).

O tanque do processo é um cilindro transparente, no qual uma escala na frente permite que o nível da água seja medido com precisão. A bomba 2 entrega água do reservatório para o tanque de processo, passando pelo resfriador e válvula proporcional. A água retorna para o reservatório com a gravidade, por meio da válvula de dreno. A bomba e a abertura da válvula proporcional, portanto, a taxa de vazão, são controladas com um potenciômetro ou através da entrada de uma tensão externa no soquete do módulo de controle. Ainda há nesse circuito, uma válvula de *by-pass* que desvia o fluxo de água da bomba que iria para o tanque, e faz com este volte para o reservatório.

Esse sistema ainda inclui um trocador de calor, instalado na placa da base, que faz parte do circuito do aquecedor, responsável pelo controle de temperatura da água do tanque de processo. Ainda há nesse circuito um resfriador, responsável por diminuir a temperatura da água que irá entrar no tanque, localizado no caminho do fluxo entre o reservatório e o tanque.

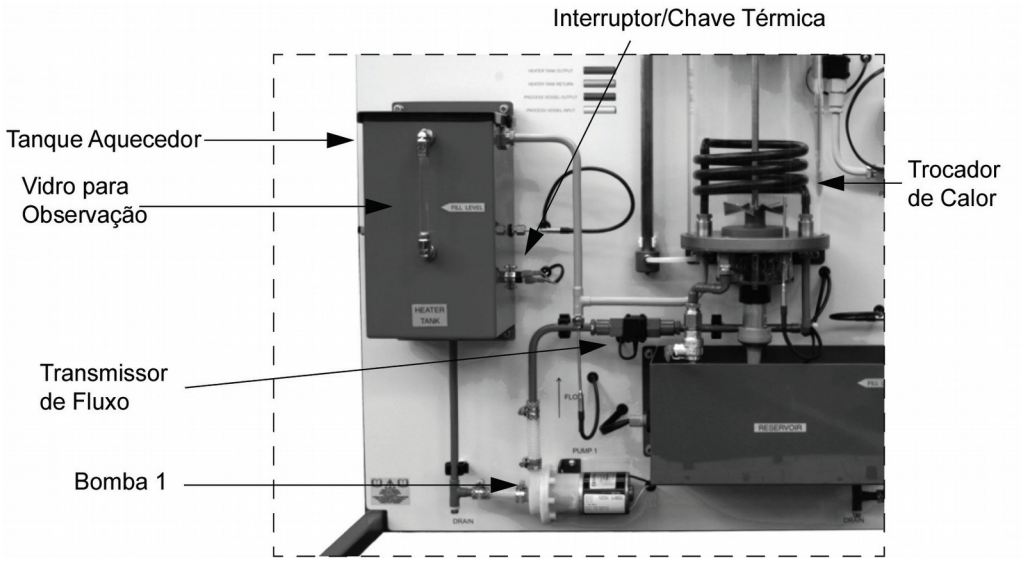
O tanque de processo possui um termômetro de resistência de platina montado na placa da base. Assim como, estão presentes também na entrada e saída do resfriador. Um medidor de fluxo tipo impulsor está presente no circuito de fluxo na entrada do tanque de processo. Ainda estão presentes nesse circuito, um medidor de nível do tipo capacitivo, um medidor de pressão e uma entrada de ar no topo do tanque.

2.2.2 Circuito do Fluxo do Processo Aquecedor

O circuito de fluxo do aquecedor, mostrado na Figura 8, consiste de:

- Um tanque aquecedor;
- Um trocador de calor montado na base do tanque de processo;
- Uma bomba acionada por motor CC com velocidade variável.

Figura 8 – Circuito do processo aquecedor



Fonte: Tecquipment (2011).

A bomba 1 pode ser controlada ajustando um potenciômetro ou através da entrada de uma tensão externa no soquete do módulo de controle, que permite acionar o motor a diferentes velocidades para entregar água aquecida para o solenoide trocador de calor, montado na base do tanque de processo. O tanque aquecedor inclui um elemento aquecedor elétrico que, por meio de uma corrente variável, proveniente do ajuste de um potenciômetro ou através da entrada de uma tensão externa no soquete do módulo de controle, pode controlar a energia que será inserida na água contida no tanque aquecedor.

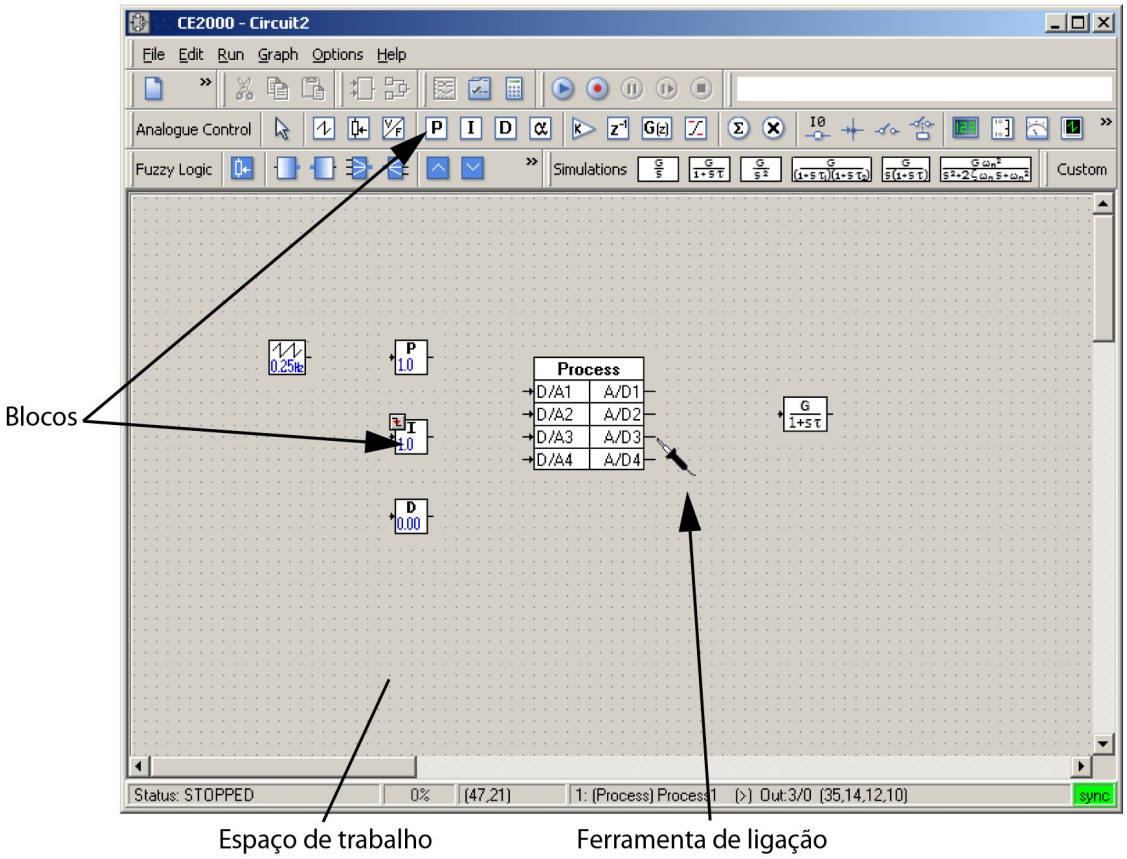
Esse circuito possui dois termômetros com resistência de platina: um mede a temperatura da água no tanque aquecedor, e o outro, a temperatura da água após ter passado pelo trocador de calor. Um medidor de fluxo tipo impulsor está presente no circuito de fluxo, na saída do tanque aquecedor. Um vidro para observação, montado na frente do tanque aquecedor, fornece uma indicação visual do nível de água no seu interior.

2.2.3 *Software* CE2000

O *software* CE2000 fornece todas as ferramentas necessárias para criar, editar e rodar uma ampla variedade de circuitos de aquisição de dados e controle. Ele também inclui *displays* digitais e gráficos com funções de gravação embutidas.

A tela do programa, presente na Figura 9, permite a montagem de circuitos de controle, através de um diagrama de blocos. A gravação de dados feita pelo *software* oferece como padrão amostras feitas a cada 0,2 segundos e um máximo de 26800 amostras por gravação.

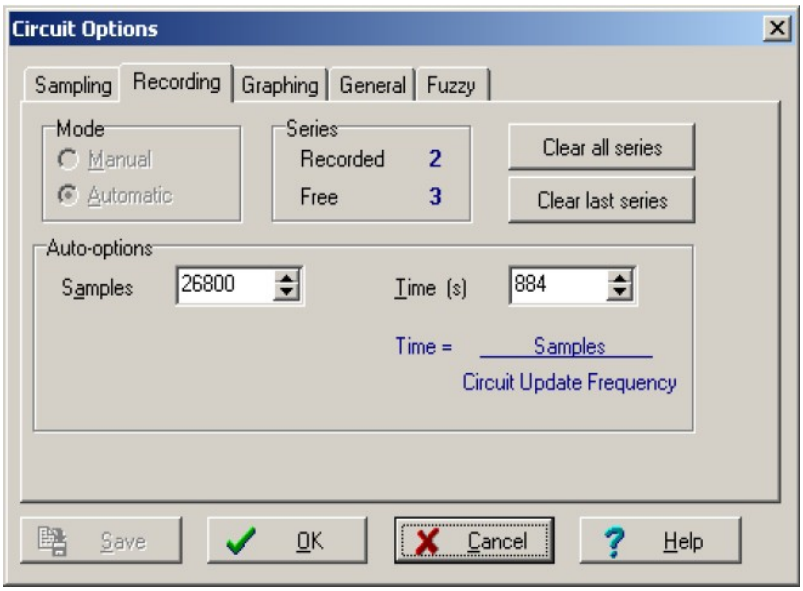
Figura 9 – Tela do CE2000



Fonte: Tecquipment (2009).

É permitido realizar até 5 gravações, que podem ser exportadas em um arquivo de texto que será usado por outros programas. Para realizar mais gravações é necessário deletar as gravações já feitas, salvas no *software*. A Figura 10 mostra as configurações para gravação de dados.

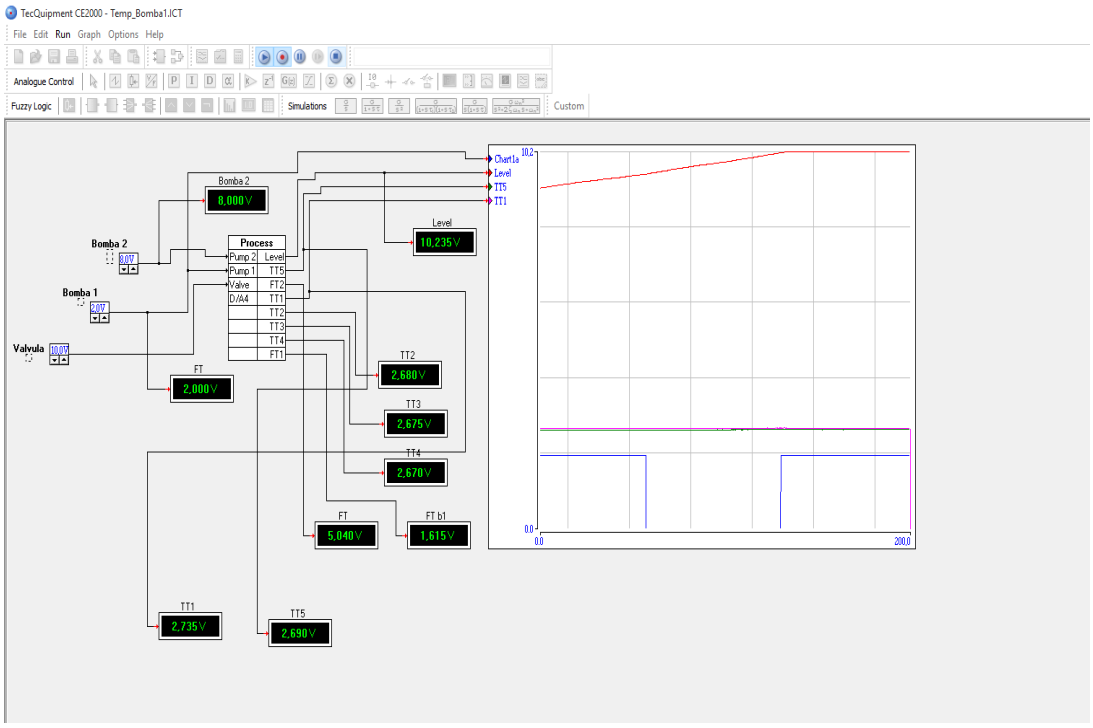
Figura 10 – Opções de comunicação do CE2000



Fonte: Tecquipment (2009).

Na Figura 11 é possível visualizar um exemplo de um circuito funcionando em tempo real, coletando dados e os mostrando nos *displays* e gráficos.

Figura 11 – Tela de um circuito do CE2000 funcionando em tempo real



Fonte: Produção do próprio autor.

2.3 Descrição dos Medidores e Atuadores

2.3.1 Aspectos Gerais

No Quadro 1 são mostrados os diferentes medidores e atuadores presentes na planta e suas características de medição, tais como, range do sinal de medição, e conversão entre o sinal de medição e o valor da variável medida.

Quadro 1 – Medidores e atuadores presentes na planta

Medidor	Abreviatura	Sinal de Tensão	Linearidade	Conversão
Medidor de temperatura	TT1	0 – 10 V (Saída)	Linear	1 V = 1ºC
	TT2			
	TT3			
	TT4			
	TT5			
Medidor de Vazão	FT1	0 – 10 V (Saída)	Linear	1 V = 1 L/min
	FT2			
Medidor de Nível	LT	Padrão: 0 – 10 V (Saída) (Com calibração pode atingir outros valores)	Não linear	Padrão: 0 V – Tanque vazio 10 V - Nível de 180 mm (Com calibração pode atingir outros valores)
Medidor de Pressão	PT	0 – 10 V (Saída)	Linear	1 V = 100 mbar
Aquecedor	-	0 – 10 V (Entrada)	Linear	1 V = 75 W
Válvula Proporcional	S	0 – 10 V (Entrada)	-	0 V – Totalmente aberta 10 V – Totalmente fechada
Bomba 1	Pump 1	0 – 10 V (Entrada)	-	0 V – Bomba parada 10 V – Velocidade máxima
Bomba 2	Pump 2	0 – 10 V (Entrada)	-	0 V – Bomba parada 10 V – Velocidade máxima

Fonte: Tecquipment (2011).

2.3.2 Válvulas e Bombas

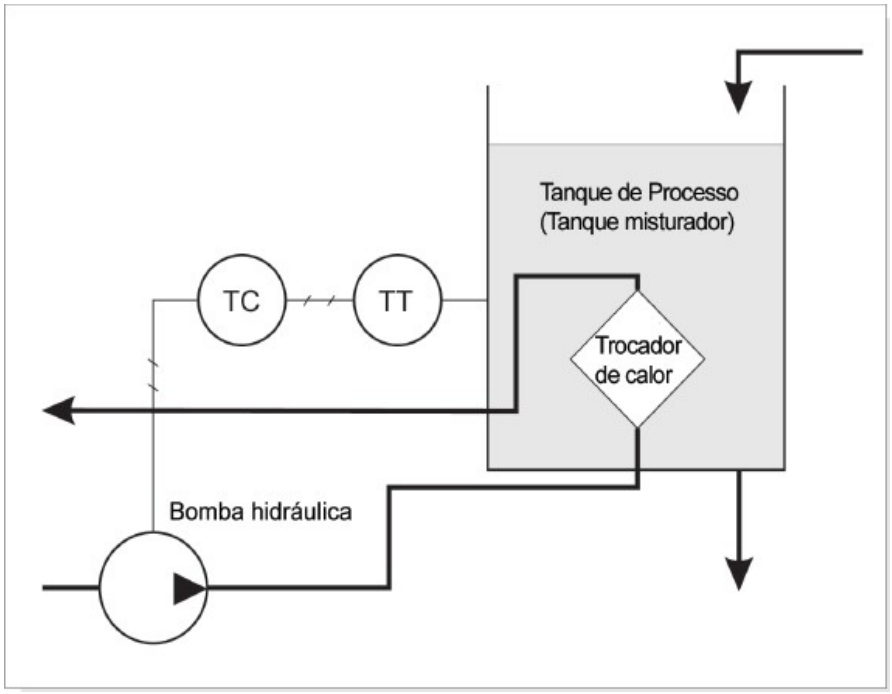
A válvula e as bombas, mostradas na Figura 12, presentes no *kit* didático, representam os principais atuadores presentes na planta.

