

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

JÉSSICA DOS SANTOS HOTZ

BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2014

JÉSSICA DOS SANTOS HOTZ

BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE DE NÍVEL E TEMPERATURA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, da coordenação de Engenharia Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. José Dolores Vergara Dietrich

Co-orientadora: Prof^a. Jaqueline Vargas

TOLEDO

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 013

Bancada Didática para Controle de Nível e Temperatura

por

Jéssica dos Santos Hotz

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13:00 h do dia **11 de dezembro de 2014** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Fábio Rizental Coutinho
(UTFPR-TD)

Prof. M. Jorge Augusto Vasconcelos Alves
(UTFPR-TD)

Prof. M. José Dolores Vergara Dietrich
(UTFPR-TD)
Orientador

Visto da Coordenação

Prof. M. Alessandro Paulo de Oliveira
Coordenador da COELE

Dedico este trabalho aos meus pais,
que sempre me apoiaram nas minhas escolhas
e me incentivaram a lutar pelos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por ter me dado a vida, meu bem mais precioso.

Agradeço infinitamente aos meus pais, Marcos Hotz e Ivone M. S. Hotz, por me apoiarem nas minhas decisões, por me incentivarem a nunca desistir nos momentos de dificuldade, por todo o carinho e confiança, e também pela paciência e compreensão, quando em muitos momentos estive ausente por causa de provas e trabalhos.

Ao meu irmão Vitor Emanuel S. Hotz, meu melhor amigo, que sempre me traz alegria. Você sempre acreditou em mim.

A meus avós, Eudina e Sebastião, pela presença em toda minha vida, pelos conselhos e por sempre enxergarem o melhor de mim.

Ao meu namorado, Ruahn Fuser, pela confiança, parceria e cumplicidade. Obrigada por sempre acreditar na minha competência, por nunca desistir de mim e nunca deixar que eu desistisse. Eu devo grande parte desta conquista a você.

Ao meu orientador, José D. Vergara Dietrich, por ser mais que um professor, ser um grande amigo, que se dedica ao máximo à sua profissão ajudando os alunos a resolver os problemas mais complexos, mesmo que fora de seu horário de trabalho.

À minha co-orientadora, Jaqueline Vargas, por todos os ensinamentos, conselhos e momentos de descontração.

Por fim, agradeço a todos meus amigos que fizeram parte de minha graduação, principalmente ao Juliano da Rocha Queiroz, Anderson Carlos Woss e Lucas Felipe Rockenbach com quem partilhei inúmeras madrugadas de estudo, preocupações, ansiedades, triunfos, alegrias, conhecimentos e amizade.

“No fim tudo dá certo, e se não deu certo
é porque ainda não chegou ao fim”

(Fernando Sabino, 1998)

RESUMO

HOTZ, Jéssica dos Santos. **Bancada didática para controle de nível e temperatura.** 2014. 66 páginas. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2014.

Este trabalho apresenta a construção de uma bancada didática para servir de ferramenta de ensino das disciplinas de controle supervísório e controle de sistemas lineares. Através da bancada, é possível implementar sistemas para o controle de nível e temperatura de água, visando aproximar os estudantes de problemas reais. Para viabilizar o funcionamento desses sistemas são utilizados vários dispositivos e equipamentos como: controlador lógico programável (CLP) e sensores de medição de nível, de temperatura, e de fluxo. O controle do nível é efetuado por uma bomba centrífuga, e o controle da temperatura é realizado através de um ebulidor elétrico. Com isso, fez-se necessário o estudo do comportamento de todos os materiais envolvidos na montagem e implementação. Após construir a bancada didática, foram modelados os sistemas de nível que possibilitou a implementação de seu controlador PI, e de temperatura que possibilitou a implementação de seu controlador *on/off*. Estas implementações dos controladores contribuíram para demonstrar o funcionamento da bancada. Por fim, todo o desempenho da bancada didática pode ser observado através de um sistema supervísório, que serve para monitorar as mudanças das saídas e também permitir a modificação de parâmetros e variáveis da planta.

Palavras-chave: Bancada didática. Controlador Lógico Programável. Controle de Nível. Controle de Temperatura.

ABSTRACT

HOTZ, Jéssica dos Santos. **Didactic bench for level and temperature control**. 2014. 66 pages. Work course conclusion – Federal University of Technology - Paraná. Toledo, 2014.

This paper proposes the construction of a didactic bench to serve as a teaching tool in classes of supervisory control and control of linear systems. Through the countertop is possible to implement systems for level and temperature control, aiming to bring to students real problems. To provide the operation of these systems are used various devices and equipment such as programmable logic controller (PLC) and level, temperature, and flow sensors. The level is controlled by a centrifugal pump, and temperature control is performed by an electric boiler. Thus, it was necessary to study the behavior of all materials involved in the assembly and system implementation. After building the didactic bench were modeled the level and temperature systems that enabled the implementation of its PI controllers, which in addition to having a good performance contributed to demonstrate the operation of the bench. Finally, all the performance of the bench can be observed by a supervisor system which serves to monitor the changes of the variables of outputs also allow the modification of parameters and variables of the plant.

Keywords: Didactic Bench. Programmable Logic Controller. Level Control. Temperature Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Diagrama de tubulação e instrumentação da bancada didática..... | 19 |
| Figura 2 – Ciclo de processamento dos CLPs | 26 |
| Figura 3 Controlador Lógico Programável TWDLCAE40DRF | 27 |
| Figura 4 - Módulo analógico TM2AMM6HT | 27 |
| Figura 5 - Sistema de supervisão e controle | 28 |
| Figura 6 – IHM S5T Magelis daSchneider Eletrics | 29 |
| Figura 7 - Identificação da planta | 34 |
| Figura 8 - Resposta do sistema ao degrau na entrada | 34 |
| Figura 9 - Bancada didática para controle de nível e temperatura | 37 |
| Figura 10 - Bomba de porão centrífuga..... | 38 |
| Figura 11 - Circuito do driver de acionamento da bomba centrífuga | 39 |
| Figura 12 - Vazão versus tensão..... | 40 |
| Figura 13 - Ebulidor elétrico. | 41 |
| Figura 14 - Ligações elétricas do rele de estado sólido | 41 |
| Figura 15 - Sensor de fluxo de 20 mm | 42 |
| Figura 16 - Circuito amplificador de sinal do sensor de fluxo | 42 |
| Figura 17 - Sensor de pressão MPX5010DP | 43 |
| Figura 18 - Saída versus pressão diferencial | 43 |
| Figura 19 - Sensor chave de nível..... | 44 |
| Figura 20 - Sensor de temperatura LM35DZ..... | 45 |
| Figura 21 – Modo de operação do sensor LM35DZ | 46 |
| Figura 22 - Bomba submergível | 46 |
| Figura 23 - Endereçamento da função PID no bloco de operações | 47 |
| Figura 24 - Bloco PID entrada | 47 |
| Figura 25 - <i>Rung</i> de atribuição da entrada analógica à memória..... | 48 |
| Figura 26 - Ajustes dos parâmetros do controlador..... | 48 |
| Figura 27 - <i>Rungs</i> de atribuição das variáveis às memórias | 49 |
| Figura 28 - Bloco PID saída | 49 |
| Figura 29 - Atribuição da memória à variável de saída | 50 |
| Figura 30 - Monitoramento do PID | 50 |
| Figura 31 - Aba de parametrização do PWM | 51 |
| Figura 32 - Variável do <i>preset</i> recebendo o valor da memória..... | 51 |
| Figura 33 - Linha de comando do acionamento do PWM | 52 |
| Figura 34 - Tela de temperatura do supervisório da IHM | 53 |
| Figura 35 - Tela de nível do supervisório da IHM..... | 53 |
| Figura 36 - Sistema de supervisão | 54 |
| Figura 37 - Tela de configuração dos parâmetros do CLP | 55 |
| Figura 38 - Resposta ao degrau com aplicação de 8,9 V..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 39 - Resposta ao degrau com a aplicação de 10,41 V..... | 58 |
| Figura 40 - Resposta do sistema de nível com um controlador PI | 59 |
| Figura 41 - Resposta ao degrau com aplicação de 200 W | 61 |
| Figura 42 - Controle On/Off | 62 |
| Figura 43 - Resposta do sistema de temperatura com um controlador On/Off | 63 |
| Figura 44 - Esquema de conexões das entradas e saídas no CLP..... | 70 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Equações para sintonia PID propostas por Skogestad para processos sem atraso de transporte | 35 |
|---|----|

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| DC | direct current |
| CLP | controlador lógico programável |
| UCP | unidade central de processamento |
| CPU | central processing unit |
| PWM | pulse width modulation |
| RTU | remote terminal units |
| IHM | interface homem-máquina |
| I/O | input/output |
| SCADA | supervisory control and data acquisition |
| FT | função de transferência |