Figura 12 – Bomba 1 (esquerda), válvula (meio) e bomba 2 (direita)

Fonte: Produção do próprio autor.

A válvula e as bombas, mostradas na Figura 12, presentes no *kit* didático, representam os principais atuadores presentes na planta.

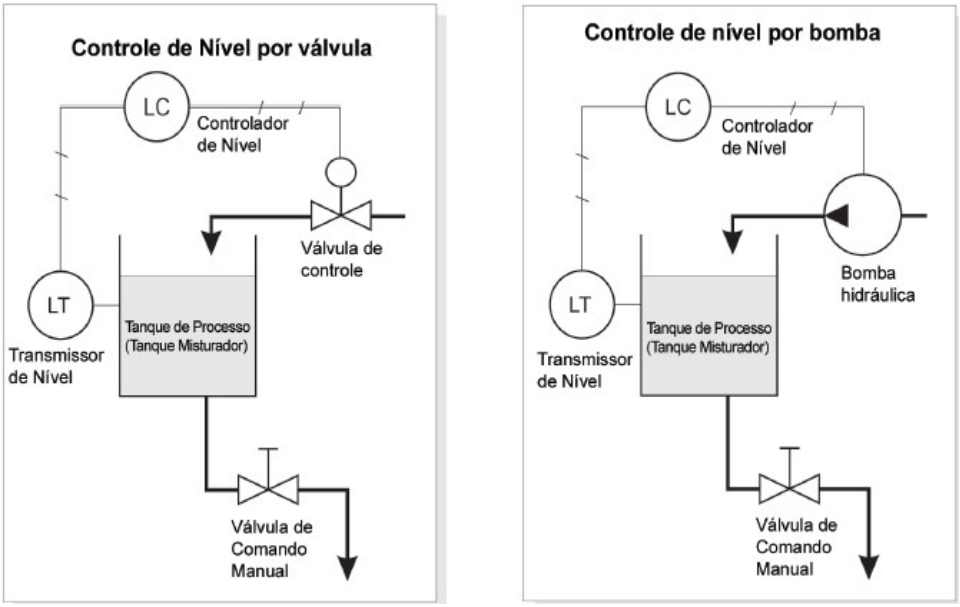
Figura 13 – Controle de temperatura por bomba



Fonte: Tecquipment (2011).

A bomba 2, presente no circuito do fluxo do processo resfriador será usada no controle da vazão que consequentemente controlará o nível. A válvula proporcional, assim como a bomba 2 é usada no controle do nível do tanque de processo. Na Figura 14 são apresentados os dois métodos para controle de nível.

Figura 14 – Controle de nível por válvula (esquerda) e por bomba (direita)



Fonte: Tecquipment (2011).

Ambas as bombas puxam água do mesmo reservatório que possui uma chave flutuante. Este componente que é exibido na Figura 15, ao ser acionado, pelo baixo nível de fluído, irá desligar automaticamente as duas bombas. Nesse momento um LED, presente no painel impresso, que indica quando o nível do fluído está baixo, acende.

Figura 15 – Chave flutuante do reservatório

Fonte: Produção do próprio autor.

2.3.3 Aquecedor e *Cooler*

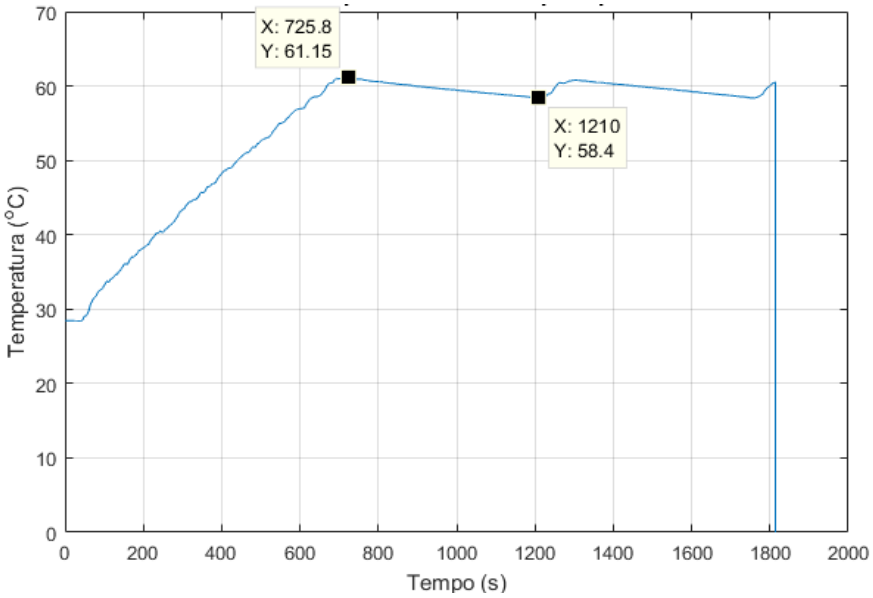
O aquecedor e o *cooler* tem influência direta sobre a temperatura do tanque de processo. A Figura 16 mostra uma foto do tanque aquecedor que tem dimensões de 14,5 cm de comprimento, 12,3 cm de largura e 24,5 cm de altura. Uma resistência dentro do tanque permite aquecer a água através da aplicação de tensão nos seus terminais. Essa tensão pode ser controlada manualmente através de um potenciômetro ou por uma tensão externa inserida pelo módulo de controle. Isso possibilita usar o aquecedor como um atuador para o controle de temperatura.

Figura 16 – Tanque Aquecedor

Fonte: Produção do próprio autor.

Além disso, o aquecedor possui um dispositivo que impede que a temperatura ultrapasse 61,15 ºC. Nesse momento, a tensão sobre a resistência é automaticamente zerada, e apenas volta quando a temperatura reduz para valores menores que aproximadamente 58,4 ºC. Esses valores foram verificados experimentalmente e podem ser visualizados na Figura 17. Nesse teste a bomba 1 estava desligada e o aquecedor estava na potência máxima.

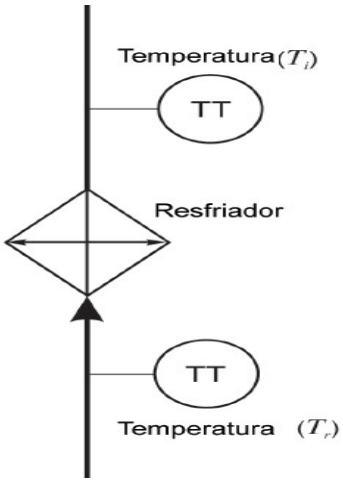
Figura 17 – Curva de aquecimento do tanque aquecedor na potência máxima



Fonte: Produção do próprio autor.

O fluxo do processo resfriador possui um *cooler* que resfria a água que está a caminho de entrar no tanque de processo. Existe um potenciômetro no módulo de controle que permite controlar a tensão aplicada sobre o resfriador. Esse ajuste influi diretamente sobre o quanto o *cooler* irá atuar sobre o fluído. A Figura 18 apresenta um esquemático que mostra a temperatura do fluído antes e depois de passar pelo resfriador, já a Figura 19 mostra a foto do *cooler* presente na planta.

Figura 18 – Esquemático do *cooler* no circuito do fluxo processo resfriador



Fonte: Tecquipment (2011).

Figura 19 – *Cooler*

Fonte: Produção do próprio autor.

2.3.4 Medidores de Temperatura

Na planta estão presentes cinco termômetros de resistência de platina. Dois deles estão no circuito do fluxo do processo aquecedor, um no tanque aquecedor (TT1) e um na saída do trocador de calor (TT2). Os outros três estão no circuito do fluxo do processo resfriador, um no tanque de processo (TT5), outro na saída do reservatório (TT3) e o último na saída do *cooler* (TT4) que também é a entrada para o tanque de processo. Na Figura 20 aparece o termômetro presente na base do tanque de processo.

Figura 20 – Termômetro na base do tanque de processo

Fonte: Produção do próprio autor.

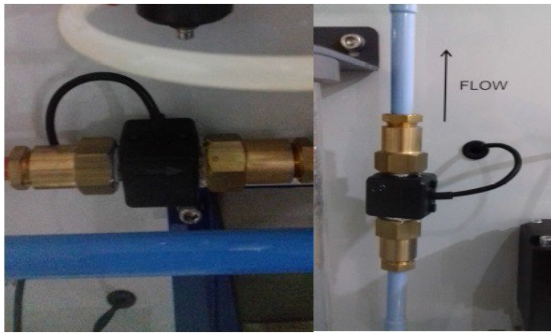
2.3.5 Medidor de Pressão

Uma entrada de ar no topo do tanque de processo permite que este seja vedado para condução e estudos práticos do controle de pressão em um tanque selado. A pressão no espaço acima da superfície da água no tanque de processo aumenta com o aumento do nível da água. Um medidor de pressão (PT) é localizado no topo do módulo de experimento e é conectado ao topo do tanque de processo via um tubo. O transmissor de pressão mede a pressão no espaço acima da água do tanque de processo, quando a entrada de ar está fechada.

2.3.6 Medidores de Vazão

Há dois medidores de vazão do tipo impulsor na planta, apresentados na Figura 21, um para o circuito de fluxo do processo aquecedor (FT1) e outro para o circuito de fluxo do processo resfriador (FT2).

Figura 21 – Medidor de vazão para o fluxo do processo aquecedor (esquerda) e medidor de vazão pra o fluxo do processo resfriador (direita)



Fonte: Produção do próprio autor.

2.3.7 Medidor de Nível

Existe um medidor de nível do tipo capacitivo na planta (LT), que é usado para medir o nível de água do tanque de processo. A relação entre o sinal de medição do transmissor e a variável medida não é linear. É perceptível que para níveis baixos, uma pequena variação do nível acarreta em uma grande variação do sinal de transmissão, enquanto que para níveis mais altos uma grande variação do nível acarreta em uma pequena variação do sinal de transmissão. Essa relação ocorre até um ponto de saturação, em que o aumento do nível não traz mudanças no sinal de transmissão.

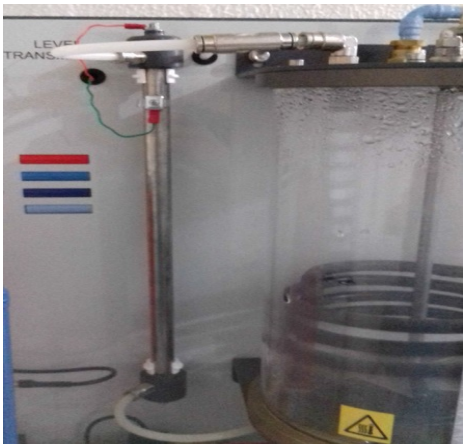
Um aspecto importante desse equipamento é a calibração, que pode ser feita a partir dos ajustes de zero e de *span*. Isso é feito através de dois potenciômetros, mostrados na Figura 22. O manual da planta recomenda o uso de 0 V para o nível mais baixo e de 10 V para o nível de 180 milímetros. Porém, devido a um problema presente nesse medidor, não foi possível colocar 0 V para o nível mais baixo.

Figura 22 – Potenciômetros de ajuste de zero e *span*

Fonte: Tecquipment (2011).

Para o medidor de nível presente na Figura 23, foi montado um experimento que permitiu a montagem da Tabela 1, que relaciona o nível medido, em milímetros, com o respectivo sinal de medição.

Figura 23 – Medidor de nível do tipo capacitivo



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 1 – Calibração do medidor de nível

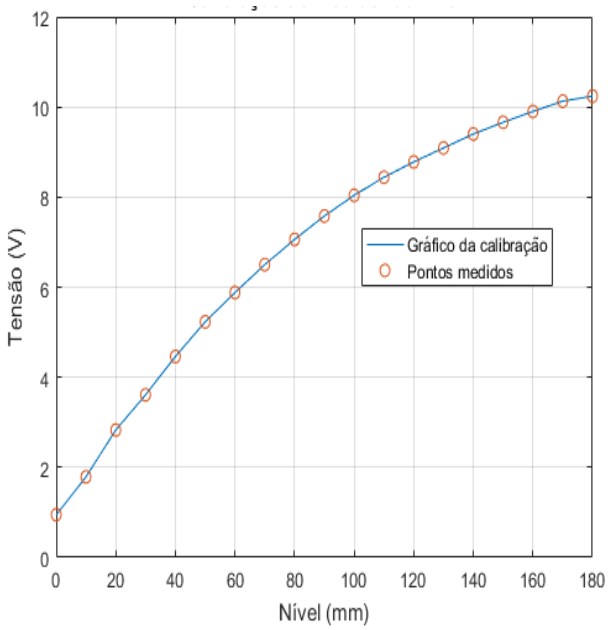
Nível do Reservatório (mm)	Transmissor de Nível (V)
0	0,9
10	1,8
20	2,8
30	3,6
40	4,5
50	5,2
60	5,9
70	6,5
80	7,1
90	7,6
100	8
110	8,4
120	8,8
130	9,1
140	9,4
150	9,7
160	9,9
170	10,1
180	10,2

Fonte: Produção do próprio autor.

Pelo MATLAB®, através dos comandos *polyfit* e *polyval*, foi possível criar uma relação entre as duas variáveis, que pode ser vista na Figura 24. Essa relação é dada conforme (1), no qual os valores em h estão em tensão (V) e em x estão em milímetros.

$$x(h) = 1{,}65h^2 - 0{,}93h + 6{,}42 \tag{1}$$

Figura 24 – Relação entre a tensão do transmissor e o nível de água em milímetros

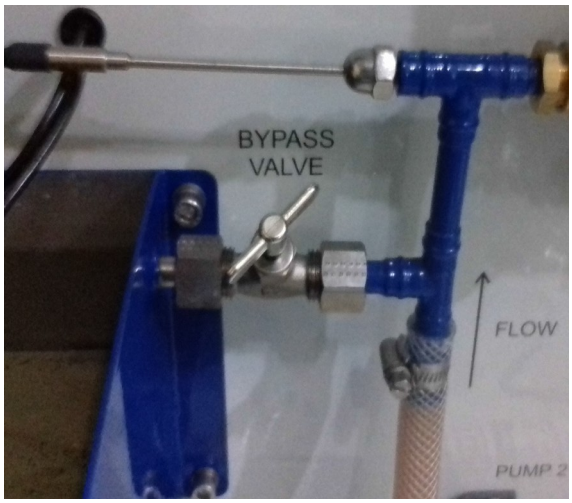


Fonte: Produção do próprio autor.

2.3.8 Válvula de By-pass, Válvula de Dreno e Misturador Giratório

Uma válvula de *by-pass*, mostrada na Figura 25, é inclusa no circuito de controle do processo para permitir o escoamento da bomba para retorno direto ao reservatório sem passar pelo resfriador ou tanque de controle. Isto fornece uma maneira secundária de controlar ou variar a taxa de fluxo da água no circuito de fluxo de processo, ou como um meio de introduzir perturbações no sistema.

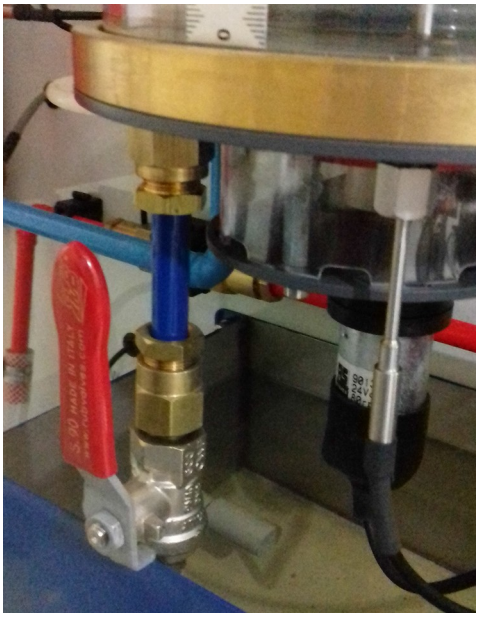
Figura 25 – Válvula de *by-pass*



Fonte: Produção do próprio autor.