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|-----------|--|
| $u(t)$ | entrada do sistema no domínio do tempo |
| $U(s)$ | entrada do sistema no domínio da frequência |
| $e(t)$ | signal do erro no domínio do tempo |
| $E(s)$ | signal do erro no domínio da frequência |
| Y_{max} | máxima valor que a saída atinge |
| $y(t)$ | saída do sistema no domínio do tempo |
| $Y(s)$ | saída do sistema no domínio da frequência |
| K_p | ganho proporcional |
| T_i | tempo integral |
| T_d | tempo derivativo |
| T | constante de tempo do sistema |
| K_E | ganho estático |
| θ | atraso de transporte |
| T_c | constante de tempo desejada (em malha fechada) |
| T_a | tempo de amostragem |
| P_H | pressão hidrostática |
| μ | densidade da água |
| g | força gravitacional da Terra |
| h | altura da coluna de líquido |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 15 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL | 16 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 16 |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO | 17 |
| 2 METODOLOGIA..... | 18 |
| 2.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS | 20 |
| 2.2 FERRAMENTA TWDOSUITE..... | 22 |
| 2.3 FERRAMENTA ELIPSE..... | 22 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 23 |
| 3.1 SENSORES E ATUADORES | 23 |
| 3.2 CLP..... | 24 |
| 3.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO | 27 |
| 3.4 SINTONIA DOS CONTROLADORES..... | 30 |
| 3.4.1 Sistemas de controle | 30 |
| 3.4.2 Modelagem e identificação de sistemas | 33 |
| 4 MONTAGEM E IMPLEMENTAÇÃO..... | 36 |
| 4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA..... | 36 |
| 4.2 ACIONAMENTO DA BOMBA CENTRÍFUGA | 38 |
| 4.3 ACIONAMENTO DO EBULIDOR ELÉTRICO..... | 40 |
| 4.4 SENSOR DE FLUXO | 41 |
| 4.5 SENSOR DE PRESSÃO..... | 42 |
| 4.6 SENSORES DE NÍVEL..... | 44 |
| 4.7 SENSOR DE TEMPERATURA..... | 45 |
| 4.8 MISTURADOR..... | 46 |
| 4.9 PROGRAMAÇÃO DO CLP | 46 |
| 4.10 INTERFACE DE SUPERVISÃO | 52 |
| 5 RESULTADOS | 56 |
| 5.1 SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL | 56 |
| 5.1.1 Resultados experimentais (nível)..... | 56 |
| 5.1.2 Cálculo do controlador PI de nível | 58 |
| 5.2 SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA | 59 |
| 5.2.1 Resultados experimentais (temperatura) | 60 |
| 5.2.2 Cálculo do controlador de temperatura..... | 61 |
| 6 CONCLUSÕES | 64 |
| REFERÊNCIAS..... | 65 |
| APÊNDICE A | 70 |

1 INTRODUÇÃO

Em meio ao cenário acadêmico, alunos e mestres se deparam diariamente com diferentes formas de aprendizagem. Segundo FERNANDES (2011) há duas condições para que a aprendizagem ocorra: o conteúdo deve ser potencialmente revelador e o estudante precisa se relacionar de maneira consistente e não arbitrária ao material trabalhado.

O processo de aprendizagem de engenharia está intimamente relacionado aos recursos didáticos utilizados pelo corpo docente em aulas presenciais. Durante a graduação o aluno se depara com uma vasta gama de afirmações, conceitos e deduções sobre os mais diversos assuntos da área acadêmica que, devido ao ensino deficiente de disciplinas como a matemática nas series anteriores, acabam sendo de difícil compreensão pelo aluno. Para minimizar tais dificuldades, busca-se aplicar o conteúdo aprendido na prática através de processos didáticos, servindo como complemento do ensino na construção do conhecimento (BORTOLO, 2006).

Considerando a atividade prática como importante ferramenta de ensino para despertar a curiosidade e o interesse do acadêmico, além de propiciar um melhor entendimento da teoria, algumas universidades têm buscado cada vez mais promover aulas práticas utilizando bancadas didáticas, máquinas, ferramentas, aparelhos metrológicos entre outros, pois nessas aulas os alunos têm a oportunidade de interagir com instrumentos e processos específicos relacionados à atuação profissional de engenharia (DAL MOLIN; ZORZAN; DARONCH, 2013).

Para tanto, este trabalho propõe uma planta didática que disponibiliza um processo a ser controlado e supervisionado em um sistema compacto, demonstrando a operação de dispositivos de controle, sensores e atuadores, com o intuito de simular, em laboratório, um processo industrial, proporcionando ao aluno uma visão mais próxima à da realidade, aproximando o aluno aos problemas encontrados no dia-a-dia de um engenheiro.

1.1 JUSTIFICATIVA

A automação e o controle de processos têm se tornado uma ferramenta indispensável nas indústrias, aumentando a procura de mão de obra qualificada para

desenvolver tais atividades (PORTAL EDUCAÇÃO, 2014). Visando formar profissionais aptos para o mercado de trabalho, é importante buscar formas educacionais que ampliem a proximidade do ensino teórico ao cotidiano profissional, oferecendo elementos essenciais à construção de um conhecimento completo, que diminua a distância entre a sala de aula e o chão de fábrica.

Considerando os benefícios do ensino prático, a planta didática pode ser considerada uma importante ferramenta de aprendizado, possibilitando ao aluno realizar experimentos com rapidez, analisar os diferentes comportamentos de um sistema de controle e automação e, ao mesmo tempo, obter uma convergência de conhecimentos de diversas áreas como elétrica, eletrônica, mecânica, informática, e instrumentação industrial.

Além de melhorar a qualidade das aulas práticas, a construção de uma planta didática para a instituição é uma ótima oportunidade de aperfeiçoar a infraestrutura do laboratório de controle de uma maneira prática e econômica, visto que torna desnecessárias licitações e processos burocráticos. Assim, é possível evitar a necessidade de adquirir-se plantas didáticas comerciais que possuem um custo muito superior ao valor a ser investido na construção de uma unidade própria.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é projetar e construir uma bancada didática de controle de nível de água e temperatura para ser utilizada como apoio nas aulas das disciplinas de Controle Supervisório e Controle de Sistemas Lineares I e II do curso de Engenharia Eletrônica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica envolvendo: (a) sensores e atuadores, (b) controladores lógicos programáveis (c) sistema supervisório (d) sistemas de controle;
- Elaborar o diagrama de tubulação e instrumentação da estrutura;
- Elaborar interface do sistema com um software supervisório;
- Realizar testes de funcionamento da bancada;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho divide-se em seis capítulos. O primeiro capítulo consiste em descrever a importância da utilização das bancadas didáticas nas instituições de ensino, a motivação deste trabalho e o quais os objetivos pretendidos com o seu desenvolvimento.

O segundo capítulo apresenta o diagrama de tubulação e instrumentação da bancada desenvolvida, a listagem dos materiais e equipamentos utilizados e os motivos que levaram à escolha das ferramentas computacionais, para programar o CLP (controlador lógico programável) e criar o sistema supervisório.

O terceiro capítulo expõe a definição dos sensores e atuadores, a importância destes para realização do controle de um processo, seu princípio de funcionamento e as características do controlador programável e do sistema supervisório.

O quarto capítulo consiste em detalhar todos os processos de montagem e implementação da bancada didática, as interfaces utilizadas para acionamento dos atuadores, condicionamento de sinal dos sensores, a programação do CLP, e o desenvolvimento da interface de supervisão.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação dos controladores no sistema de nível e temperatura, demonstrando o funcionamento da bancada.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões relativas à realização deste trabalho, apresentando sugestões para a continuação e aprimoramento em trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento, o projeto foi dividido nas seguintes etapas:

- Planejamento da estrutura física;
- Especificação dos reservatórios;
- Especificação de instrumentos de medição, atuadores e demais componentes eletrônicos;
- Orçamentos e aquisição de equipamentos;
- Instalação dos equipamentos na estrutura física;
- Configuração dos instrumentos de medição e do controlador;
- Criação da interface de supervisão;
- Testes de funcionamento;
- Documentação final de todo o trabalho.

Para a escolha dos instrumentos de medição, atuadores e demais componentes eletrônicos foram analisadas outras bancadas didáticas já existentes, algumas comerciais (PANAMBRA, 2014) (EXTO, 2014) (SMAR, 2014) (T&S, 2014) e outras implementadas em trabalhos acadêmicos anteriores (BARCELLOS, 2005) (RAMOS, 2013) (SILVA, 2012). Considerando estes exemplos de plantas didáticas e pensando no problema de controle de nível e temperatura, foi elaborado o seguinte diagrama de tubulação e instrumentação mostrado na Figura 1.

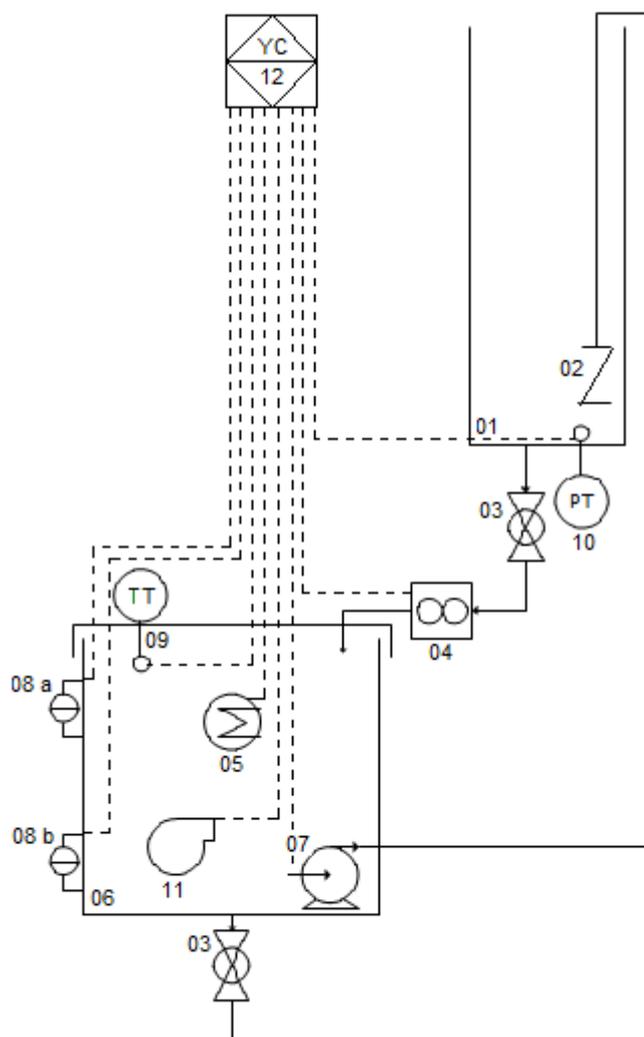


Figura 1 - Diagrama de tubulação e instrumentação da bancada didática
Fonte: Autoria própria

Nesse diagrama é possível visualizar os equipamentos dispostos na planta didática, sendo eles: 01 – reservatório superior, 02 – válvula de retenção, 03 – válvula esférica, 04 – sensor de fluxo, 05 – ebulidor elétrico, 06 – reservatório inferior, 07 – bomba centrífuga, 08 a – sensor de nível máximo, 08 b – sensor de nível mínimo, 09 – sensor de temperatura, 10 – sensor de pressão, 11 – bomba submersa (misturador) e 12 – controlador lógico programável. A partir dessas informações e de outras considerações descritas na seção 2.1, foi possível formular uma lista de materiais e equipamentos necessários ao projeto.

2.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A escolha dos materiais e equipamentos para a confecção da bancada levou em consideração quais equipamentos existentes no laboratório poderiam ser cedidos para sua construção. Por outro lado, para aqueles materiais inexistentes no laboratório, buscou-se uma boa relação custo benefício de forma que o projeto fosse considerado de baixo custo. Além disso, foram realizados experimentos com protótipos de tanques para determinar o tamanho ideal e a disposição adequada dos reservatórios definitivos na planta. Assim, fizeram-se necessário testes de funcionamento de alguns sensores e atuadores em separado, a fim de verificar se o comportamento destes correspondia às funções pretendidas. Obteve-se então a seguinte lista de materiais e equipamentos:

- Um tanque superior de 24 litros;
- Um tanque inferior de 49 litros;
- Um sensor de fluxo de água com saída pulsada;
- Um sensor de pressão modelo MPX5010DP da Freescale;
- Dois sensores de nível com flutuador magnético;
- Um sensor de temperatura LM35DZ;
- Um CLP modelo TWDLCAE40DRF da Schneider Eletrics;
- Um módulo de E/S analógicas TM2AMM6HT da Schneider Eletrics;
- Uma IHM S5T da Schneider Eletrics Magelis;
- Uma bomba centrífuga 12 V com vazão de 1360L/h;
- Um ebulidor elétrico 1000 W /127 V;
- Uma bomba submersa 127 V (misturador);
- Um rele de estado sólido 25 A da NOVUS;
- Uma fonte DC 24 V;
- Um botão de emergência;
- Cooler 12 V;
- Bornes de placa;
- Resistores;
- Capacitores;
- Um regulador de tensão LM7805;
- Um transistor de potência TIP 122;

- Um transistor NPN BC548;
- Dissipador para o TIP 122;
- Um amplificador operacional LM324N;
- Um amplificador operacional OP07;
- Uma placa de circuito impresso;
- Um roteador Wireless;
- Um disjuntor bifásico;
- Três válvulas de esfera de PVC de 20 mm;
- Uma válvula de retenção de 25 mm;
- Tubulação de PVC de 20 mm, conectores e adaptadores;
- Cabo PP 3 x 1 mm²;
- Cabo Manga 4 vias;
- Estrutura para suporte dos tanques em ferro e madeira (bancada);
- Placa de madeira para fixação de equipamentos;
- Fita métrica para graduação do tanque superior;

A partir desta lista foram efetuados os orçamentos e a compra dos materiais. Em seguida iniciou-se a montagem da bancada didática com a instalação dos equipamentos na estrutura física atentando-se para os detalhes, como: interfaces para alimentação dos sensores e atuadores, alinhamento de tubulações, vedação de reservatórios, fixação e conexão de cabos e equipamentos, entre outros.

Tendo a bancada completamente montada, pôde-se dar início à etapa de configuração dos instrumentos de medição e do controlador. Para tal, foi utilizado um software para programar o CLP denominado TwidoSuite da Schneider Eletrics, que utiliza o diagrama *Ladder* como linguagem de programação. Esse software contém vários blocos de funções que desempenham atividades específicas, como leitura de dados dos sensores e aplicação do controle PID. Alguns desses blocos de funções utilizados na programação do CLP serão melhor apresentados no capítulo 4, assim como outros detalhes construtivos da bancada (montagem e implementação).

2.2 FERRAMENTA TWIDOSUITE

O TwidoSuite é um software de programação para CLPs Twido da Schneider Eléctrics. Esta ferramenta de programação foi a escolhida, pois além de ser o software de programação próprio do fabricante do controlador programável utilizado, é disponibilizado nos computadores do laboratório de acionamentos e controle da UTFPR campus Toledo.

Após desenvolver um programa para configurar os equipamentos, realizar testes de funcionamento, inclusive implementar o controlador PID para o nível e a temperatura, foi iniciada a etapa de criação da interface de supervisão. Essa interface foi criada no software Elipse E3 Studio versão demo.

2.3 FERRAMENTA ELIPSE

O Elipse E3 é um sistema de supervisão e controle de processos. Este *software* é composto por uma interface de criação e configuração do sistema com disponibilidade para criação de gráficos, sinóticos (telas) e scripts. Através dessa ferramenta de supervisão, utilizando um driver de comunicação, é possível acessar dados provenientes de dispositivos/equipamentos e, assim, configurar parâmetros do processo pelo computador ou IHM (Interface Homem-Máquina). Além disso o E3 pode guardar dados em disco relativos a alarmes, históricos e fórmulas e também gerenciar as condições de tais alarmes (ELIPSE, 2014).

Considerando a aplicabilidade deste software, a familiaridade com sua interface já utilizada em atividades da disciplina de controle supervísório, e a disponibilidade do mesmo nos computadores da universidade, foi escolhido o Elipse E3 versão demo como a ferramenta de supervisão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As bancadas didáticas adotadas nas universidades geralmente são constituídas por: sensores que captam estímulos físicos externos e fornecem dados correspondentes; atuadores que executam comandos de outros dispositivos; controladores que recebem dados dos sensores e enviam sinais de controle para os atuadores; sistemas de controle que atuam sobre os controladores para que esses executem funções específicas; e sistemas de supervisão, que permitem através de telas de comando a interação do operador com o sistema. Contudo, para realizar este trabalho de modo satisfatório é necessário conhecer as características e o funcionamento de todos os componentes envolvidos.

3.1 SENSORES E ATUADORES

Os sensores são dispositivos capazes de detectar ações ou estímulos externos e responder em consequência. Esses dispositivos convertem uma grandeza física de qualquer espécie, como temperatura, pressão e campo magnético em outro sinal que possa ser transmitido a um elemento indicador, para que este mostre o valor da grandeza que está sendo medida ou que possa ser lido pelo controlador (FIALHO, 2006).

Os elementos sensores também podem ser definidos como transdutores, pois assim como esses, transformam uma forma de energia em outra quando convertem uma grandeza de entrada para uma grandeza elétrica, como corrente, tensão ou resistência elétrica. No entanto, nem sempre essa grandeza elétrica obtida possui as características necessárias para ser utilizada diretamente em um sistema de controle, tornando necessária a sua manipulação por meio de um circuito de interface que finalmente produza um sinal legível ao controlador (WENDLING, 2010).

Um sensor pode ser do tipo analógico ou discreto (digital). O sensor analógico apresenta em sua saída um sinal de tensão, corrente, ou resistência proporcional à grandeza física medida e pode assumir qualquer valor ao longo do tempo desde que esteja dentro da sua faixa de operação. Já o sensor digital pode assumir apenas dois estados distintos em sua saída, como ligado (*on*) ou desligado (*off*), sendo utilizados para monitorar a ocorrência ou não de determinado evento (FIALHO, 2006).

Um atuador, assim como um sensor, é um transdutor que transforma uma forma de energia em outra, porém fazendo o caminho inverso, visto que ao invés de transformar uma grandeza em um sinal elétrico, transforma um sinal elétrico em uma grandeza física, que pode ser movimento, velocidade, calor, entre outras. Também pode ser definido como um dispositivo capaz de atuar sobre o sistema no qual está inserido, em resposta a um comando manual ou automático, quando proveniente do controlador (PAREDE e GOMES, 2011).

Os sensores e atuadores são componentes imprescindíveis para um sistema de controle, visto que são eles que estabelecem a conexão de entrada do controlador lógico programável com mundo externo. São os sensores que enviam sinais das grandezas medidas ao CLP que interpreta, toma as decisões necessárias e transmite aos atuadores sinais de controle para que esses modifiquem o estado do sistema. Para compreender como o CLP interpreta sinais, toma as suas decisões e realiza comandos é necessário entender melhor sobre seu funcionamento e características principais.

3.2 CLP

O controlador programável é um equipamento eletrônico capaz de controlar sistemas automatizados, utilizando para tal atividade instruções armazenadas em uma memória interna programável, que implementam funções de controle específicas. Tais funções podem ser operações lógicas e aritméticas, sequenciamento, temporização e contagem através de módulos de entradas e saídas, visando controlar equipamentos, máquinas e processos. (PAREDE e GOMES, 2011).

Um CLP é basicamente constituído por uma CPU (*Central Processing Unit*), entradas e saídas, uma fonte de alimentação e uma base. A CPU é constituída por um processador que interage continuamente com o sistema de memória, interpreta e executa o programa desenvolvido pelo usuário e gerencia todo o sistema através dos circuitos auxiliares de controle.

Responsáveis por realizar a comunicação entre a CPU e o meio externo, as entradas e saídas podem ser classificadas em digitais ou analógicas. As digitais assumem dois valores discretos de tensão (normalmente 0 ou 10 V e 0 ou 24 V), enquanto as analógicas enviam ou recebem um sinal de tensão variável (0 a 10 V; -5

V a +5 V; -10 V a +10 V) ou de corrente variável (0 a 20 mA; 4 a 20 mA) de um dispositivo (BARCELLOS, 2005). Além das entradas e saídas, o CLP possui a capacidade de expansão com a conexão de módulos de I/O. As entradas analógicas convertem os sinais analógicos recebidos dos dispositivos de entrada em sinais digitais por meio de um conversor analógico-digital (conversor AD). Já as saídas analógicas realizam o processo inverso, no qual convertem sinais digitais em sinais analógicos através de um conversor digital-analógico (conversor DA).