A válvula de dreno, presente na base do tanque, é o ponto de ligação entre o tanque de processo e o reservatório. Assim como a válvula de *by-pass*, esse equipamento pode ser usado, de maneira secundária, no controle de fluxo do processo ou para introduzir pertubações no sistema. Esse componente é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Válvula de dreno



Fonte: Produção do próprio autor.

Para garantir que a temperatura da água no tanque de processo seja uniforme, um misturador giratório, exibido na Figura 27, é incluído na base do tanque de processo. Ele é acionado por um motor CC magneticamente acoplado, montado abaixo do tanque de processo.

Figura 27 – Misturador giratório

Fonte: Produção do próprio autor.

3 MODELAGEM DOS SISTEMAS

3.1 Modelagem do Nível

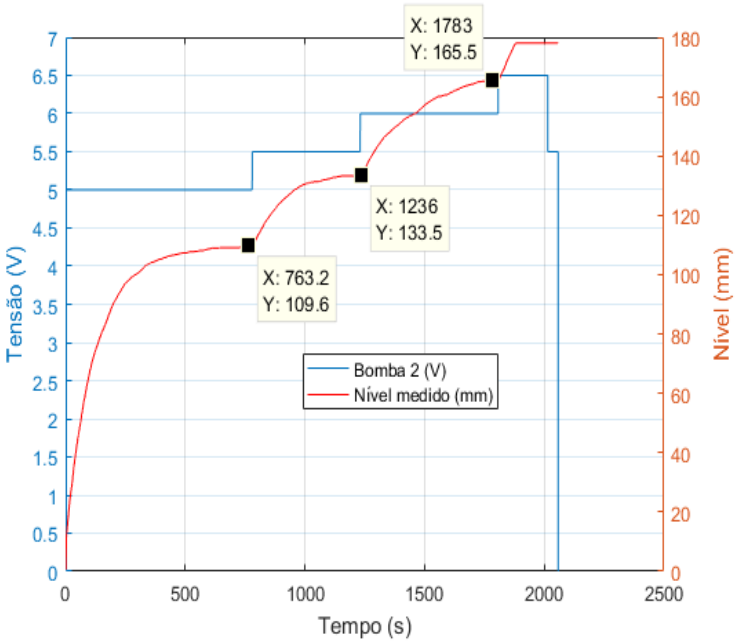
3.1.1 Região de Operação do Nível

O controle de temperatura proposto para esse projeto prevê que o nível de água deva estar acima do trocador de calor. Para atender essa condição, o nível de água deve estar em valores maiores que cerca de 100 mm. Para evitar operar com níveis de reservatórios baixos, que podem acionar a chave flutuante do reservatório, e além disso, podem saturar o medidor, o nível máximo foi limitado para cerca de 165 mm.

3.1.2 Modelagem do Nível

A modelagem de nível foi feita por meio da resposta ao degrau. Para o ensaio de entrada ao degrau, a válvula proporcional e de dreno foram mantidas 100 % aberta, e a tensão na bomba 2 variou entre 0 e 6 V. A partir da tensão de 5 V na bomba 2, com a aplicação de degraus com variação de 0,5 V, mostrado na Figura 28, foi possível obter medições operando dentro dos limites estabelecidos.

Figura 28 – Ensaio de entrada ao degrau na bomba 2



Fonte: Produção do próprio autor.

Devido a não linearidade do medidor de nível, aqui há duas formas de modelar esse sistema, usando a resposta ao degrau. Pelos valores de tensão transmitidos pelo medidor ou pelos valores de nível em medida de comprimento, através da conversão utilizando a relação (1) de conversão encontrada. No segundo caso, seria necessário implementar no *software* esse conversor. Então foi optado pelo primeiro caso.

As respostas obtidas puderam ser aproximadas por funções de primeira ordem com atraso. Neste caso, devido a não linearidade do medidor de nível, as constantes de tempo apresentaram diferenças. Já os ganhos encontrados para as regiões de operações estudadas foram próximos.

A função de transferência de primeira ordem com atraso segue a relação que aparece em (2). O τ é determinado para quando a variável atinge 63,2% do valor estacionário. O ganho K é determinado pela razão entre a variação da saída sobre a variação da entrada. Já o tempo morto L é o tempo que, após a aplicação do degrau, a saída leva para apresentar alguma variação.

$$G(s)=\frac{K}{\tau s+1}e^{-Ls} \tag{2}$$

Diante disso, foram encontradas funções de transferência para as regiões de variação da bomba 2 de 0 a 5 V, 5 a 5,5 V e 5,5 V a 6 V, que estão representadas respectivamente em (3), (4) e (5). Além disso, foi considerado um tempo morto para G_{nivel1}, G_{nivel2} e G_{nivel3} de respectivamente, 0,8, 4,4 e 5 segundos.

$$G_{nivel1}(s)=\frac{\frac{8,383-0,985}{5-0}}{75,2s+1}e^{-0,8s}=\frac{1,484}{75,2s+1}e^{-0,8s} \tag{3}$$

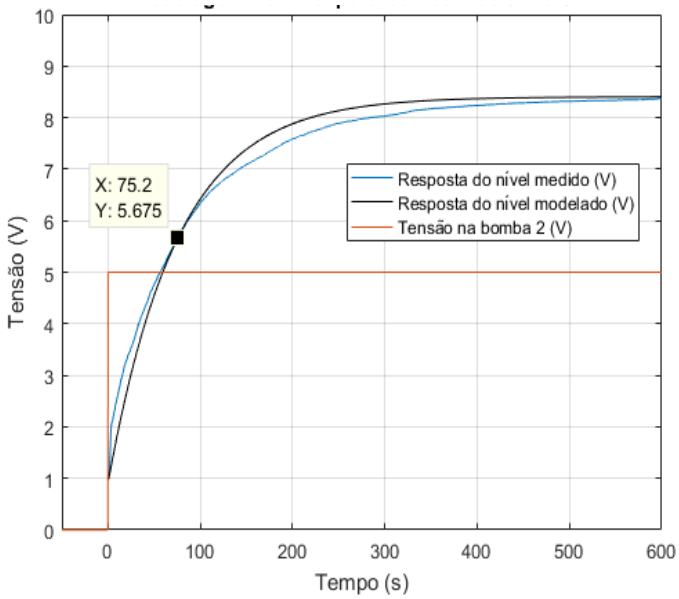
$$G_{nivel2}(s)=\frac{\frac{9,193-8,405}{5,5-5}}{108,2s+1}e^{-4,4s}=\frac{1,63}{108,2s+1}e^{-4,4s} \tag{4}$$

$$G_{nivel3}(s)=\frac{\frac{10,01-9,22}{6-5,5}}{173,6s+1}e^{-5s}=\frac{1,642}{173,6s+1}e^{-5s} \tag{5}$$

3.1.3 Validação do Modelo de Nível

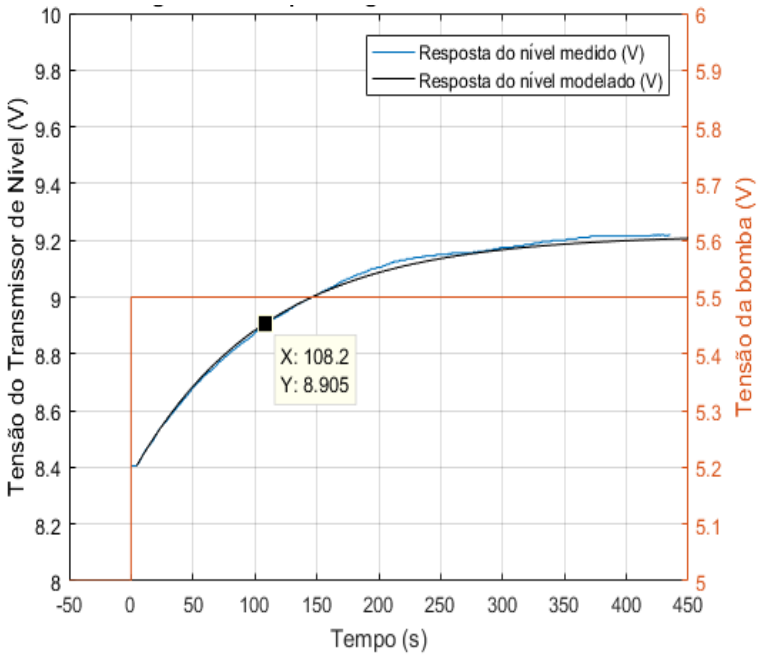
Para validar os modelos, foi testada a resposta das funções de transferência, para as respectivas entradas, consideradas em seus modelos. As respostas obtidas podem ser vistas nas Figura 29, 30 e 31.

Figura 29 – Resposta ao degrau de $G_{nível1}(s)$



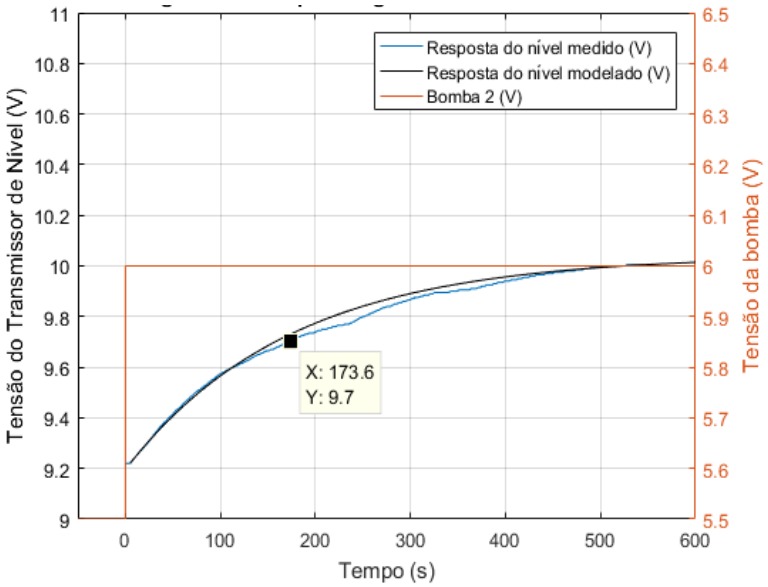
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Resposta ao degrau de $G_{nível2}(s)$



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31 – Resposta ao degrau de $G_{nível3}(s)$



Fonte: Produção do próprio autor.

Os modelos se mostraram satisfatórios, já que a curva de resposta do modelo acompanhou a resposta medida no processo. Para o controle de nível, será encontrado um controlador PID que possa operar bem nessas 3 regiões.

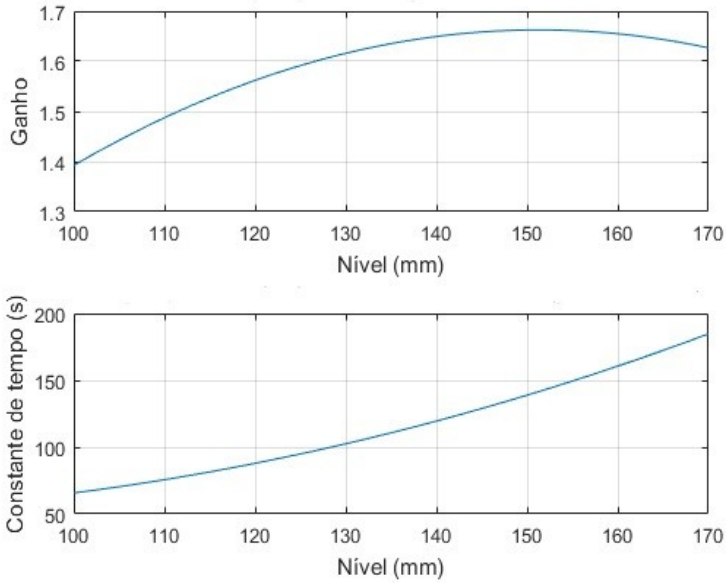
Com os ganhos, constantes de tempos e níveis em milímetros alcançados, foi possível montar duas relações. Uma entre os ganhos e os níveis em milímetros, e outra entre as constantes de tempo e os níveis em milímetros. Isso foi feito através dos comandos *polyfit* e *polyval* do MATLAB®, e podem ser vista em (6) e (7). Para essas equações, o nível em milímetros é representado por x, os ganhos por k e as constantes de tempo por τ.

$$k(x) = -\left(1{,}03 \times 10^{-3}\right)x^2 + 0{,}031\,x - 0{,}69 \tag{6}$$

$$\tau(x) = 0{,}0119\,x^2 - 1{,}5\,x + 97{,}41 \tag{7}$$

Com essas equações foi montada a Figura 32, na qual é mostrada a variação do ganho e da constante de tempo para o nível medido em milímetros.

Figura 32 – Variação do ganho e da constante de tempo em função do nível em milímetros



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 Modelagem de Vazão da Bomba 1

3.2.1 Região de Operação da Vazão da Bomba 1

A bomba 1 está localizada no fluxo do processo aquecedor. É a vazão proporcionada por esse equipamento que irá mudar a temperatura de dentro do tanque de processo.

Na modelagem de temperatura, que é descrita na Seção 3.3, será mostrado em qual faixa de vazão que a temperatura do fluido do tanque sofre mudanças significativas.

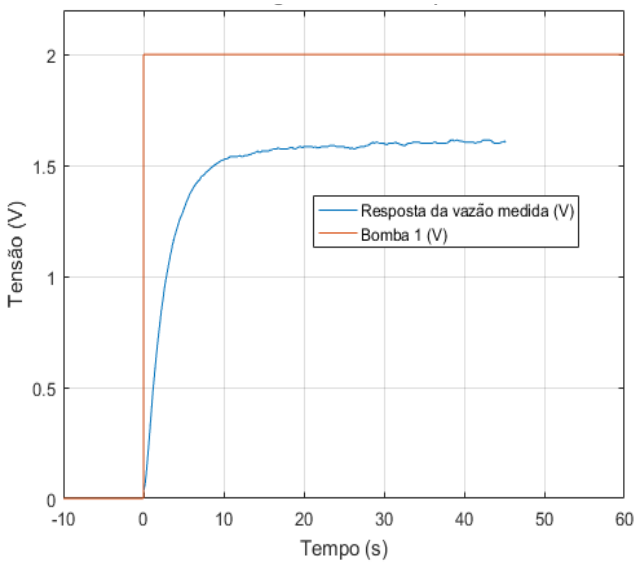
Então para o modelo dessa vazão, será considerada uma região de operação da bomba 1, aproximadamente, entre 0 a 2 V, que corresponde, aproximadamente, a uma faixa de vazão de 0 a 1,7 L/min. Na modelagem de temperatura será mostrada que é apenas nesse intervalo de vazão que ocorrem mudanças significativas da temperatura para a região de operação proposta.

Além disso, outro detalhe importante, é que apenas irá existir vazão na bomba 1, a partir da tensão de 1 V sobre esse equipamento.

3.2.2 Modelagem da Vazão da Bomba 1

A modelagem foi feita através da resposta ao degrau. Com a aplicação de um degrau de 2 V, foi obtida a resposta na Figura 33. Vale lembrar a relação entre a vazão e a tensão do transmissor que é de 1 V = 1 L/min.

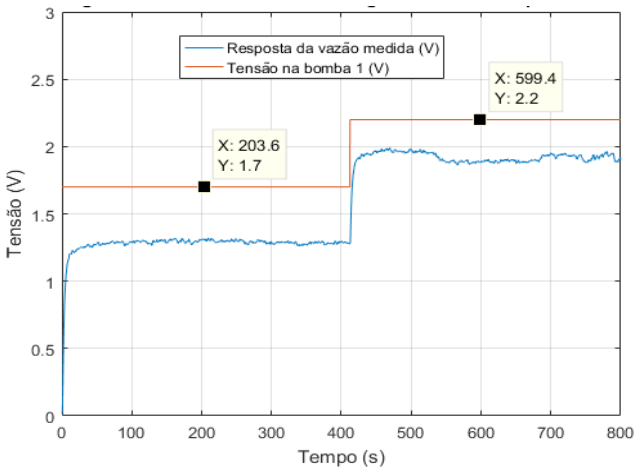
Figura 33 – Ensaio de entrada ao degrau na bomba 1 para vazão



Fonte: Produção do próprio autor.

Para entrar em conformidade com o ensaio que será feito para temperatura, foi feito outro ensaio. Desta vez, foram aplicados dois degraus: um variando de 0 até 1,7 V e outro de 1,7 até 2,2 V. A resposta pode ser visualizada na Figura 34.

Figura 34 – Segundo ensaio de entrada ao degrau para vazão na bomba 1



Fonte: Produção do próprio autor.

A resposta obtida pode ser aproximada por uma função de primeira ordem. Esta segue a relação que aparece em (2), mas com tempo morto de 0 segundos. O τ é determinado para quando a variável atinge 63,2% do valor estacionário. O ganho K é determinado pela razão entre a variação da saída sobre a variação da entrada.

Para a obtenção das funções de transferência, já foi considerada para a vazão a unidade em m^3/s, que será importante no ensaio de temperatura. Para o primeiro ensaio, foi encontrado em (8) o modelo de vazão. Para o segundo ensaio, foi encontrada a função de transferência em (9) para o primeiro degrau aplicado e (10) para o degrau de 1,7 até 2,2 V.

$$G_{vazão\,1}(s)=\frac{\frac{2{,}633\times 10^{-5}-0}{2-1}}{3s+1}=\frac{2{,}633\times 10^{-5}}{3s+1} \tag{8}$$

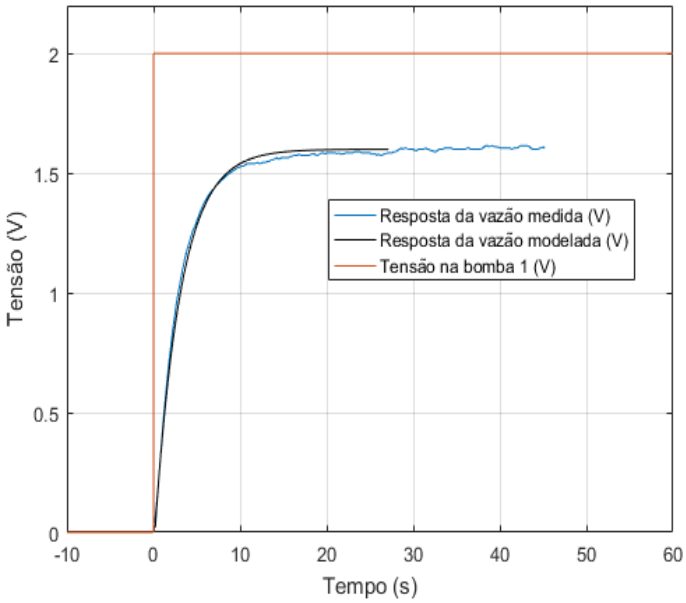
$$G_{vazão\,2}(s)=\frac{\frac{2{,}042\times 10^{-5}-0}{1{,}7-1}}{3s+1}=\frac{2{,}912\times 10^{-5}}{3s+1} \tag{9}$$

$$G_{vazão\,3}(s)=\frac{\frac{3{,}167\times 10^{-5}-2{,}042\times 10^{-5}}{2{,}2-1{,}7}}{2{,}9s+1}=\frac{2{,}25\times 10^{-5}}{2{,}9s+1} \tag{10}$$

3.2.3 Validação do Modelo da Vazão da Bomba 1

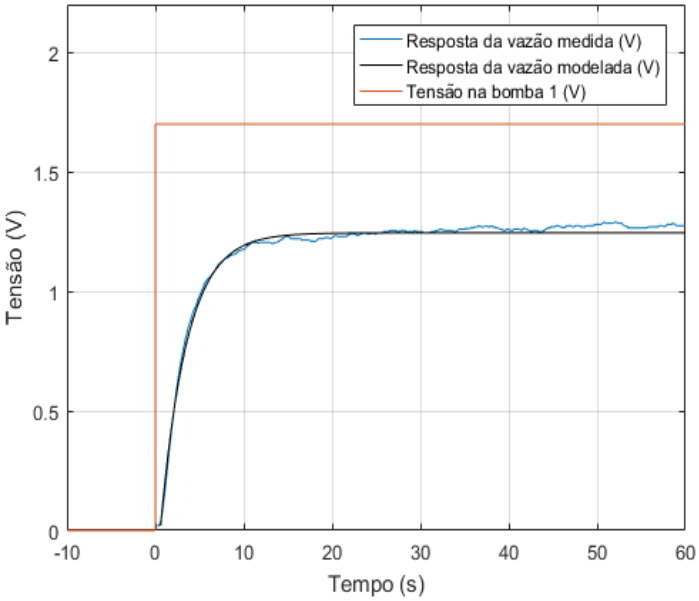
Para validar os modelos, foram testadas as respostas das funções de transferência, para as entradas, consideradas em seus modelos. As respostas obtidas podem ser vista na Figura 35, 36 e 37.

Figura 35 – Resposta ao degrau de $G_{vazão1}(s)$



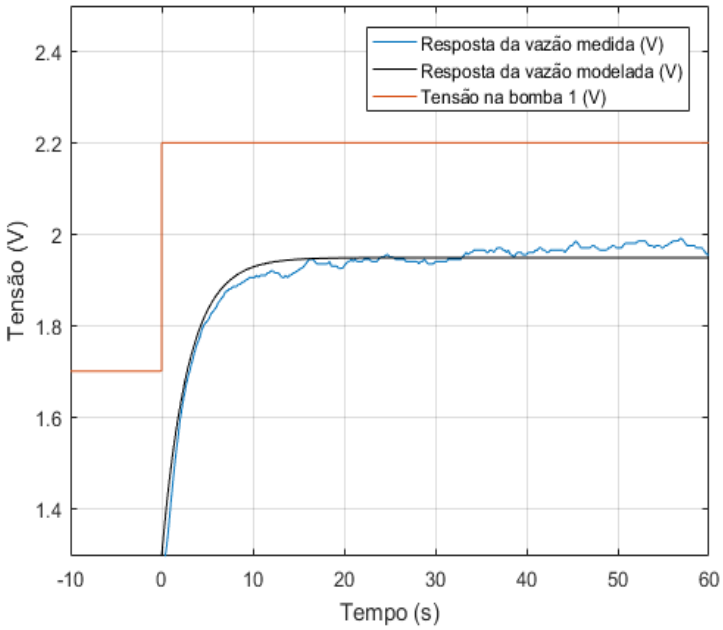
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 – Resposta ao degrau de $G_{vazão2}(s)$



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 37 – Resposta ao degrau de $G_{vazão3}(s)$



Fonte: Produção do próprio autor.

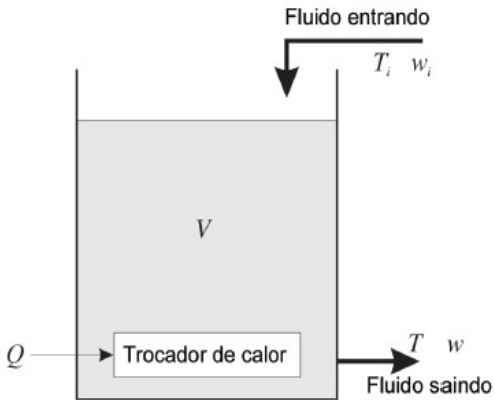
Os modelos se mostraram satisfatórios, já que a curva de resposta dos modelos acompanharam as respostas medidas do processo.

3.3 Modelagem de Temperatura

3.3.1 Obtenção das Equações Diferenciais para Temperatura

A Figura 38 apresenta o esquemático tanque de processo, com algumas das variáveis que serão usadas na obtenção das equações diferenciais do sistema.

Figura 38 – Esquemático do tanque de processo



Fonte: Tecquipment (2011).

Segundo Seborg e outros (2011), as suposições para o modelo do processo são:

- A temperatura de saída T é também a temperatura de conteúdo do tanque;
- A densidade ρ e o calor específico do fluído C são assumidas constantes;
- A perda de calor é insignificante.

Para o tanque de processo com um certo volume V de água, no qual a água tem densidade ρ. Segundo Seborg e outros (2011), a equação que relaciona a vazão mássica de saída (w) e entrada (w_i) pode ser definido como em (11).

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho}\left(w_i - w\right) \tag{11}$$

Além disso, pela primeira lei da termodinâmica, conforme Sandler (2006), a taxa de acumulação de energia será igual à taxa de energia que entra por convecção menos a taxa de energia que sai por convecção. Também, deve ser somada a taxa líquida de adição de calor e a taxa líquida de trabalho realizada no sistema pelos seus arredores, mas para esse processo, segundo Seborg e outros (2011), esses dois fatores podem ser desprezados, por serem muito pequenos.

Então, de acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2002), a equação do balanço de energia, que relaciona energia interna (U_{int}), entalpia (H) e taxa de adição de calor (Q), será dada por (12).

$$\frac{dU_{int}}{dt} = -\Delta\left(w\,\widehat{H}\right) + Q \tag{12}$$

O acento circunflexo representa por unidade de massa. Para este processo em particular, no qual o líquido é puro e está a pressões baixas ou moderadas, a energia é aproximadamente igual à entalpia, como aparece em (13), sendo que a entalpia depende apenas da temperatura (SANDLER, 2006).

$$d\,\widehat{U}_{int} = d\,\widehat{H} = C\,dT \tag{13}$$

A energia interna de um líquido dentro do tanque pode ser expresso por (14).

$$d\,U_{int} = \rho\,V\,d\,\widehat{U}_{int} \tag{14}$$

A expressão da taxa de variação da energia interna é alcançada em (15), derivando (12) e (14).

$$\frac{dU_{int}}{dt}=\rho V\frac{d\widehat{H}}{dt} \tag{15}$$

A entalpia que sai e que entra no sistema aparecem em, respectivamente, (16) e (17). Nessas duas equações, T_i representa a temperatura do fluído de entrada e T_{ref} a temperatura de referência.

$$\widehat{H}=C\left(T-T_{ref}\right) \tag{16}$$

$$\widehat{H}_i=C\left(T_i-T_{ref}\right) \tag{17}$$

Com as equações (16) e (17), a taxa de variação energia por convecção é encontrada em (18). Com a substituição das equações (15) e (18) em (12), o modelo dinâmico do sistema é definido como em (19).

$$-\Delta\left(w\widehat{H}\right)=w_iC\left(T_i-T_{ref}\right)-wC\left(T-T_{ref}\right) \tag{18}$$

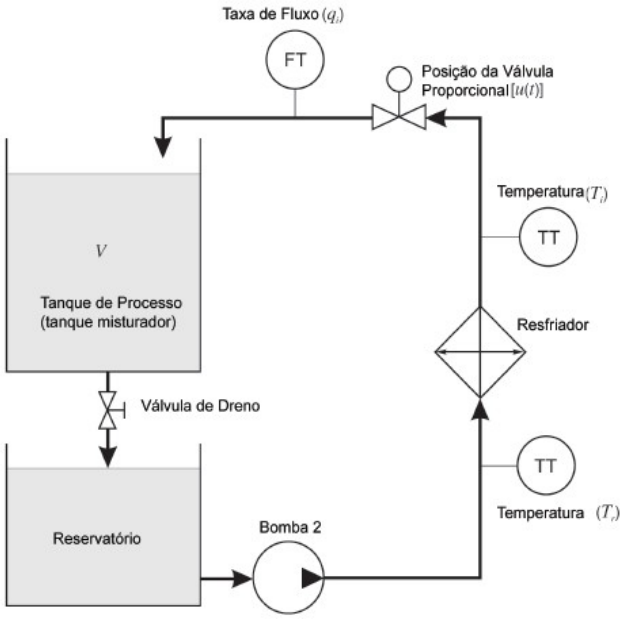
$$\rho\frac{dV\widehat{H}}{dt}=w_iC\left(T_i-T_{ref}\right)-wC\left(T-T_{ref}\right)+Q \tag{19}$$

Com o uso da regra da cadeia e com a substituição de (13) e (11) na equação (19). E além disso, considerando o volume do tanque constante, o modelo pode ser simplificado em (20).

$$\frac{dT}{dt}=\frac{w_i\left(T_i-T\right)}{V\rho}+\frac{Q}{\rho CV} \tag{20}$$

Outra equação importante do sistema de temperatura é definida pelo estudo da malha de processo, mostrada na Figura 39.

Figura 39 – Esquemático da malha de controle do processo



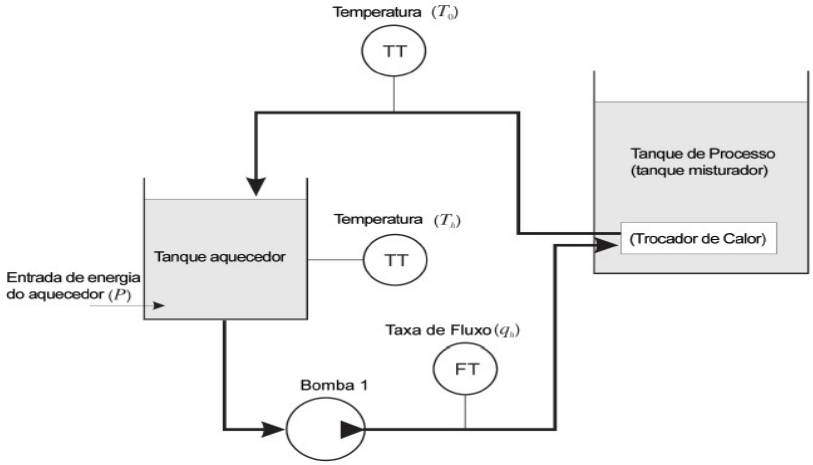
Fonte: Tecquipment (2011).

O *cooler* permite com que a temperatura de dentro do tanque seja diferente da temperatura de entrada. A constante KU_{fan} varia de acordo com a tensão aplicada sobre o *cooler*. A equação do balanço de energia desse equipamento aparece em (21).

$$KU_{fan}\left(T - T_{ref}\right) = \rho q\, C\left(T - T_i\right) \tag{21}$$

E através do sistema do aquecedor, exibido na Figura 40, é possível alcançar mais uma equação importante do sistema de temperatura.

Figura 40 – Esquemático da malha de controle do aquecedor



Fonte: Tecquipment (2011).

Com a hipótese de que a taxa de calor adquirida pelo tanque aquecedor é transferida ao tanque de processo. A energia trocada entre tanque e o fluido que passa pelo trocador de calor aparece em (22). O balanço de energia do tanque aquecedor é definido pela Tecquipment (2011) conforme (23). Vale dizer que ρ_h é a densidade do fluido presente no aquecedor, V_h é o volume do tanque aquecedor, q_h representa a vazão do fluxo aquecedor, T_h mostra a temperatura do tanque aquecedor, T_o mostra a temperatura do fluido após passar pelo trocador de calor e P representa a taxa de energia inserida no tanque aquecedor.

$$Q = \rho_h q_h C \left(T_h - T_o \right) \tag{22}$$

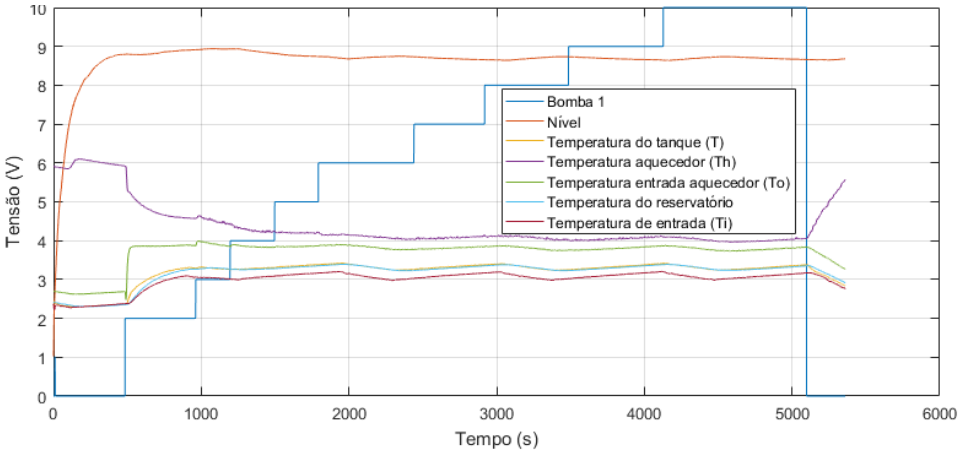
$$C \rho \frac{d\left[V_h \left(T_h - T_{ref} \right) \right]}{dt} = P - Q \tag{23}$$

3.3.2 Região de Operação da Temperatura

Para determinar a região de operação, foi realizado um ensaio através da resposta ao degrau da bomba 1. Nesse teste, ambos o aquecedor e *cooler*, foram ligados na tensão máxima. A bomba 2 e a válvula proporcional foram mantidas constante em 5 V e 10 V, respectivamente. A válvula de dreno foi mantida totalmente aberta e o misturador foi ligado.