A fonte de alimentação do CLP fornece todos os níveis de tensão para alimentação da CPU, entradas e saídas, funcionando como um dispositivo de proteção que gera uma interrupção caso os níveis de tensão excedam aos valores nominais (BARCELLOS, 2005).

Além da sustentação mecânica, a base permite a conexão elétrica entre módulos, na qual estão presentes os sinais de dados, endereço e controle.

Assim, visto que o CLP realiza um comando ou controle de um sistema a partir de um programa pré-definido em sua memória interna, é necessário que o usuário programe o controlador previamente, a fim de obter a tarefa de controle desejada. Esta programação pode ser feita em quaisquer linguagens que a norma IEC 61131-3 (K.H. JOHN e M. TIEGELKAMP, 2010) preconiza, destacando a linguagem *Ladder* como uma das mais utilizadas.

O princípio de funcionamento do CLP consiste, praticamente, em um ciclo contínuo de execução passo a passo do programa do usuário sem interrupções ou mudanças, a menos que sejam realizadas modificações através de comandos de programa ou ocorra algum erro inesperado devido a problemas de *hardware* ou *software* (SILVEIRA, 2003).

Primeiramente, a CPU carrega o programa do usuário e realiza as inicializações necessárias do CLP. Em seguida, a cada ciclo (varredura) todos os sinais do meio externo aplicados às entradas são lidos e transferidos para a uma determinada área da unidade de memória interna do CLP, denominada tabela imagem de entrada. Estes sinais são associados entre si e aos sinais internos através da lógica funcional que é determinada pelo programa do usuário. Ao término do ciclo de varredura, os resultados da lógica funcional são transferidos à memória da imagem de saída, provocando atuações no meio externo (FILHO, 2010). Este ciclo está representado na Figura 2.



Figura 2 – Ciclo de processamento dos CLPs
Fonte: (FILHO, 2010)

O controlador lógico programável TWDLCAE40DRF (Figura 3), acrescido do módulo de expansão analógico TM2AMM6HT (Figura 4) da Scheneider Eletrics, contém as características necessárias para realizar as funções de controle que a bancada exige são estas:

- a) Dezesseis saídas digitais (quatorze a relé e duas a transistor) sendo que será utilizada uma a relé, para habilitar o funcionamento da bomba submersa (misturador) e uma a transistor, para enviar sinal PWM ao rele de estado sólido e, conseqüentemente, acionar o ebulidor elétrico.
- b) Vinte e quatro entradas digitais, sendo que serão utilizadas duas para os sensores de nível máximo e mínimo e uma para o sensor de fluxo;
- c) Quatro entradas analógicas, com resolução de 12 bits (4096 combinações), sendo que serão utilizadas duas, uma para receber o sinal do sensor de pressão e outra para receber o sinal do sensor de temperatura.
- d) Duas saídas analógicas, sendo que será utilizada apenas uma para enviar o sinal de controle de 0 a 10 V para o amplificador que acionará a bomba centrífuga.



Figura 3 Controlador Lógico Programável TWDLCAE40DRF
FONTE: <http://www.schneider-electric.com>



Figura 4 - Módulo analógico TM2AMM6HT
FONTE: <http://www.schneider-electric.com>

Os Controladores Lógicos Programáveis possuem diversas vantagens em relação aos sistemas de controle automáticos convencionais, visto que podem ser reutilizados, permitem a alteração de parâmetros de controle, apresentam maior confiabilidade e flexibilidade, entre outras. Contudo, aliando essa poderosa ferramenta de controle a um sistema de supervisão e monitoramento que proporcione a interação entre o usuário e processo em tempo real, o trabalho de operação e controle do sistema automatizado se torna muito mais fácil e eficiente (BARCELLOS,2005).

3.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Os sistemas supervisórios, também denominados SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*), permitem o monitoramento de um processo produtivo ou instalação física coletando dados e rastreando informações importantes, como a atualização das variáveis da planta e as ações tomadas pelo operador e pelo sistema de automação em tempo real. Além disso, estes sistemas permitem que seja feito o

controle do processo ligando ou desligando atuadores, alterando malhas de controle e o modo de operação dos equipamentos sem depender de um nível intermediário de controle, como controladores lógico-programáveis ou RTUs (*Remote Terminal Unit*) (SILVA e SALVADOR, 2004).

As RTUs são dispositivos semelhantes aos CLPs, porém possuem menos flexibilidade na linguagem de programação e no controle de entradas e saídas. Além disso, são instalados em locais mais distantes da central de processamento e possuem maior precisão e sequenciamento de eventos.

Os componentes físicos de um sistema de supervisão podem ser resumidos na Figura 5, sendo eles: sensores e atuadores; rede de comunicação, que pode ser implementada através de cabos Ethernet, modems, etc; estações remotas (CLPs ou RTUs), responsáveis pela aquisição de dados e controle do sistema; e estação de monitoração central, constituída por uma interface de fácil leitura em um monitor que contém todos os dados do processo convertidos em gráficos ou telas, a fim de facilitar a percepção e a atuação do operador sobre o sistema (LOPES, 2009).

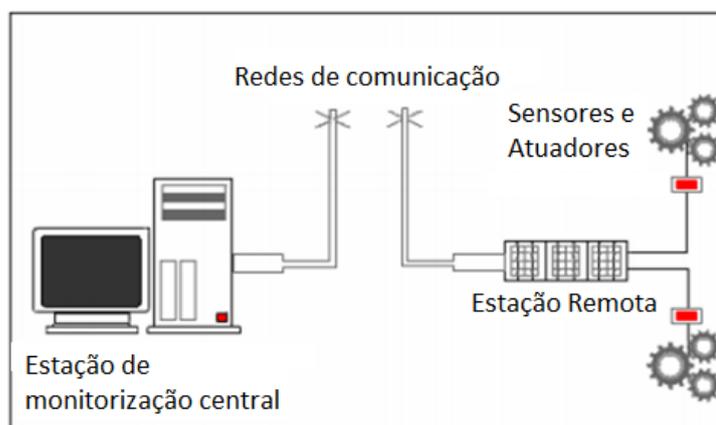


Figura 5 - Sistema de supervisão e controle
FONTE: (SILVA e SALVADOR, 2004)

O processo de supervisão é iniciado nas estações remotas, como CLPs e RTUs que coletam, analisam e manipulam informações provenientes dos sensores e as enviam à estação de monitoramento central através da rede de comunicação por meio de *tags* (mensagens digitais). A estação de monitoramento central recolhe a informação gerada pelas estações remotas, apresenta ao usuário e age em conformidade com os eventos detectados, enviando sinais de controle diretamente aos atuadores ou aos controladores (SILVA e SALVADOR, 2004).

O sistema supervisor também pode ser chamado de IHM (Interface Homem-Máquina), pois permite a interação do operador com a máquina ou processo através de uma interface que pode ser um monitor de computador. Antigos no mercado, já existem equipamentos, também denominados IHM, que desempenham especificamente essa função de interface. Esses equipamentos são amplamente utilizados na indústria e são constituídos normalmente por uma CPU, uma tela de cristal líquido e um tipo de teclado (comum ou *touch screen*) para navegação ou inserção de dados. Para programar a IHM é necessário um software próprio correspondente à marca do produto.

Neste trabalho, além do computador é utilizada a IHM Magelis S5T da Schneider Eletrics (Figura 6) para supervisionar e controlar a bancada, substituindo as botoeiras convencionais. Esse equipamento possui um sistema de instalação simplificado, software de programação livre de licença (Vijeo Designer), além de uma ótima capacidade de visualização. Além disso, possui comunicação de alto desempenho com conexão Ethernet incorporada, entre outras portas seriais multiprotocolo que facilitam a comunicação com diversos tipos de equipamentos.



Figura 6 – IHM S5T Magelis da Schneider Eletrics
<http://www.sagaautomacao.com.br/>

Assim, utilizando um sistema supervisor para monitorar a bancada didática e um controlador lógico programável atuando sobre o sistema através de sensores e atuadores, podemos dizer que esta bancada didática é um sistema automatizado completo em pequena escala. Isso porque é possível simular, em laboratório, um processo industrial real. Contudo, assim como em um processo industrial, a bancada didática deve controlar variáveis do sistema, como o nível e a temperatura da água.

Para tal, é necessário conhecer algumas técnicas de controle e escolher aquela que mais se adéqua a determinada aplicação.

3.4 SINTONIA DOS CONTROLADORES

Neste subcapítulo são apresentados os referenciais teóricos dos controladores PID, assim como os métodos e cálculos utilizados para ajustar os seus ganhos. Posteriormente serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação desses ganhos nos sistemas.

3.4.1 Sistemas de controle

Em sistemas de controle, a malha de controle pode ser do tipo aberta ou fechada. Os sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema, ou seja, são sistemas sem realimentação nos quais a variável controlada não é comparada com o sinal de entrada. (OGATA, 2003).

Os sistemas de controle de malha fechada são aqueles em que o sinal de saída é um parâmetro indispensável para a ação de controle, visto que o controlador o utiliza para comparar a um valor de referência preestabelecido, denominado *set point*. Após essa comparação o controlador verifica a diferença entre ambos (sinal de erro) e age de maneira a diminuir o sinal de erro controlando o sistema (BARCELLOS, 2005).

A malha fechada é mais utilizada no controle de processos, pois apresenta algumas vantagens em relação à malha aberta, principalmente no que tange à menor sensibilidade a interferências e ruídos. Além disso, o sistema fica mais independente dos parâmetros da planta, já que passa a atuar sobre o sinal de erro (SOUZA, 2004).

Considerando sistemas de malha fechada, existem várias ações de controle que podem ser utilizadas, cada qual com suas próprias características, limitações e área de aplicação específica. Entre elas podemos destacar a ação de controle proporcional, integral e derivativa, que com suas combinações podem formar os controladores proporcional, proporcional-integral, proporcional-derivativo e proporcional-integral-derivativo, com suas respectivas variações.

O Controle Proporcional (P) é essencialmente um amplificador com ganho ajustável, no qual a resposta do controle é proporcional ao sinal na sua entrada. A sintonia é obtida pelo ajuste de um único parâmetro K_p , que torna a saída K_p vezes maior que o sinal de entrada. Porém, o grande problema do controlador proporcional é que ele permite erros em regime permanente, visto que em sistemas realimentados a entrada do controlador é o sinal do erro, o que faz com que o erro sempre exista mesmo que seja pequeno. Esse tipo de controlador normalmente é aplicado em muitos processos contendo constantes de tempo simples respondendo rapidamente tanto aos distúrbios como às alterações do ponto de ajuste (SOUZA, 2004).

A ação de controle proporcional é definida pela equação

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

ou pela função de transferência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3.2)$$

O controle Proporcional-Integral (PI) é uma combinação da ação proporcional com uma ação de integração do sinal de erro e possui como principal característica a redução ou eliminação do erro em regime permanente. O controlador PI é o ideal para a maioria das dinâmicas dos processos. O termo derivativo (PID) só é indicado para processos onde existe uma segunda dinâmica dominante, sendo que é selecionado para cancelar esta segunda constante de tempo destes processos. Obviamente estes modelos dinâmicos mais complexos não podem ser obtidos visualmente a partir da resposta a um degrau e devem ser obtidos através de um algoritmo matemático de identificação (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010, pg. 72).

A ação de controle proporcional-integral é definida por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3.3)$$

ou sua função de transferência

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.4)$$

Nas Equações 3.3 e 3.4 os parâmetros K_p , que representam o ganho proporcional, e T_i , chamado de tempo integral, são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_p afeta tanto a parte proporcional quanto a parte integral da ação de controle.

O controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é a combinação da ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa. Essa ação combinada possui a vantagem de cada uma das três ações de controle individuais, como as características de estabilidade do controle proporcional-derivativo, e as características de eliminação do erro do controle proporcional-integral (SOUZA, 2004).

A ação de controle de um controlador proporcional-integral-derivativo pode ser definida por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

ou pela função de transferência

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.6)$$

Nas Equações 3.5 e 3.6 o parâmetros K_p representa o ganho proporcional; T_d representa o tempo derivativo e T_i representa o tempo integral.

O tempo derivativo T_d pode ser entendido como um fator antecipatório, isto é, pode antecipar a orientação do erro e utilizá-lo para melhor controlar o processo (GOLNARAGHI e KUO, 2012, pg. 445). Entretanto, na prática, a utilização do parâmetro derivativo apresenta restrições, pois ele amplifica ruídos de alta-frequência presentes em qualquer processo (FRANKLIN; POWELL e NAEINI, 2009, pg. 348).

3.4.2 Modelagem e identificação de sistemas

A modelagem e a identificação consistem na determinação do modelo matemático de um sistema através de alguns procedimentos de análise que podem ser classificados como físico-matemáticos ou experimentais. Estes procedimentos propiciam a obtenção de modelos que representam a dinâmica do sistema (processo ou planta) e são utilizados para responder a questões relacionadas a ele sem a realização de experimentações, a fim de demonstrar como este se comporta sob determinadas condições operacionais (COELHO, 2004).

Com o modelo matemático do processo a ser controlado é possível aplicar várias técnicas para determinar parâmetros do controlador que atendam às especificações desejadas de regimes transitório e estacionário do sistema em malha fechada. No entanto, em alguns casos a complexidade do sistema não permite que o modelo matemático seja obtido facilmente, tornando a abordagem físico-matemática para se projetar um controlador inviável. Nestes casos deve-se fazer uso das técnicas experimentais de sintonia dos controladores (OGATA, 2003).

A sintonia do controlador é o procedimento de seleção dos parâmetros do controlador de modo a serem atendidas as especificações de desempenho desejadas. Como os processos desenvolvidos na bancada didática deste trabalho possuem atraso de transporte desprezível, o método de sintonia escolhido foi o proposto por Skogestad que, ao invés da metodologia clássica de Ziegler-Nichols, oferece parâmetros para o controlador quando a planta não tem atraso de transporte. (SKOGESTAD, 2001).

Para obter a sintonia do controlador PID, Skogestad propôs regras para ajustar os valores de K_p , T_i e T_d baseadas na técnica de modelar o sistema com o um processo de primeira ordem com atraso de transporte. Isto pode ser realizado através da aplicação de um degrau na entrada da planta ($u(t)$) e medir o valor final da saída em regime permanente (Y_{max}) como mostra a Figura 7. Para casos de processos de 1ª ordem, medindo o tempo que a saída toma para atingir 63,2% do valor máximo, é possível determinar a constante de tempo do sistema (OGATA, 2003).

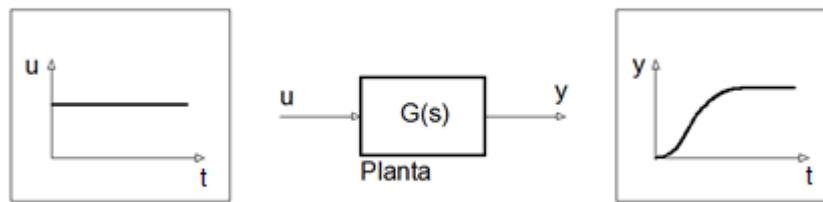


Figura 7 - Identificação da planta
Fonte: Autoria Própria

A Figura 8 mostra a resposta ao degrau unitário para um sistema de primeira ordem, indicando a constante de tempo T .

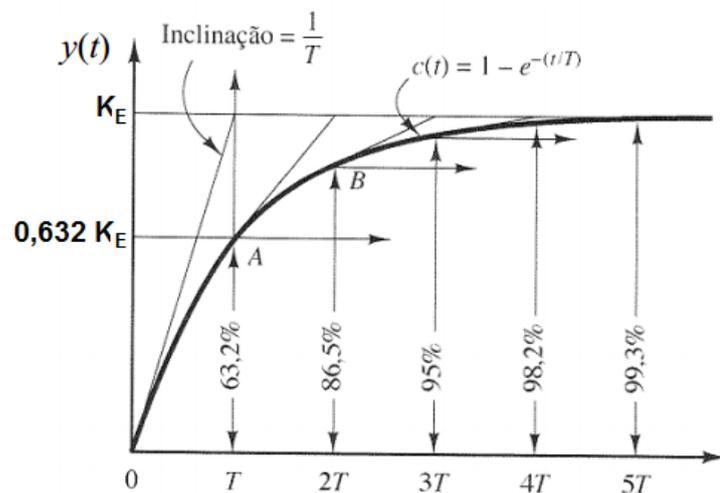


Figura 8 - Resposta do sistema ao degrau na entrada
Fonte: (OGATA, 2003)

A função de transferência para este tipo de resposta é

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_E}{sT + 1} e^{-\theta s} \quad (3.7)$$

onde T é a constante de tempo da planta, K_E é o ganho estático e θ é o tempo de atraso de transporte que, neste caso, é nulo.

O ganho estático é calculado como sendo $K_E = Y_{max}/u(t)$, considerando que tanto $y(t)$ quanto $u(t)$ tem valores iniciais $y(0) = u(0) = 0$.

Com os valores da constante de tempo, do ganho estático e do valor de θ é possível ajustar os parâmetros do controlador, utilizando as equações definidas por Skogestad mostradas no Quadro 1.

| $G_p(s)$ | K_p | T_i | T_d |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------|--------|
| K_E/s | $1/K_E T_c$ | $K_1 T_c$ | 0 |
| $\frac{K_E}{Ts + 1}$ | $\frac{T}{K_E T_c}$ | $\min[T, K_1 T_c]$ | 0 |
| $\frac{K_E}{(Ts + 1)s}$ | $\frac{1}{K_E T_c}$ | $K_1 T_c$ | T |
| $\frac{K_E}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$ | $\frac{T_1}{K_E T_c}$ | $\min[T_1, K_1 T_c]$ | T_2 |
| $\frac{K_E}{s^2}$ | $\frac{1}{4K_E (T_c)^2}$ | $4T_c$ | $4T_c$ |

Quadro 1 - Equações para sintonia PID propostas por Skogestad para processos sem atraso de transporte

Fonte: Autoria própria

Segundo o autor, T_c é a constante de tempo desejada para o sistema em malha fechada e pode ser considerada um parâmetro de ajuste do controlador. Resultados práticos mostram que $T_c = \theta$ apresentam um bom desempenho. Entretanto, para processos sem atraso de transporte sugere-se que o projetista escolha um valor para T_c desde que seja maior que zero. Inicialmente, sugere-se que o valor de K_1 seja 4, porém valores menores resultam em uma compensação mais rápida para perturbações. Os outros valores a serem utilizados no Quadro 1 são: T = constante de tempo da planta, K_E = ganho estático da planta. (SKOGESTAD, 2001)

4 MONTAGEM E IMPLEMENTAÇÃO

Tendo definido os materiais que farão parte da bancada e escolhida a estratégia de controle a ser utilizada, uma análise do comportamento dos sensores e atuadores faz-se necessária para a integração de todos os componentes do processo. A seguir, apresentam-se as características de funcionamento dos elementos constituintes da bancada didática, assim como os circuitos de condicionamento dos sinais envolvidos.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Bancada didática desenvolvida neste trabalho, mostrada na Figura 9, é constituída por dois reservatórios de água, um superior e outro inferior. O reservatório superior tem capacidade para 24 litros, é alto e estreito para que a variação de nível seja mais perceptível, enquanto o reservatório inferior tem aproximadamente o dobro da capacidade do tanque superior, para evitar que falte água no momento em que se está realizando o controle de nível.