Aplicando degraus de 1 V na bomba 1, variando sua tensão de 0 até 10 V, foi possível visualizar a resposta mostrada na Figura 41. Vale lembrar a relação entre a temperatura e a tensão do transmissor de temperatura, que é de 1 V = 10 ºC.

Figura 41 – Ensaio de entrada ao degrau na bomba 1



Fonte: Produção do próprio autor.

A resposta obtida deixa claro que a temperatura do tanque não sofre grandes variações depois que a bomba 1 passa de 2 V. Logo, a região de operação será por volta de 0 até 2 V que representam uma faixa de operação para a vazão do circuito aquecedor de 0 L/min a 1,7 L/min.

Dado que tanto tensão na bomba 2 e a válvula proporcional se mantém constantes, então a vazão do circuito resfriador e o nível também se manterão constantes. Essa vazão será de 4,07 L/min e o nível de 116 mm.

A temperatura do tanque, nos testes, variou entre, aproximadamente, 23,55 ºC e 33 ºC. Cabe salientar que nos ensaios realizados, a temperatura do aquecedor na situação de vazão de fluido da bomba 1 nula foi mantida na sua faixa de temperatura máxima (entre 61,1 ºC e 58,4 ºC).

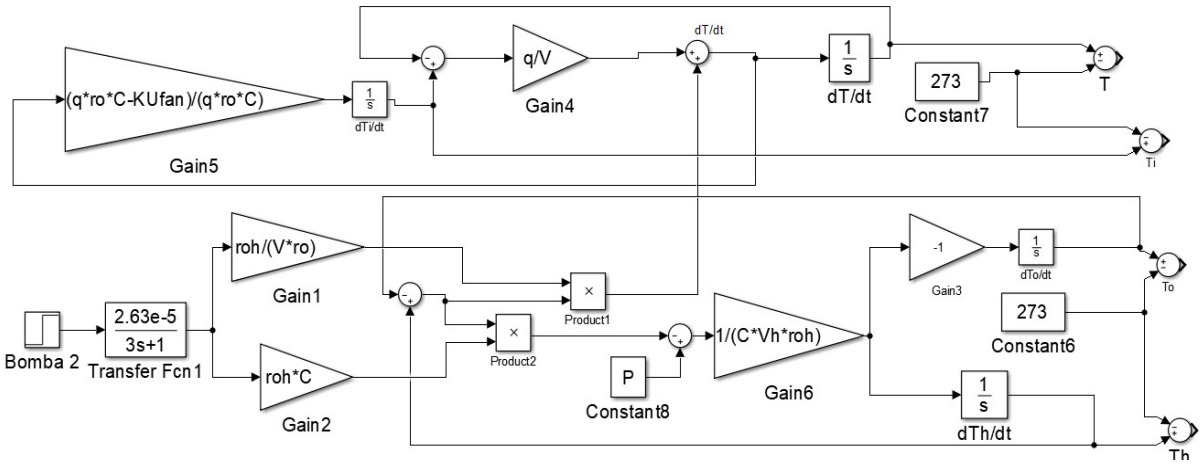
3.3.3 Modelagem da Temperatura

O diagrama da Figura 42 foi utilizado no SIMULINK® para simular o sistema dado pelas equações (20), (21), (22) e (23), considerando nível e vazão do fluxo resfriador constante. As saídas são: T, T_i, T_h e T_o. Já as entradas são a potência no aquecedor e a vazão de fluido da bomba 1. As equações para T_h e T_o são definidas de forma mais clara em (24) e (25).

$$\frac{dT_h}{dt} = \frac{P - Q}{C \rho V_h} \tag{24}$$

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{-(P - Q)}{C \rho V_h} \tag{25}$$

Figura 42 – Diagrama de blocos do sistema da temperatura



Fonte: Produção do próprio autor.

Foram feitos 3 ensaios. No primeiro a bomba 1 variou de 0 para 2 V, que fez com que a vazão mudasse de 0 para 1,68 L/min. No segundo a bomba 1 variou de 0 para 1,7 V, que fez com que a vazão mudasse de 0 para 1,23 L/min. No terceiro ensaio a bomba 1 variou de 1,7 para 2,2 V, que fez com que a vazão mudasse de 1,23 para 1,9 L/min. Vale comentar que para cada ensaio a função de transferência foi alterada, para representar cada região de operação.

Os valores iniciais e os parâmetros usados na Figura 42 para os 3 ensaios são mostrados na Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4. A constante KU_{fan} para o *cooler*, ligado com tensão máxima, é obtido em (21), de forma experimental usando valores para o sistema operando em regime, no qual exista presença de vazão na bomba 1, que permita com que a temperatura do fluido no interior do tanque e a temperatura de entrada do fluido no tanque tenham diferenças significativas.

Quadro 2 – Ensaio para vazão do circuito aquecedor variando de 0 a $2{,}8x10^{-5}$ m^3/s (bomba 1 de 0 para 2 V)

Variável	Valor Inicial	Unidade	Descrição
T	296,55	K	Saída
T_i	296,55	K	Saída
T_h	332,2	K	Saída
T_o	299,8	K	Saída
ρ	997	kg/m^3	Constante
ρ_h	997	kg/m^3	Constante
q	$6{,}78x10^{-5}$	m^3/s	Constante
q_h	0	m^3/s	Entrada
C	4180	J/(kgK)	Constante
V	0,002	m^3	Constante
V_h	0,0029	m^3	Constante
T_{ref}	299,9	K	Constante
P	750	W	Entrada
KU_{fan}	104,4	W/K	Constante

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 3 – Ensaio para vazão do circuito aquecedor variando de 0 a $2{,}17x10^{-5}$ m^3/s (bomba 1 de 0 para 1,7 V)

Variável	Valor Inicial	Unidade	Descrição
T	298,6	K	Saída
T_i	298,4	K	Saída
T_h	333,9	K	Saída
T_o	301,45	K	Saída
ρ	997	kg/m^3	Constante
ρ_h	997	kg/m^3	Constante
q	$6{,}78x10^{-5}$	m^3/s	Constante
q_h	0	m^3/s	Entrada
C	4180	J/(kgK)	Constante
V	0,002	m^3	Constante
V_h	0,0029	m^3	Constante
T_{ref}	299,9	K	Constante
P	750	W	Entrada
KU_{fan}	104,4	W/K	Constante

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 4 – Ensaio para vazão do circuito aquecedor variando de $2{,}17x10^{-5}$ a $3{,}27x10^{-5}$ m^3/s (bomba 1 de 1,7 para 2,2 V)

Variável	Valor Inicial	Unidade	Descrição
T	305,1	K	Saída
T_i	302,66	K	Saída
T_h	320,7	K	Saída
T_o	311,6	K	Saída
ρ	997	kg/m^3	Constante
ρ_h	997	kg/m^3	Constante
q	$6{,}78x10^{-5}$	m^3/s	Constante
q_h	$2{,}17x10^{-5}$	m^3/s	Entrada
C	4180	J/(kgK)	Constante
V	0,002	m^3	Constante
V_h	0,0029	m^3	Constante
T_{ref}	299,9	K	Constante
P	750	W	Entrada
KU_{fan}	104,4	W/K	Constante

Fonte: Produção do próprio autor.

Vale dizer que apesar da potência do aquecedor ser considerada uma entrada. Como seu valor não mudou em nenhum dos testes, então, para o diagrama de blocos, o valor de potência do aquecedor foi mantido como uma constante.

3.3.4 Validação do Modelo de Temperatura

Para validar esse modelo há duas considerações. A primeira é comparar os valores obtidos via simulação com os valores na planta. Isso possibilita verificar se o modelo e a planta apresentaram dinâmicas semelhantes.

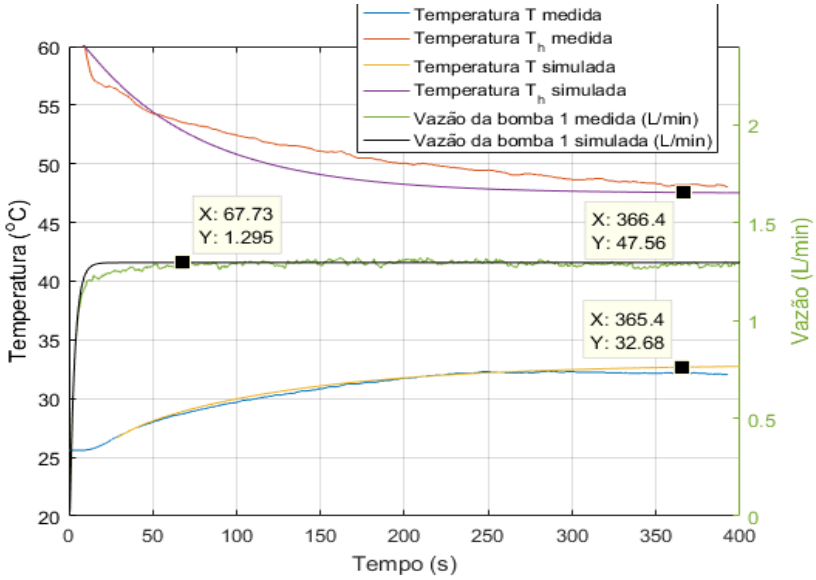
A segunda é verificar como o modelo e a planta se comportam quando os valores obtidos são colocados nas equações diferenciais do processo, especialmente para a temperatura do fluido no tanque e no aquecedor. Nesse caso é esperado que em regime, o valor do resíduo seja bem próximo de zero.

Para esse projeto, utilizou-se os valores de transitório e parte dos valores em regime, na montagem de um histograma para mostrar quais os valores que mais aparecem para as derivadas. Nesse teste é esperado que tanto os valores obtidos pelo modelo quanto os valores reais apresentem resíduo com uma maior frequência em valores mais próximos de zero. Esse

teste permitirá validar o uso das equações diferenciais e parâmetros utilizados para representar o comportamento da planta real.

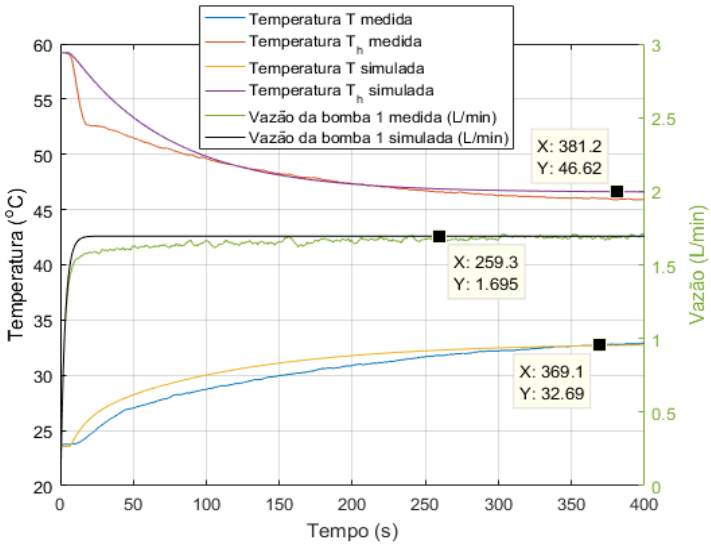
A comparação entre os valores medidos e simulados, para os três ensaios realizados, é apresentado na Figura 43, 44 e 45.

Figura 43 – Comparação entre a resposta real e a simulada para bomba 1 em 1,7 V



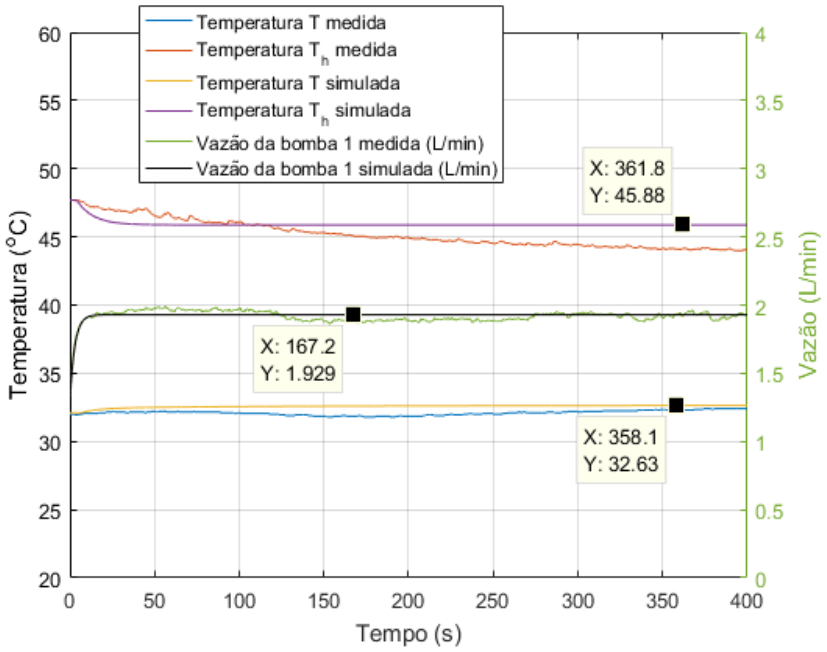
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 44 – Comparação entre a resposta real e a simulada para bomba 1 em 2 V



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 45 – Comparação entre a resposta real e a simulada para bomba 1 variando de 1,7 V para 2,2 V

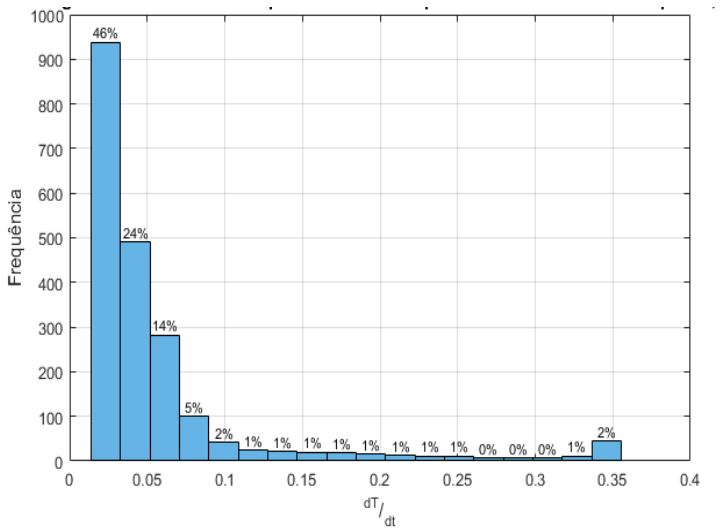


Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que as temperaturas e vazões simuladas apresentaram comportamento similar às medidas.