Os reservatórios são interligados através de duas tubulações. Uma das tubulações deriva do fundo do reservatório superior terminando na parte superior do outro reservatório e contém uma válvula de esfera manual seguida do sensor de fluxo, com o intuito de regular e monitorar a vazão entre os reservatórios. A outra tubulação deriva da bomba centrífuga instalada no fundo do reservatório inferior e termina com uma válvula de retenção na parte superior do outro reservatório, com a função de conduzir a água do tanque inferior para o superior. Além disso, há uma tubulação e uma válvula de esfera de reserva no fundo do reservatório superior com o propósito de ser utilizada em trabalhos futuros, para que sejam acoplados outros equipamentos como, por exemplo, uma válvula solenoide proporcional.

O reservatório superior possui um sensor de pressão que monitora o seu nível, enquanto que o reservatório inferior possui dois sensores de nível com flutuador magnético, um para nível máximo e outro para nível mínimo. No reservatório inferior encontram-se a bomba centrífuga, um ebulidor elétrico e um sensor de temperatura, além de uma bomba submersa funcionando como misturador, para homogeneizar a temperatura da água no interior do reservatório.

Todos os sensores e atuadores inseridos nos reservatórios são interligados ao CLP e um esquema representativo destas conexões é encontrado no apêndice A. O controlador programável é fixado em um painel de madeira que também serve de suporte para a fonte DC de 24 V, o relé de estado sólido que controla o acionamento do ebulidor, um botão de emergência, um disjuntor bifásico, um roteador ethernet e uma placa de interface, que contém todos os circuitos necessários para o condicionamento dos sinais, tanto dos sensores quanto dos atuadores. Além disso, o painel possui espaço reserva para a posterior instalação de equipamentos que porventura sejam necessários em trabalhos futuros.



Figura 9 - Bancada didática para controle de nível e temperatura
Fonte: Autoria própria

4.2 ACIONAMENTO DA BOMBA CENTRÍFUGA

Inicialmente, pensou-se em utilizar a técnica de variação de largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) para controlar a bomba. Porém, a variação da vazão pela variação do sinal PWM apresentou comportamento descontínuo, pois com 47% do PWM a bomba não movimentava água e com 48% de PWM passava a movimentar uma grande quantidade de água. Esse salto na vazão tornaria difícil o controle e, por este motivo, decidiu-se realizar o controle de vazão por variação de tensão na entrada da bomba.

Portanto, a bomba centrífuga utilizada mostrada na Figura 10, responsável pela transferência de água do reservatório inferior para o reservatório superior, é acionada por um driver de potência que recebe um sinal de tensão de 0 a 10 V fornecido pela saída analógica V0 do módulo de expansão analógico do CLP. O driver de potência tem por objetivo amplificar a corrente fornecida para a bomba. O circuito do driver é mostrado na Figura 11.



Figura 10 - Bomba de porão centrífuga
Fonte: <http://www.martinellishop.com.br>

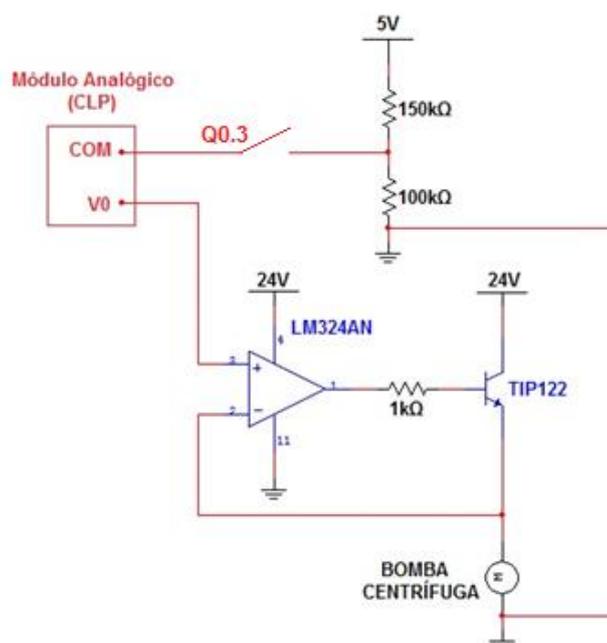


Figura 11 - Circuito do driver de acionamento da bomba centrífuga
Fonte: Autoria própria

Observando o circuito do driver podemos notar que o terminal comum do módulo analógico de saída foi alimentado com 2 V para que a saída do CLP, que vai de 0 a 10 V, consiga chegar a 12 V, tensão necessária para que a bomba trabalhe na vazão máxima. Para evitar que sejam mantidos os 2 V remanescentes mesmo quando deseje-se manter a bomba desligada, um contato do CLP fará a interrupção do sinal de 2 V quando a referência de nível for zero.

Esta bomba de porão apresenta comportamento aproximadamente linear da vazão pela tensão aplicada, como mostra o gráfico da Figura 12. Podemos observar que a bomba fornece, no máximo, 0,2 l/s aplicando tensão de 12 V.

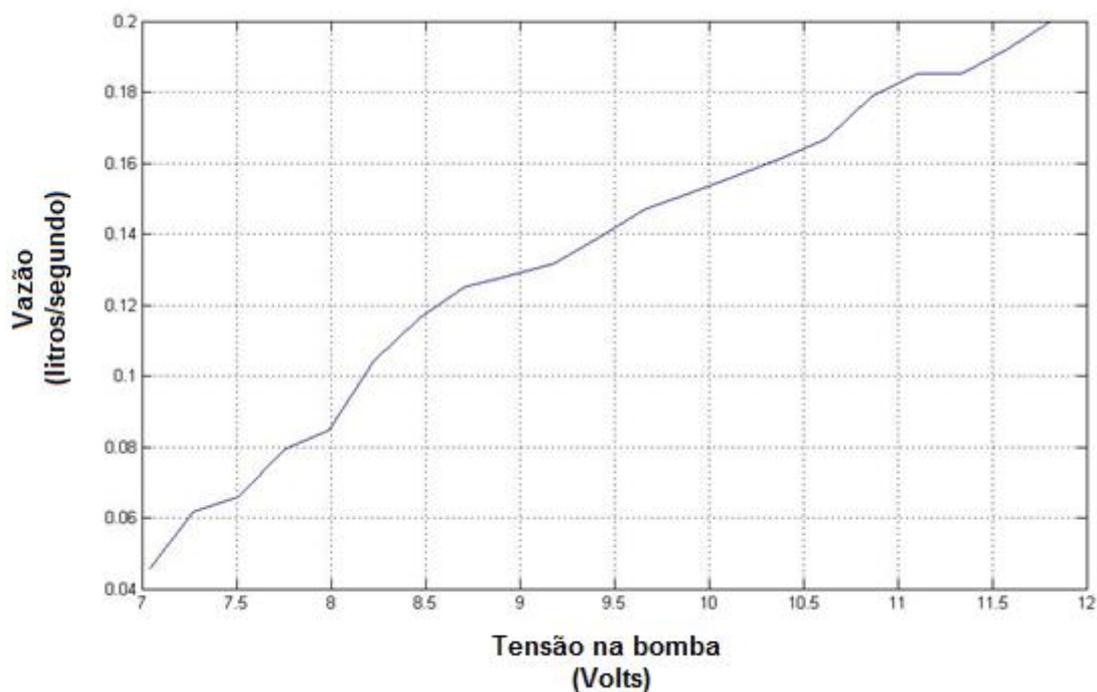


Figura 12 - Vazão versus tensão
Fonte: Autoria própria

4.3 ACIONAMENTO DO EBULIDOR ELÉTRICO

O ebulidor elétrico utilizado, similar ao da Figura 13, tem a função de aquecer a água do reservatório inferior, cuja potência é de 1000 W com tensão de alimentação de 127 V. Seu acionamento ocorre através de um rele de estado sólido chaveado por um sinal de controle PWM enviado pelo CLP, possibilitando controlar a potência dissipada pelo ebulidor. Para o seu acionamento, utiliza-se a saída digital Q0.1 (PWM1) do CLP. É importante destacar que para utilizar saídas digitais como geradoras de pulsos PWM estas devem ser do PWM chaveadas a transistor e não a rele, devido à alta frequência de chaveamento que reles mecânicos não suportam.



Figura 13 - Ebulidor elétrico.
FONTE: <http://www.nedo.com.br>

O rele utilizado para acionar o ebulidor recebe o sinal de comando em seus terminais de entrada (*INPUT*), fechando o contato de potência que alimenta a carga. A condução acontece efetivamente na próxima passagem por zero da tensão de rede. O mesmo acontece no desligamento. O sinal de comando é retirado, porém o rele somente desliga na próxima passagem por zero (NOVUS, 2014).

As conexões elétricas necessárias ao rele são duas, sinal de comando e ligação com a carga e podem ser visualizadas na Figura 14.

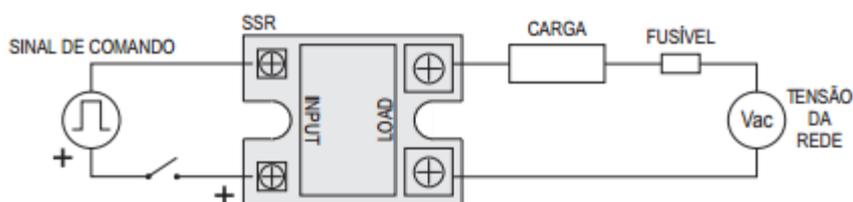


Figura 14 - Ligações elétricas do rele de estado sólido
Fonte: (NOVUS, 2014)

4.4 SENSOR DE FLUXO

O sensor de fluxo, mostrado na Figura 15, monitora a vazão de água que flui através da tubulação que deriva do tanque superior. É constituído por um corpo plástico, um rotor, e um sensor de efeito Hall. Quando a água flui através do rotor, ele gira fornecendo, a cada giro, um pulso com pico de sinal de 5 V. Através desses pulsos gerados, entregues pelo sensor de efeito hall, é possível determinar a vazão de água que passa pelo sensor, sendo esse capaz de medir uma vazão de 1 a 30 litros por minuto.