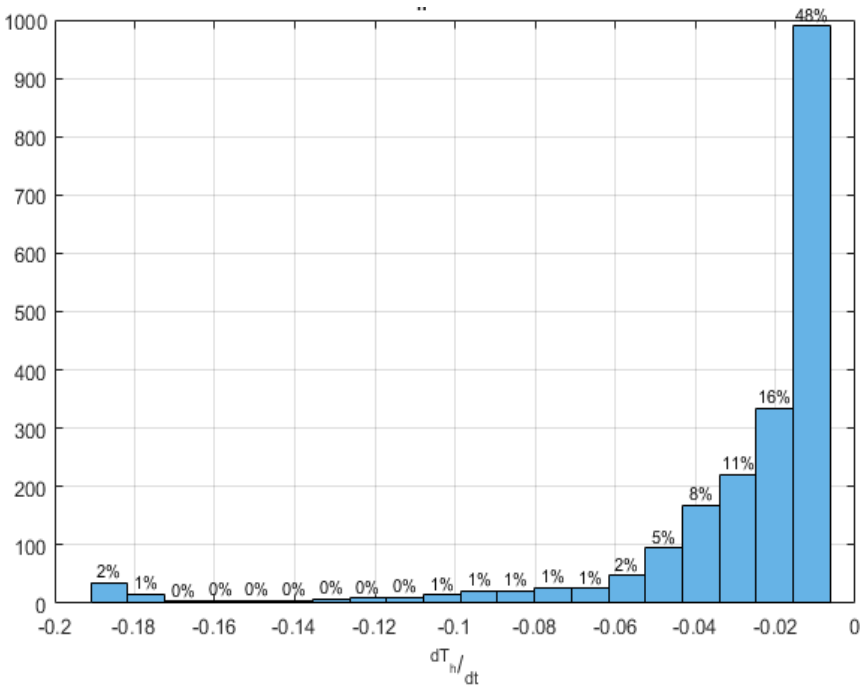
A análise dos modelos também foi realizada avaliando os resíduos para cada uma das variáveis simuladas, usando histogramas. Esses histogramas são apresentados na Figura 46, 47, 48 e 49.

Figura 46 – Histograma da temperatura do tanque para valores medidos com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V



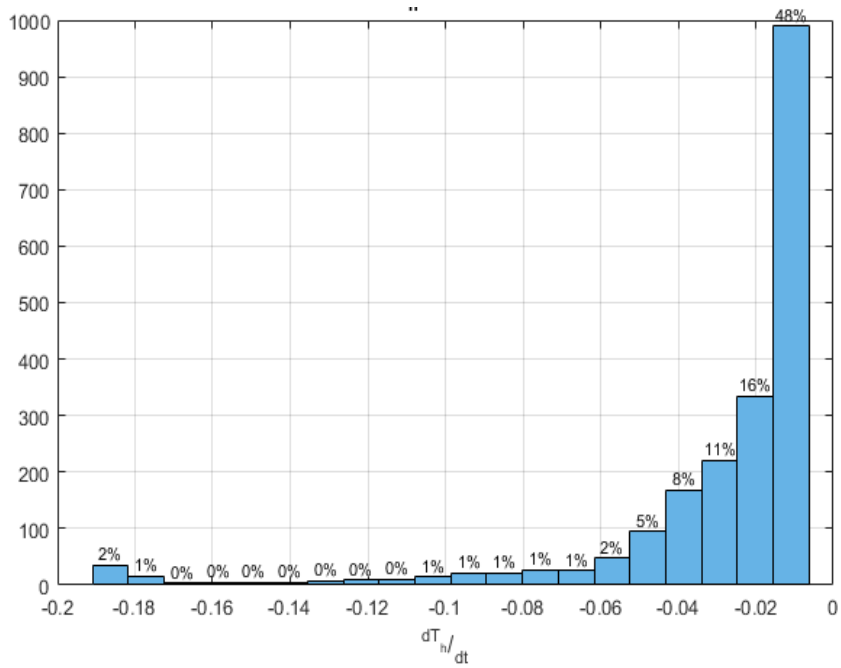
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 47 – Histograma da temperatura do tanque para valores simulados com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V



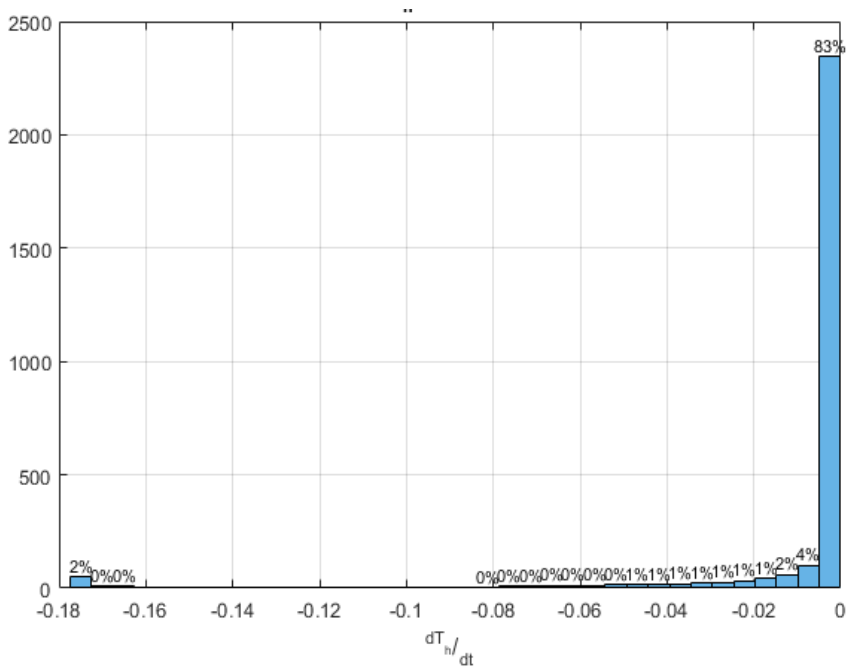
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 48 – Histograma da temperatura do aquecedor para valores medidos com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 49 – Histograma da temperatura do aquecedor para valores simulados com bomba 1 variando de 0 para 1,7 V



Fonte: Produção do próprio autor.

Os histogramas são uma comprovação adicional da qualidade dos modelos. Os valores de maior frequência estão próximos de zeros, tanto para a temperatura do fluido no tanque T como para a temperatura do fluido no aquecedor T_h.

3.3.5 Linearização do Modelo de Temperatura

Para o projeto do controlador de temperatura, é necessário obter o modelo linearizado. Sendo T, T_i, T_h, e T_o saídas; e sendo q_h e P entradas. Em (26), (27), (28) e (29) são apresentadas as equações de estados linearizadas.

$$\Delta T' = \left(\frac{-q}{V}\right)\Delta T + \left(\frac{q}{V}\right)\Delta T_i + \left(\frac{q_h}{V}\right)\Delta T_h + \left(\frac{-q_h}{V}\right)\Delta T_o + \left(\frac{T_h - T_o}{V}\right)\Delta q_h \tag{26}$$

$$\begin{aligned}\Delta T_i' = &\left(\frac{-q}{V} + \frac{KU_{fan}}{\rho CV}\right)\Delta T + \left(\frac{q}{V} - \frac{KU_{fan}}{\rho CV}\right)\Delta T_i + \left(\frac{q_h - q_h KU_{fan}\rho q C}{\rho qVC}\right)\Delta T_h \\ &+ \left(\frac{-q_h + KU_{fan}\rho q_h q C}{\rho qVC}\right)\Delta T_o + \left(\frac{T_h - T_o + T_o qC\rho KU_{fan} - T_h qC\rho KU_{fan}}{\rho q VC}\right)\Delta q_h\end{aligned} \tag{27}$$

$$\Delta T_h' = \left(\frac{-q_h}{V_h}\right)\Delta T_h + \left(\frac{q_h}{V_h}\right)\Delta T_o + \left(\frac{-T_h + T_o}{V_h}\right)\Delta q_h + \left(\frac{1}{CV_h\rho_h}\right)\Delta P \tag{28}$$

$$\Delta T_o' = \left(\frac{q_h}{V_h}\right)\Delta T_h + \left(\frac{-q_h}{V_h}\right)\Delta T_o + \left(\frac{T_h - T_o}{V_h}\right)\Delta q_h + \left(\frac{-1}{CV_h\rho_h}\right)\Delta P \tag{29}$$

A região de operação considerada foi o degrau da bomba 1 que variou de 0 para 2 V. Isso fez com que a vazão mudasse de 0 para 1,68 L/min, logo os valores de equilíbrio nessa configuração são exibidos no Quadro 5.

Quadro 5 – Valores de equilíbrio usados na linearização considerando a região de operação da bomba 1 em 2 V

Variável	Valor Inicial	Unidade	Descrição
T	305,1	K	Saída
T_i	302,66	K	Saída
T_h	320,7	K	Saída
T_o	311,6	K	Saída
ρ	997	kg/m^3	Constante
ρ_h	997	kg/m^3	Constante
q	$6,78x10^{-5}$	m^3/s	Constante
q_h	$2,17x10^{-5}$	m^3/s	Entrada
C	4180	J/(kgK)	Constante
V	0,002	m^3	Constante
V_h	0,0029	m^3	Constante
T_{ref}	299,9	K	Constante
P	750	W	Entrada
KU_{fan}	104,4	W/K	Constante

Fonte: Produção do próprio autor.

Para as equações de estados, existem 4 matrizes. Sendo A a matriz com os coeficientes de T, T_i, T_h, e T_o, B com os coeficientes de q_h e P, C, nesse caso, é a matriz identidade e D, nesse caso, é uma matriz de zeros. Sendo Δx o vetor de estados, Δu a entrada e Δy as saídas. Em (30) e (31) são mostradas essas definições.

$$\Delta x' = A\Delta x + B\Delta u \tag{30}$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \tag{31}$$

Considerando as equações linearizadas (26), (27), (28) e (29), as matrizes A e B são dadas por (32) e (33).

$$A=\begin{bmatrix} \left(\frac{-q}{V}\right) & \left(\frac{q}{V}\right) & \left(\frac{q_h}{V}\right) & \left(\frac{-q_h}{V}\right) \\ \left(\frac{-q}{V}+\frac{KU_{fan}}{\rho CV}\right) & \left(\frac{q}{V}-\frac{KU_{fan}}{\rho CV}\right) & \left(\frac{q_h}{V}-\frac{q_h KU_{fan}\rho q C}{\rho qVC}\right) & \left(\frac{-q_h}{V}+\frac{KU_{fan}\rho q_h q C}{\rho qVC}\right) \\ 0 & 0 & \left(\frac{-q_h}{V_h}\right) & \left(\frac{q_h}{V_h}\right) \\ 0 & 0 & \left(\frac{q_h}{V_h}\right) & \left(\frac{-q_h}{V_h}\right) \end{bmatrix} \tag{32}$$

$$B=\begin{bmatrix} \left(\frac{T_h-T_o}{V}\right) & 0 \\ \left(\frac{T_h-T_o}{V}+\frac{T_o qC\rho KU_{fan}-T_h qC\rho KU_{fan}}{\rho qVC}\right) & 0 \\ \left(\frac{-T_h+T_o}{V_h}\right) & \left(\frac{1}{CV_h\rho_h}\right) \\ \left(\frac{T_h-T_o}{V_h}\right) & \left(\frac{-1}{CV_h\rho_h}\right) \end{bmatrix} \tag{33}$$

Os autovalores da matriz A, na região de operação considerada, são -0,0094, 0 e -0.0273. Portanto o sistema é estável (autovalores com parte real negativa). Com as equações de estados é possível encontrar a função de transferência para o modelo linearizado, que relacione a temperatura T com a entrada q_h. Isso é feito conforme (34).

$$G(s)=C(sI-A)^{-1}B+D \tag{34}$$

Logo a função de transferência que relaciona a temperatura do tanque com a vazão da bomba 1 nessa região de operação é mostrada em (35).

$$G_{temp}(s)=\frac{3561s^2+29{,}52s+0{,}301}{s^3+0{,}03668s^2+0{,}0002558s} \tag{35}$$

4 CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA

4.1 Controle de Nível

4.1.1 Sintonia da Malha de Controle de Nível

Para o controle de nível foi escolhido o modelo de sintonia do PID, segundo Rivera, Morari e Skogestad (1986). Os parâmetros foram obtidos usando a função de transferência G_{nivel3} e de λ igual a 4.

Então os parâmetros proporcional, integral e derivativo, obtidos para o controlador de nível sintonizado foram, respectivamente: $K_p = 26{,}8$, $Ti = 176{,}31$ e $T_d = 0$.

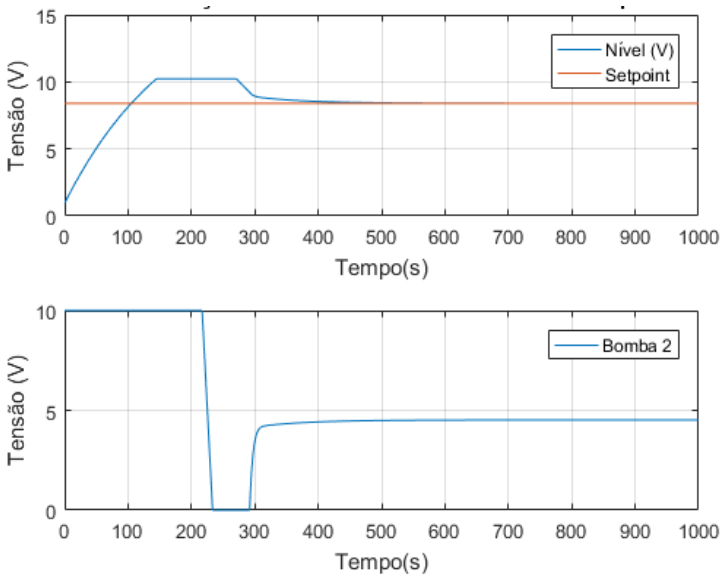
Apesar de ser um método que permite a escolha de controladores robustos, os tempos de resposta em geral são lentos e há a presença de sobressinal. Além disso, esses parâmetros escolhidos, considerando que o atuador não possui saturação, nesse caso, fazem com o que o sistema oscile muito.

Logo há alguns detalhes a serem observados. Um deles é a saturação, que faz com que a bomba opere apenas na faixa entre 0 a 10 V. Essa característica faz com que a resposta, mostrada na Figura 50, seja mais estável, mas ainda com um tempo de resposta relativamente longo e que apresenta sobressinal.

Para tornar o sistema mais agressivo, pode-se diminuir o tempo do integrador. Porém nesse caso, o sobressinal fica ainda mais elevado. Existem várias maneiras de resolver isso. A alternativa que será considerada nesse projeto é o *anti-windup*.

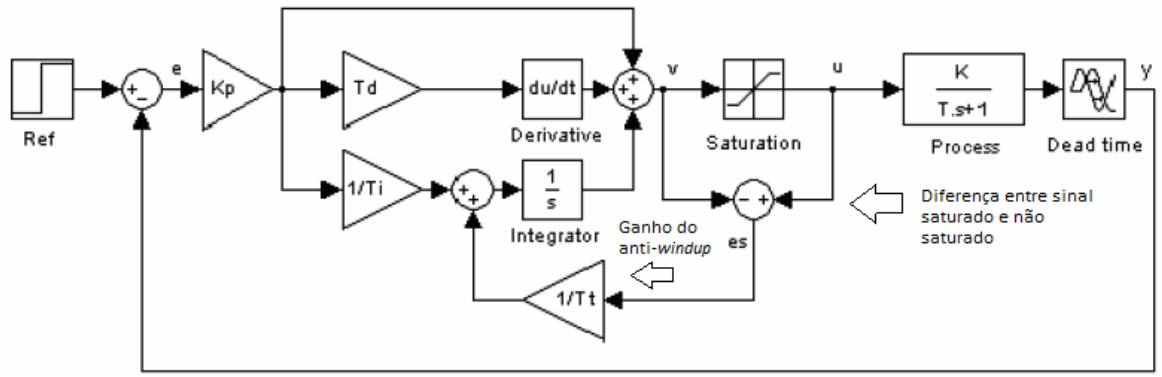
O *anti-windup*, como exibido na Figura 51, retira a diferença entre o sinal de saída do controlador e o sinal saturado e multiplica por um ganho (T_t) que depois é somado ao ganho do integrador. Ou seja, esse esquema muda o valor do ganho integrativo dinamicamente, permitindo que o controlador seja menos agressivo quando o sistema satura. Essa forma de operar o *anti-windup* é chamado de *backcalculation*.

Figura 50 – Resposta de nível simulada para controlador com os parâmetros considerando a saturação da bomba 1 e do medidor de nível



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 51 – Esquemático do *anti-windup*



Fonte: Markaroglu e outros (2006).
Nota: Adaptada pelo autor.