Figura 15 - Sensor de fluxo de 20 mm
FONTE: <http://www.mercadolivre.com.br>

Para coletar os pulsos emitidos pelo sensor de fluxo é necessária a utilização de uma entrada digital rápida do CLP, no caso utilizamos a %I0.2. Como as entradas do CLP devem receber tensão de 24 V e o sensor emite pulsos de 5 V é necessário utilizar um circuito de interface para converter o nível de tensão desse sinal de saída, a fim de que seja percebido pela entrada digital. O circuito pode ser visto na Figura 16.

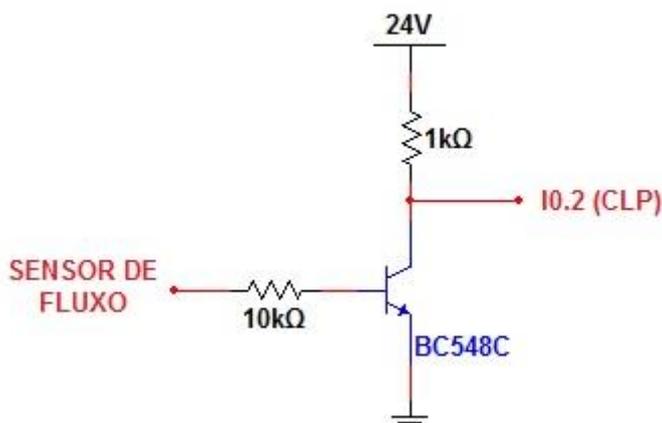


Figura 16 - Circuito amplificador de sinal do sensor de fluxo
Fonte: Autoria própria

4.5 SENSOR DE PRESSÃO

O sensor de pressão MPX5010DP da Freescale mostrado na Figura 17 é utilizado para medir o nível do reservatório superior, possui uma tensão de alimentação de 5 V e emite um sinal de saída variável de 0 a 5 V, proporcional à pressão exercida pela coluna de água incidente sobre ele. Esse sensor apresenta um comportamento linear, como mostra o gráfico da Figura 18 no qual podemos observar

que a máxima pressão mensurável é de 10 kPa, correspondendo à máxima tensão de saída de 5 V (FREESCALE, 2012). Neste gráfico é possível observar o comportamento típico do sensor onde a tensão de saída varia entre 0,2 e 4,8 V, aproximadamente.



Figura 17 - Sensor de pressão MPX5010DP
FONTE: <http://produto.mercadolivre.com.br>

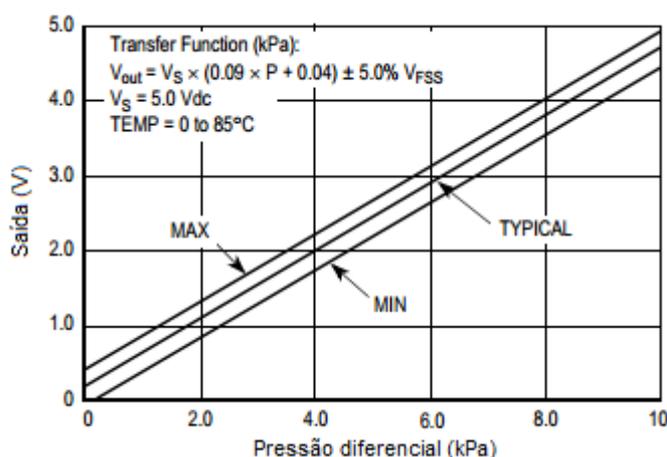


Figura 18 - Saída versus pressão diferencial
Fonte: (FREESCALE, 2012)

A pressão exercida pela coluna de água sobre o sensor é denominada pressão hidrostática ou pressão efetiva e pode ser obtida através de cálculo considerando a massa específica da água, a força da gravidade, e a altura da coluna de água (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009, pg. 61) e é descrita por

$$P_H = \mu gh \quad (4.1)$$

tendo como constantes a massa específica da água μ , igual a 10^3 Kg/m^3 e a força da gravidade g , de aproximadamente, $9,81 \text{ m/s}^2$. Obtendo a pressão hidrostática através do sensor é possível determinar a altura h , em que se encontra a coluna de água do reservatório, ou seja, o nível da água.

A saída do sensor de pressão é conectada à entrada analógica V0 do módulo de expansão analógico utilizado na bancada. O conversor A/D (analógico/digital), interno ao CLP, converte essa entrada analógica num código digital de 12 bits, ou seja, se a entrada analógica está configurada para receber tensões de 0 a 10 V, a tensão máxima de 10 V será representada pelo valor 4096 que é o valor máximo que pode ser formado por 12 bits. Contudo, se for medida uma pressão de 10 kPa, correspondente a 5 V (valores máximos do sensor), o CLP fornece o valor 2048 ao usuário. Reunindo essas informações, com o modo de operação do sensor e o cálculo de pressão hidrostática determina-se o nível do reservatório superior.

4.6 SENSORES DE NÍVEL

Os sensores de nível flutuador magnético e contato do tipo *Reed Switch* são utilizados para indicar o nível máximo e mínimo do reservatório inferior. Estes apresentam um comportamento de comutação, fechando e abrindo o contato quando o nível de líquido correspondente é alcançado. São alimentados com tensão de 24 V em um dos fios condutores, enquanto o outro é ligado diretamente às entradas digitais %I0.0 e %I0.1 do CLP. O sensor de nível é mostrado na Figura 19.



Figura 19 - Sensor chave de nível
FONTE: <http://www.webtronico.com>

4.7 SENSOR DE TEMPERATURA

O sensor de temperatura LM35DZ, responsável por medir a temperatura da água do reservatório inferior, foi adaptado para ser submerso em água, como mostra a Figura 20. Esse sensor pode ser alimentado com tensão de 4 a 20 V, e está sendo alimentado com 5 V, como todos os outros sensores. Sua faixa de medição é de -55 °C a +150 °C, com uma precisão de $\pm 0,5$ °C.



Figura 20 - Sensor de temperatura LM35DZ
FONTE: Aatoria própria

O comportamento do LM35DZ é linear, pois a tensão de saída é proporcional à temperatura medida em graus Celsius. Este sensor fornece 10 mV a cada um grau Celsius de temperatura (TEXAS INSTRUMENTS, 2013) este comportamento é esquematizado na Figura 21. Portanto, uma tensão de saída 222 mV equivale à temperatura de 22,2 °C.

Entretanto, como a entrada analógica do CLP é de 0 a 10 V, o sinal do sensor de temperatura, que é da ordem de centos de milivolts, torna-se muito pequeno, perdendo assim resolução. Portanto, a saída do sensor de temperatura é amplificada em 10 vezes através de um amplificador operacional OP07 e conectada à entrada analógica V1 do modulo de expansão analógico. A leitura dos dados é realizada da mesma forma que o sensor de pressão, descrito no item 4.5, onde a tensão de saída do sensor corresponde a um valor dentro do range de 0 a 4096.

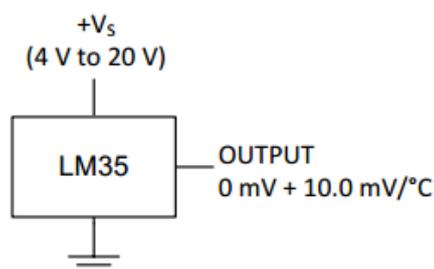


Figura 21 – Modo de operação do sensor LM35DZ
Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2013)

4.8 MISTURADOR

A bomba submersível mostrada na Figura 22 é utilizada como misturador, possui uma tensão de alimentação de 127 V e uma vazão de 800 L/h. Sua função é homogeneizar a temperatura da água no reservatório inferior para que a medição da temperatura seja confiável, obtendo a mesma temperatura da água em todos os pontos no interior deste reservatório. A bomba é ligada à saída digital Q0.6 do CLP.



Figura 22 - Bomba submersível
Fonte: <http://www.aquariumgroup.com.br/>

4.9 PROGRAMAÇÃO DO CLP

Como visto na seção 3.2, os CLPs fazem a leitura das entradas, processam as informações e atualizam as saídas. Desta forma, quando se trata da utilização de CLPs para controle de sistemas temos que levar em consideração que o controle não é processado em tempo contínuo, mas por amostragem, configurando o chamado controle digital. No caso da utilização de rotinas PID no CLP não é diferente, de forma

que o CLP faz a leitura atual da saída do sistema para calcular, através do seu algoritmo PID, a ação de controle necessária no instante seguinte. Esse tipo de controle é chamado de controle amostrado e requer o ajuste correto do tempo de amostragem T_a . O manual do CLP recomenda que o tempo de amostragem seja de $T/125 < T_a < T/75$, sendo T a constante de tempo do sistema.

Para a implementação do controlador PI de nível utilizamos a rotina "PID" que o CLP oferece. Essa função é caracterizada por um bloco no qual é possível configurar todos os parâmetros do controlador PID. Para chamar a rotina basta apenas endereçá-la no bloco de operações, como mostra a Figura 23.



Figura 23 - Endereçamento da função PID no bloco de operações
Fonte: Software TwidoSuite

Para obter o controlador PI determinamos no bloco PID que o tempo derivativo (T_d) é nulo. Além disso, o bloco também permite configurar qual a variável a ser controlada, o *set point* (referência a ser seguida pelo controlador), o tempo de amostragem e qual será a saída analógica utilizada para este controle. A interface do bloco PID no TwidoSuite pode ser visualizada nas Figuras 24, 26 e 28.