Markaroglu e outros (2006) sugerem um método empírico para encontrar o ganho T_t. Para isso é necessário recorrer a equação empírica, conforme (36), sabendo que τ é a constante de tempo do sistema e L o tempo morto.

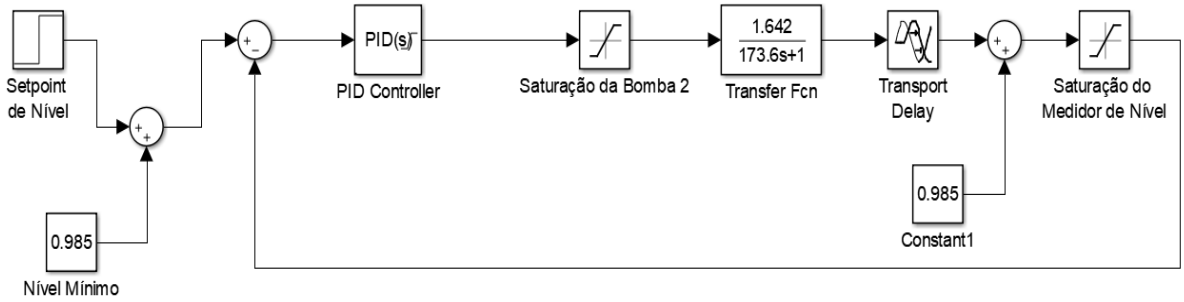
$$T_t = \left(0.59 - 0.65\, e^{-0.09\frac{\tau}{L}}\right) Ti \tag{36}$$

Então, com a diminuição do tempo do integrador de 176,32 para 53,6, foi possível com o uso de (36), encontrar um valor para T_t de 30,3. Em testes realizando pequenos ajuste nesse ganho, um bom valor encontrado para T_t foi de 50.

4.1.2 Simulação do Controle de Nível

Com o auxílio do SIMULINK® foi montado o diagrama de blocos exibido na Figura 52. Deve-se reparar que o bloco de saturação na saída do controlador serve para limitar a saída entre 0 e 10 V, enquanto o bloco de saturação depois da função de transferência simula a saturação do medidor de nível. Além disso, o sistema de *anti-windup* é montado dentro do bloco de PID.

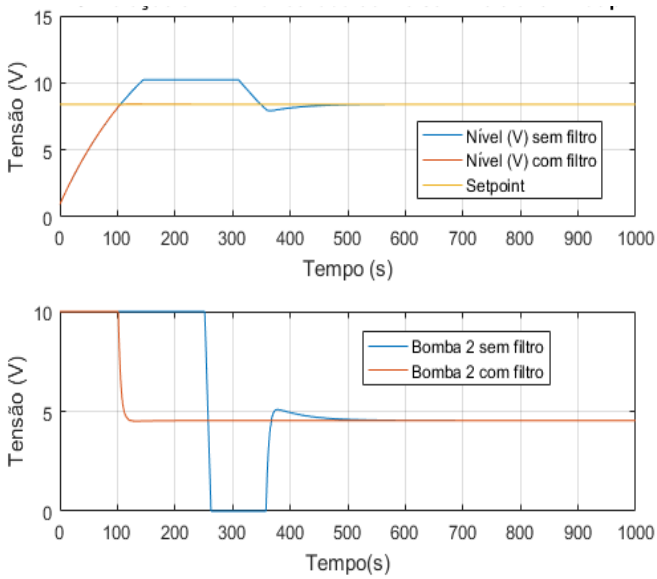
Figura 52 – Diagrama de blocos para a simulação do controle de nível



Fonte: Produção do próprio autor.

Com os ganhos do controlador escolhidos, é apresentado na Figura 53 uma comparação entre o desempenho dos controladores sem e com o *anti-windup*. É possível perceber que o *anti-windup* elimina o sobressinal, permitindo uma resposta mais rápida.

Figura 53 – Resposta do nível simulada para o controlador com e sem o *anti-windup*

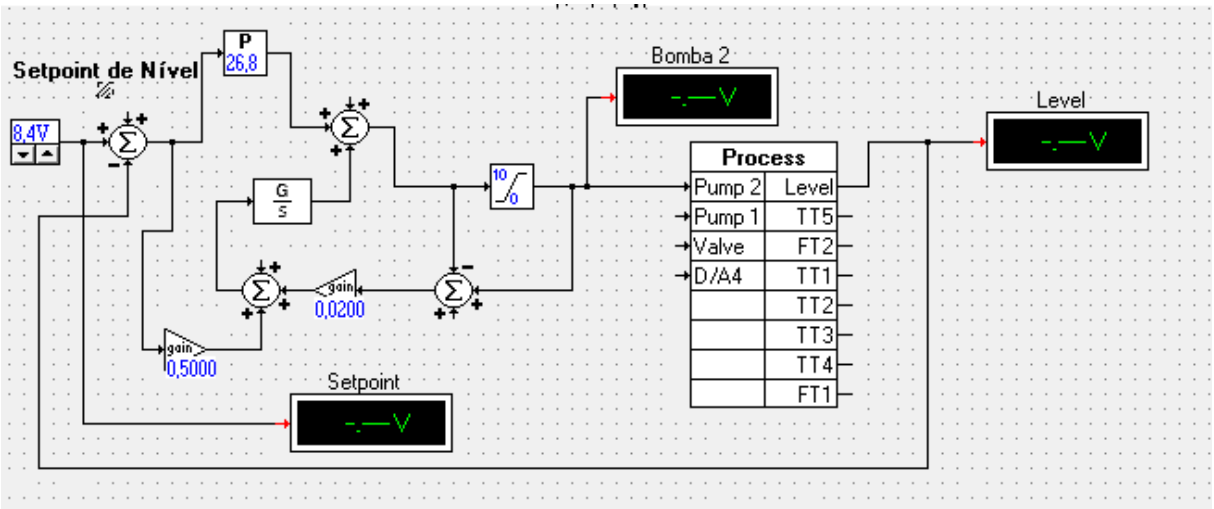


Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.3 Controle de Nível Aplicado na Planta

No *software* CE2000 foi montado o diagrama de blocos, exibido na Figura 54, que permitiu aplicar o controlador projetado. O ganho G, presente no integrador, é igual a 1.

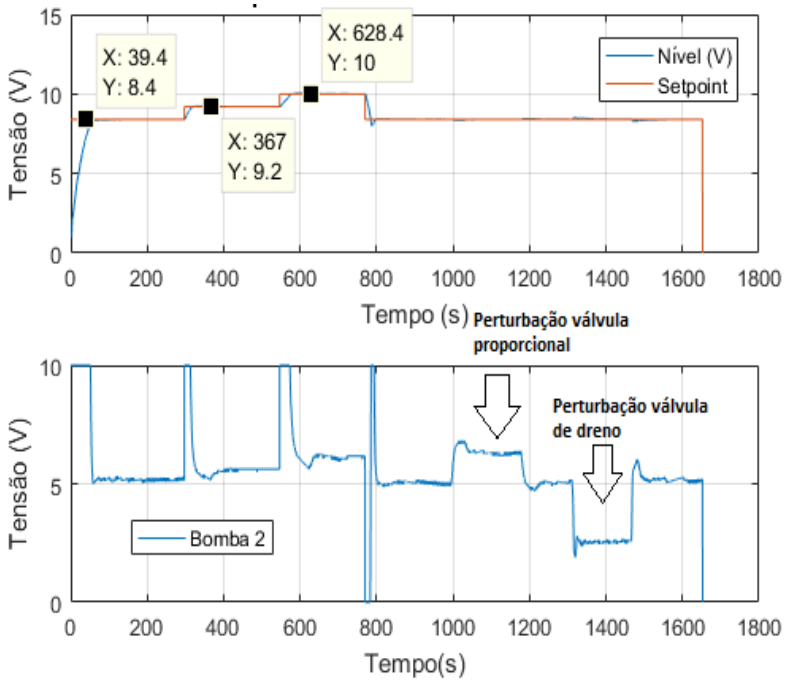
Figura 54 – Diagrama de blocos para aplicar o controle de nível na planta



Fonte: Produção do próprio autor.

A resposta do nível, que pode ser vista na Figura 55, teve baixo sobressinal e foi relativamente rápida. Ainda é possível visualizar nessa resposta, o comportamento do nível para duas perturbações. Uma a partir de cerca de 1000 segundos, onde a válvula proporcional sofre uma variação de 10 para 7 V e depois retorna para o valor original. E a outra entre 1200 e 1400 segundos, onde a válvula de dreno é fechada um pouco e depois é reaberta entre 1400 e 1600 segundos.

Figura 55 – Resposta do nível em malha fechada



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 Controle de Temperatura

4.2.1 Sintonia da Malha de Controle de Temperatura

Através do comando *rltool* do MATLAB®, foi testado para o modelo obtido, controladores que permitissem com que o sistema fosse estável em malha fechada. Essa análise é feita usando o lugar das raízes para o sistema em malha fechada. A função de transferência usada foi a G_{temp} multiplicada por G_{vazao1}.

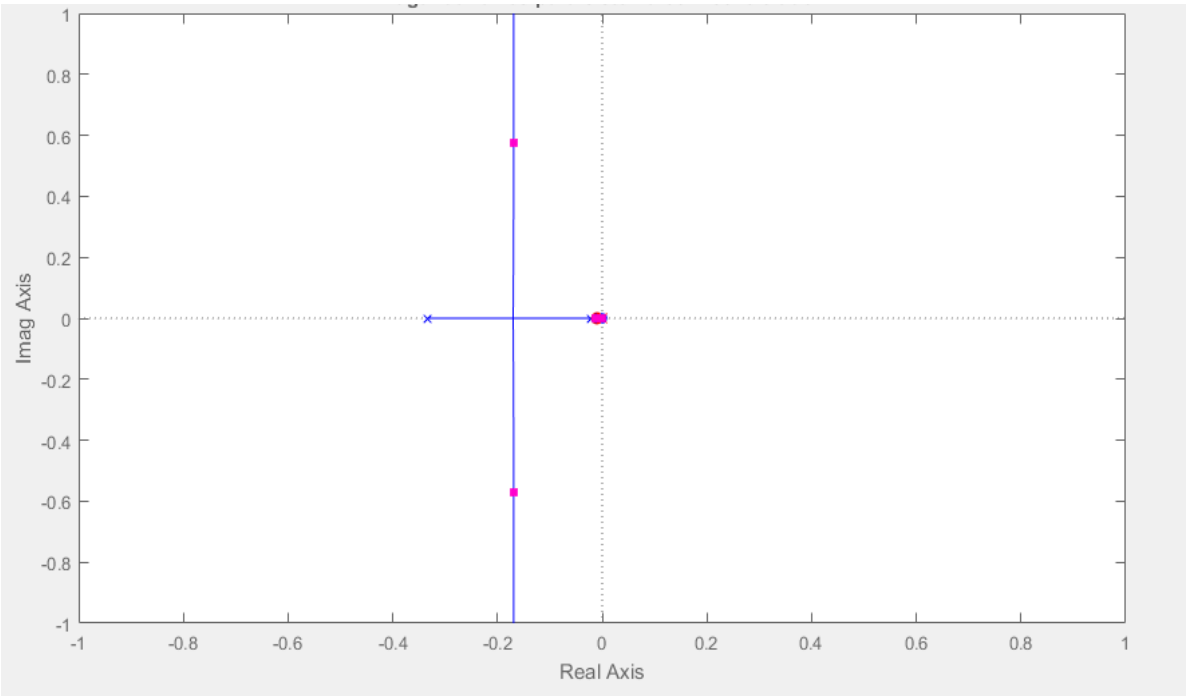
O controlador que será usado é PI. Logo são necessários definir dois parâmetros para o projeto do controlador via lugar das raízes: o ganho do controlador e a localização do zero.

O integrador, representado pelo polo na origem, sozinho, torna o sistema marginalmente estável. Isso pode ser revertido pela adição de um zero no sistema que irá representar o controlador proporcional. Para corrigir a instabilidade, é preciso que o zero esteja próximo da origem. Quanto mais próximo, mais agressivo e oscilatório será a resposta. Isso ocorre, pois, para esse caso, quanto mais próximo da origem, maior será o valor da parte imaginária do par de polos existentes. Então variando a posição do zero foi escolhido o valor de -0,01, que apresentou oscilação relativamente baixa e bom tempo de resposta.

Para diminuir a oscilação da resposta, foi adicionado ainda um ganho. Quanto maior esse ganho mais oscilatório será a resposta. Mas diminuir muito o ganho pode ser problemático, já que a partir de determinado valor, mesmo diminuindo esse parâmetro, o sistema irá se tornar mais oscilatório. Pelos testes realizados, um bom valor encontrado foi de 0,1. Esse ganho permitiu reduzir a oscilação e manter o sistema com um bom tempo de resposta. Então o controlador que atendeu aos critérios desse sistema possui $K_p = 10$ e $K_i = 0,1$.

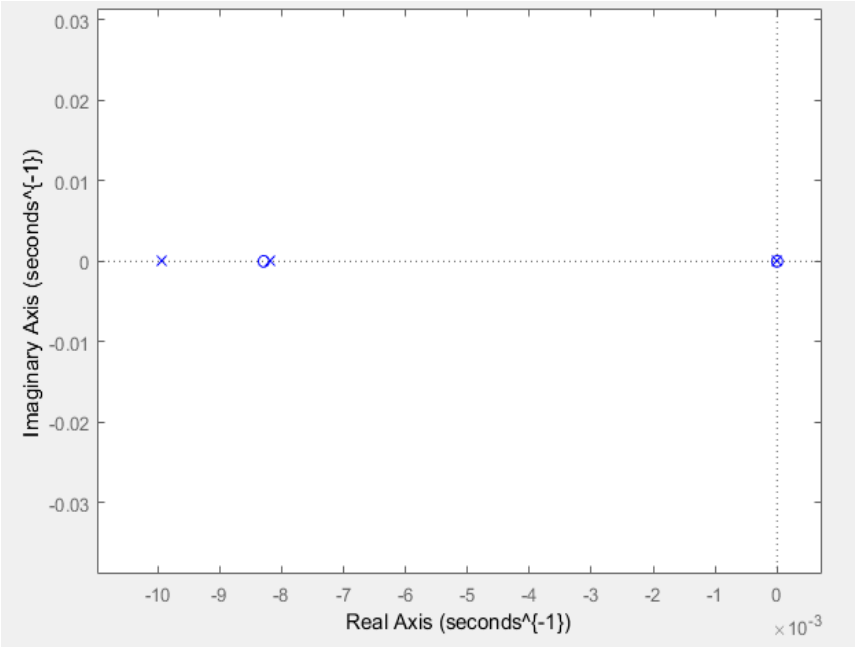
A Figura 56 mostra o lugar das raízes para a malha fechada com esse controlador, já na Figura 57 também mostra o lugar das raízes, mas desta vez ampliado para os zeros e polos em torno da origem, mostrando o zero e seu efeito sobre os polos que tendem para o semiplano direito. Os polos que são mostrados, estão localizados em -0,1759 + 0,5363i, -0,1759 -0,5363i, -0,0099 e -0,0082. A Figura 58 mostra a resposta no ambiente *rltool* usando esse controlador.

Figura 56 – Lugar das raízes para o sistema em malha fechada



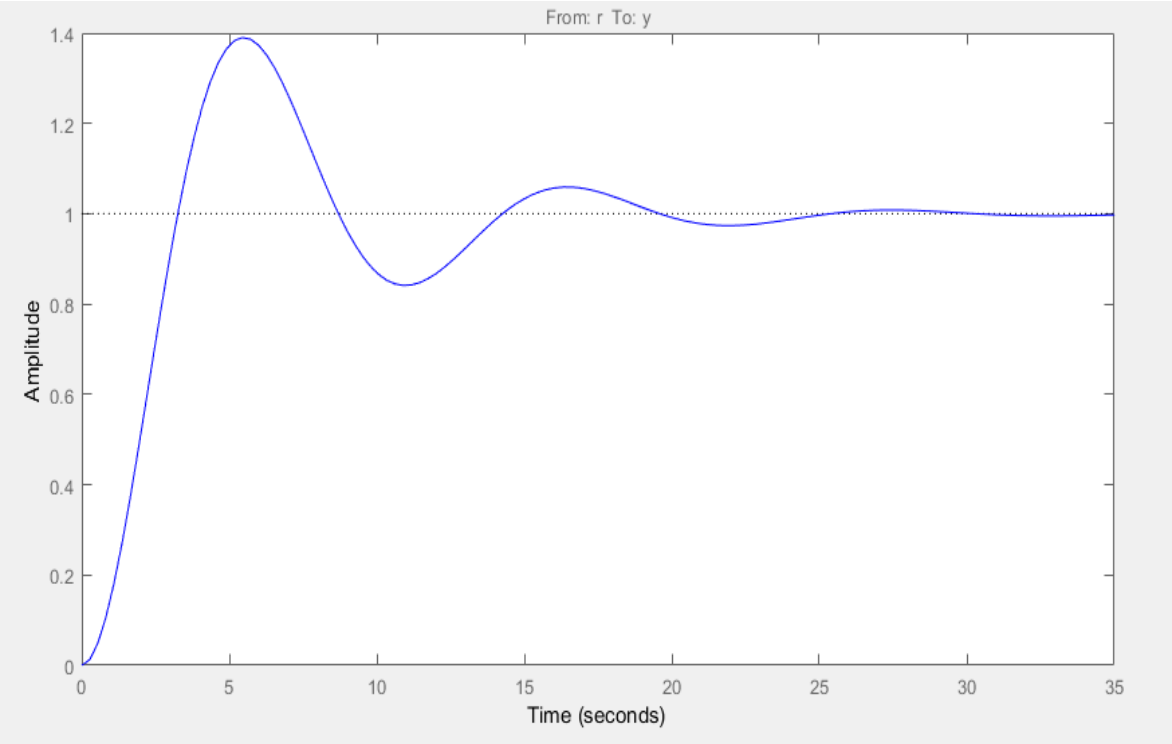
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 57 – Lugar das raízes para o sistema em malha fechada ampliado para os polos e zeros em torno da origem



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 58 – Resposta da função de transferência pra o controlador usado

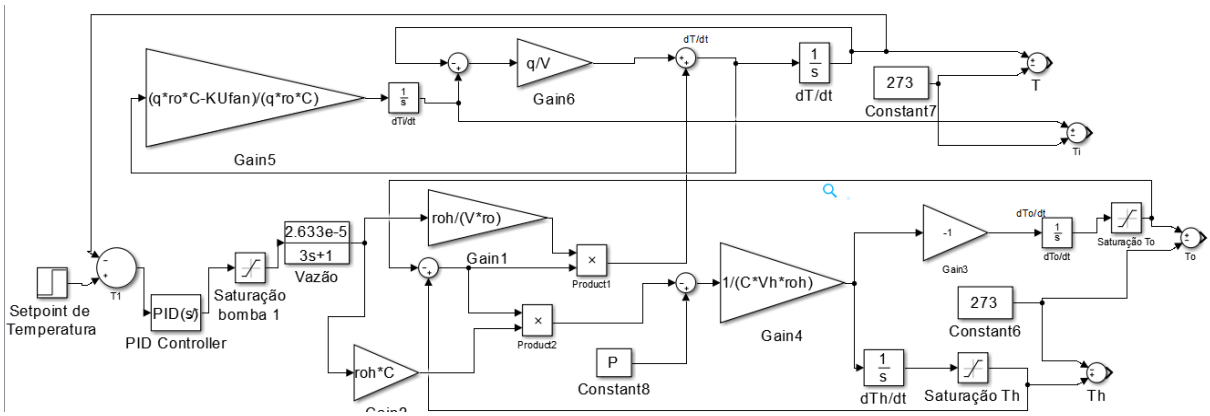


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.2 Simulação do Controle de Temperatura

O controlador foi colocado no modelo não linear, conforme é exibido na Figura 59.

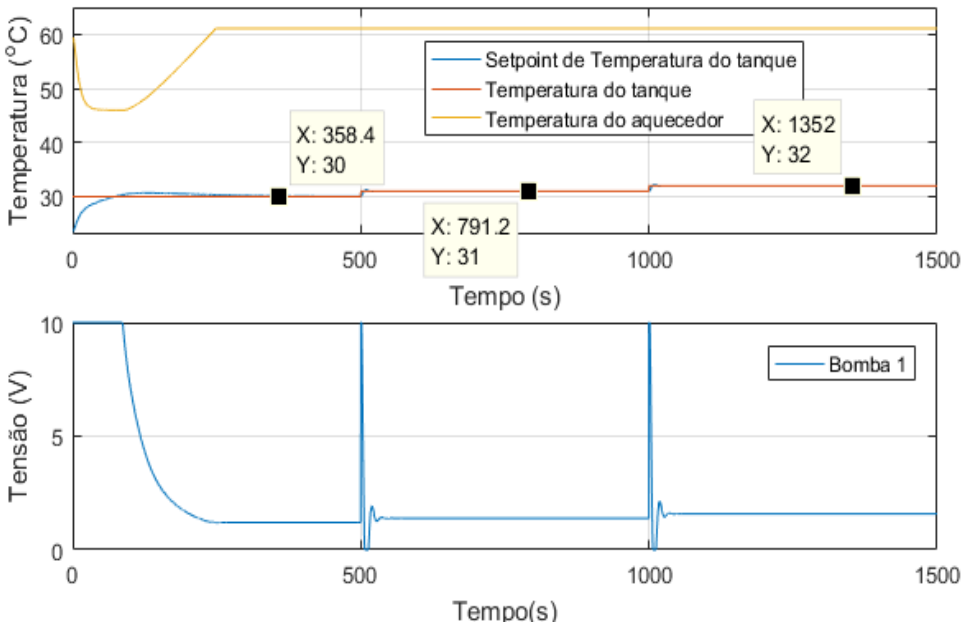
Figura 59 – Diagrama de blocos para simulação do controle de temperatura



Fonte: Produção do próprio autor.

Há dois blocos de saturação que impedem que a temperatura do aquecedor exceda o limite máximo ou que a temperatura após o trocador de calor se esfrie mais que a temperatura ambiente. Além disso há um bloco que simula a saturação da bomba 1. Aplicando diferentes valores de referência na Figura 60 é obtida a resposta em malha fechada para o sistema de temperatura.

Figura 60 – Resposta da temperatura simulada para sistema com controlador

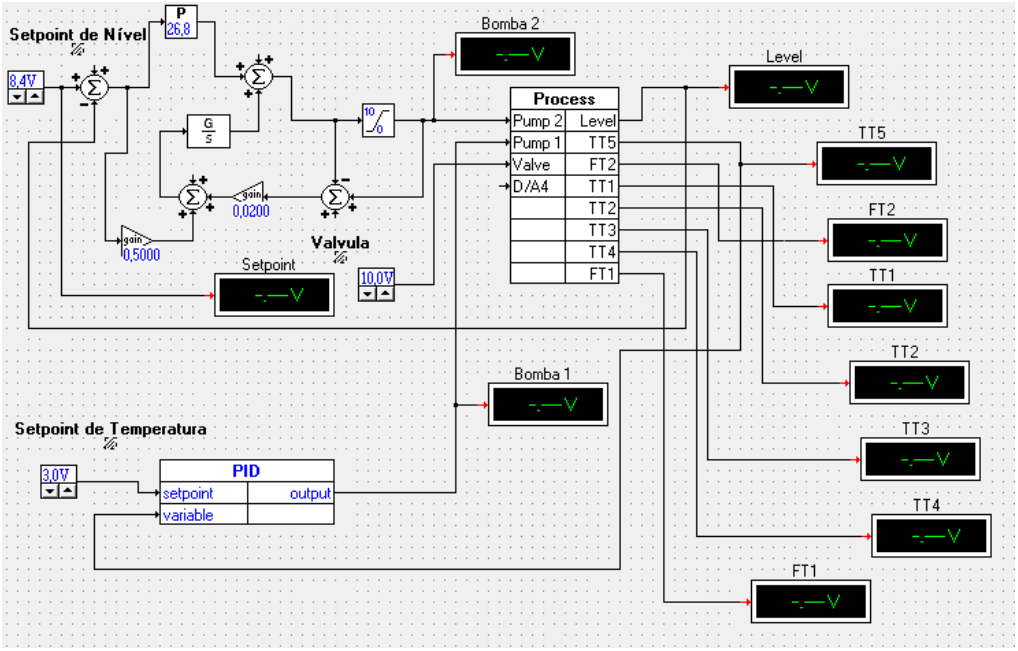


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.3 Controle de Temperatura Aplicado na Planta

No *software* CE2000 foi montado o diagrama de blocos, exibido na Figura 61, que permitiu aplicar o controlador projetado. Vale lembrar que o ganho G, presente no integrador, é igual a 1.

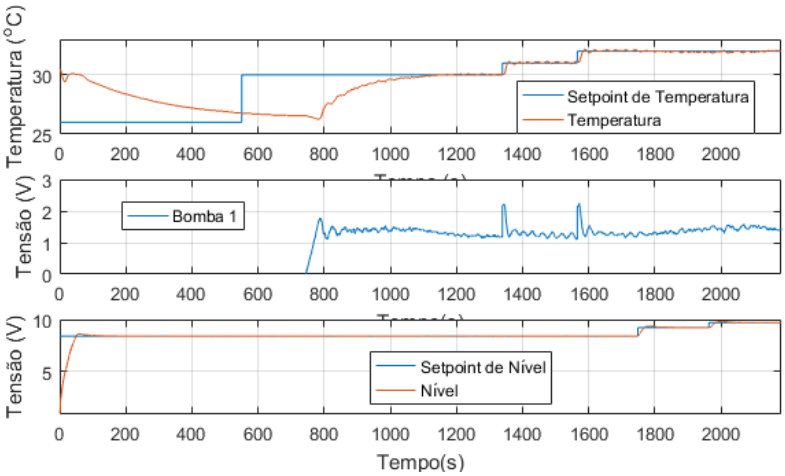
Figura 61 – Diagrama de blocos para aplicar o controle de temperatura na planta



Fonte: Produção do próprio autor.

A resposta de temperatura, que pode ser vista na Figura 62, teve sobressinal pequeno e foi relativamente rápida.

Figura 62 – Resposta da temperatura em malha fechada



Fonte: Produção do próprio autor.

De maneira geral, o sistema consegue controlar a temperatura para as referências usadas. Para a região de operação escolhida, mesmo com a variação do nível, é perceptível que o controlador consegue compensar essa variação, impedindo que a temperatura sofra grandes pertubações.

Outro ponto interessante é o resfriamento máximo que é obtido quando a vazão da bomba 1 é zerada. O problema, nesse caso, é que a resposta é muito lenta e pode interferir de maneira negativa, caso, no meio desse processo, ocorra uma mudança de referência.

5 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS

Os instrumentos de medição, junto com as bombas e a válvula proporcional mostraram muita eficácia no controle proposto desse projeto. Com exceção do medidor de nível, que apresentou problemas ao tentar realizar a calibração para os valores recomendados pelo manual. Mas isso não impediu o prosseguimento do projeto, já que a partir da calibração realizada, foi montada uma relação entre o nível medido em milímetros e a tensão de saída do transmissor, através de um polinômio.

O *software* CE2000 tem um layout bem semelhante ao do SIMULINK®. Isso facilitou no aprendizado e permitiu a implementação do sistema de controle e aquisição de dados, itens cruciais para o desenvolvimento do projeto.

A modelagem de vazão, que foi necessária no estudo do controle da temperatura, foi realizada com base na análise da resposta ao degrau em uma região de operação específica. A modelagem se mostrou eficaz e traduziu bem o comportamento da planta. A modelagem de nível, que também foi realizada com base na análise da resposta ao degrau, se mostrou eficaz e traduziu bem o comportamento da planta nas regiões propostas.

Nesse processo foram geradas 3 funções de transferência, sendo que uma delas foi usada no projeto do controlador, o qual atendeu os outros dois modelos em suas respectivas regiões de operação.

A modelagem de temperatura, que foi feita através das equações diferenciais físicas do sistema, traduziu bem a dinâmica dos sistemas. Houve pequenas diferenças na dinâmica do modelo comparado com a dinâmica real, mas isso não impediu realizar o projeto do controlador, o qual controlou a planta com êxito. A modelagem realizada permite que modelos para outras regiões de operação sejam obtidos, para o projeto de novos controladores.

O controlador de nível foi sintonizado segundo o projeto de Riviera, Morari e Skogestad (1986). A obtenção de uma resposta mais lenta e com sobressinal foi compensada com o

aumento do ganho do integrador e o uso de um *anti-windup*. O ganho do esquema *anti windup* foi definido conforme é mostrado por Markaroglu e outros (2006).

O controlador de temperatura foi obtido linearizando as equações de termodinâmica do tanque de processo. Com a função de transferência gerada, foi através do lugar das raízes que foi possível obter um controlador que permitisse criar um sistema estável. O resultado em malha fechada foi de uma resposta relativamente rápida e sem sobressinal, considerando a região de operação proposta.

Em trabalhos futuros é possível criar sistemas que usem outras estratégias de controle. Outro tema interessante é a criação de sistemas que permitam o diagnostico de falha em válvulas, como maneira de agilizar os processos de intervenção para solucionar possíveis problemas que possam ocorrer em uma planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. 2. ed. New York: John Wiley, 2002.

FONSECA, D. **Modelagem e controle adaptativo de uma planta didática de nível com instrumentação industrial**. 82 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MARKAROGLU, H.; GUZELKAYA, M.; EKSIN, I.; YESIL, E. Tracking time adjustment in back calculation anti-windup scheme. In: EUROPEAN CONFERENCE ON MODELLING AND SIMULATION, 20., 2006, Istanbul. **Anais eletrônicos [...]**. Istanbul: Istanbul Technical University, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, 2006. Disponível em: http://www.scs-europe.net/services/ecms2006/. Acesso em: 20 nov. 2019.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

RIVERA, D.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal model control: PID controller design. **Industrial Engineering Chemistry, Process Design and Development**, v. 25, n. 1, p. 252–265, 1986.

SANDLER, S. I. **Chemical and Engineering Thermodynamics**. 3. ed. New York: John Wiley, 2006.

SEBORG, D. E.; EDGAR, F. E.; MELLICHAMP, D. A.; DOYLE, F. J. **Process Dynamics and Control**. 3. ed. New York: John Wiley, 2011.

SILVA, F. A. **Controle e Detecção de Falhas em uma Planta Piloto**. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

SONG, B.; SHI, H. Temporal-spatial global locality projections for multimode process monitoring. **IEEE Access**, East China University of Science and Technology, Shanghai, v. 6, p. 9740–9749, 2018.

TECQUIPMENT. **Guia do Usuário CE2000**. São Paulo: TECQUIPMENT, 2009.

TECQUIPMENT. **Manual do Usuário CE117**. São Paulo: TECQUIPMENT, 2011.

THOMAS, W. G. **Modelagem de Uma Planta Didática Mulivariável e Não Linear**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

ANEXO A – PROJETO DE SINTONIA DO CONTROLADOR PID

A Quadro 6 mostra, segundo Riviera, Morari e Skogestad (1986), o projeto de sintonia do controlador PID. A constante de amortecimento é representado por ζ, já τ_1 e τ_2 mostram duas constantes de tempo.

Quadro 6 – Projeto de sintonia do controlador PID

Modelo do Processo	K_p	Ti	T_d
$\frac{K}{\tau s+1}$	$\frac{\tau}{K\lambda}$	τ	–
$\frac{K}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}$	$\frac{\tau_1+\tau_2}{K\lambda}$	$(\tau_1+\tau_2)$	$\frac{\tau_1\tau_2}{\tau_1+\tau_2}$
$\frac{K}{\tau^2 s^2 2\zeta\tau s+1}$	$\frac{2\zeta\tau}{K\lambda}$	$2\zeta\tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
$\frac{K}{s}$	$\frac{1}{K\lambda}$	–	–
$\frac{K}{s(\tau s+1)}$	$\frac{1}{K\lambda}$	–	τ

Fonte: Riviera, Morari e Skogestad (1986).