A Figura 24 mostra a aba de entrada, onde é definida qual variável será controlada. No caso, a memória %MW1 é utilizada, pois é ela quem armazena os valores de nível obtidos da entrada analógica %IW1.0, o que pode ser visto na Figura 25.

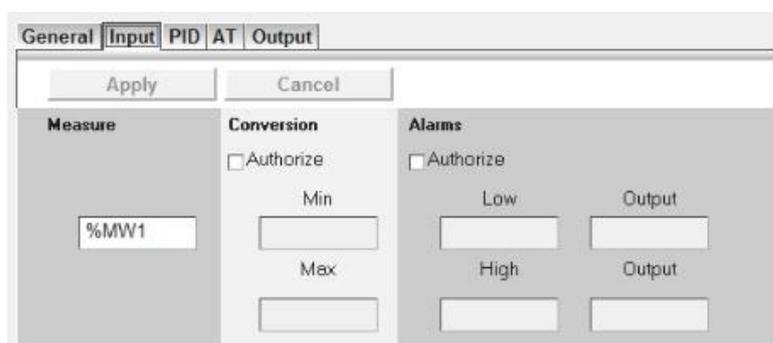


Figura 24 - Bloco PID entrada
Fonte: Software TwidoSuite

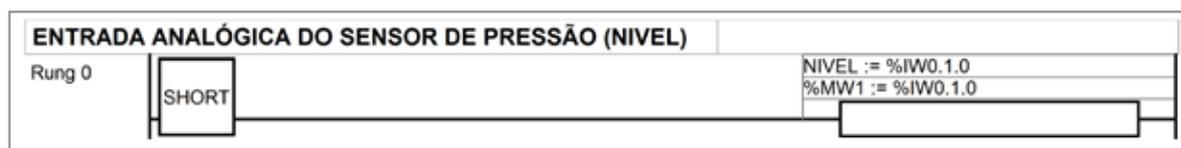


Figura 25 - Rung de atribuição da entrada analógica à memória
 Fonte: Software TwidoSuite

A Figura 26 mostra a aba de ajuste dos parâmetros do controlador, na qual é possível modificar os valores de K_p , T_i e T_d , a configuração do *set point* e do tempo de amostragem. É possível observar que estão sendo utilizadas memórias ao invés de valores, isso foi feito para possibilitar a configuração do PID sem a necessidade de interromper a execução do programa. Além disso, essas memórias são utilizadas para fazer a comunicação entre o controlador e o sistema de supervisão, sendo que este último pode alterar estes parâmetros através de sua interface.

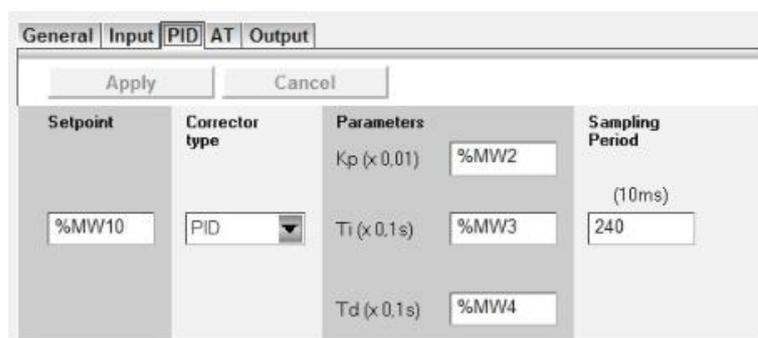


Figura 26 - Ajustes dos parâmetros do controlador
 Fonte: Software TwidoSuite

A Figura 27 mostra o diagrama *Ladder*, onde é possível visualizar qual parâmetro corresponde a qual memória.

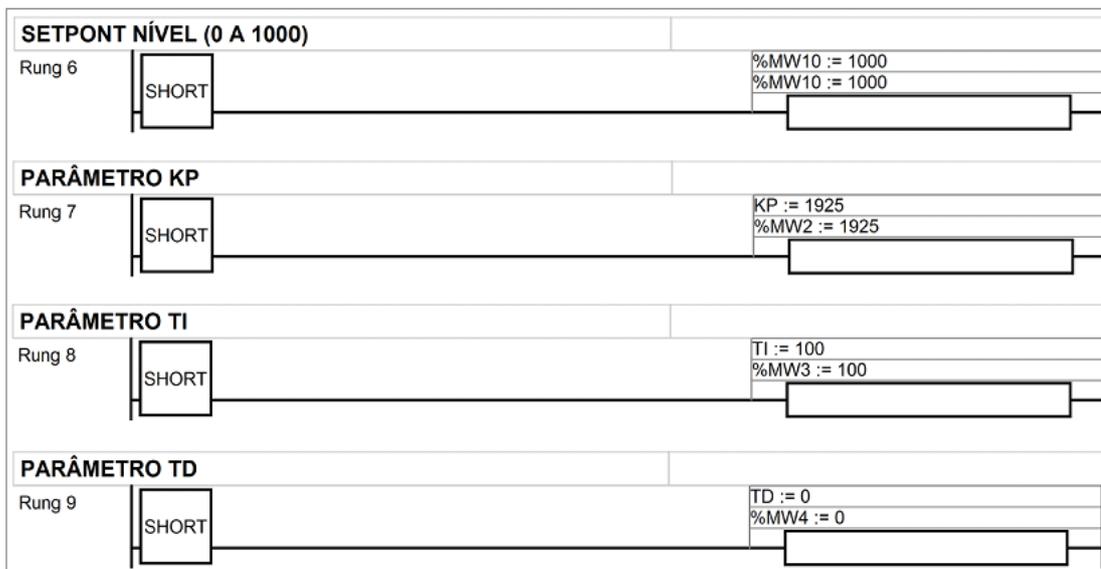


Figura 27 - Rungs de atribuição das variáveis às memórias
Fonte: Software TwidoSuite

Por fim, resta a configuração de qual saída será utilizada para realizar o controle da variável de entrada. Esta configuração é feita na aba de saída do bloco PID mostrada na Figura 28. Nesta aba é configurada a memória %MW24 como saída analógica do PID, que habilita a saída %QW1.0 do módulo de expansão analógico, utilizada para acionar a bomba de porão como explicado no item 4.2.

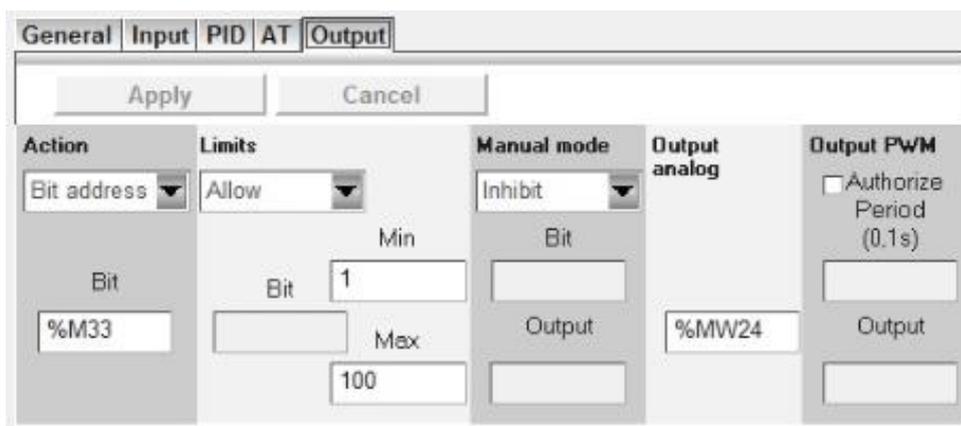


Figura 28 - Bloco PID saída
Fonte: Software TwidoSuite

A Figura 29 mostra a linha do programa (*rung*) onde a saída analógica recebe o valor da memória que o bloco PID fornece. O conteúdo da memória está sendo multiplicado por 40, pois a saída do CLP é limitada de 1 a 100, o que pode ser visto

na Figura 289, Figura 29 e desejamos que ela forneça valores de 1 a 4000, que é o valor mais próximo de 4096 (limite máximo para a saída).



Figura 29 - Atribuição da memória à variável de saída
Fonte: Software TwidoSuite

A rotina PID é muito útil, pois além de possibilitar o controle do sistema de maneira facilitada, permite o monitoramento das variáveis e do comportamento do próprio PID através de uma animação, como mostrado na Figura 30.

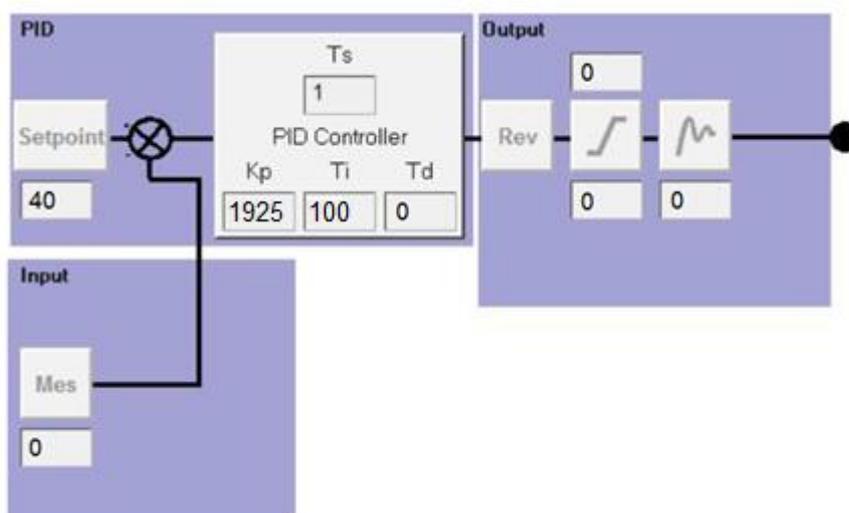


Figura 30 - Monitoramento do PID
Fonte: Software TwidoSuite

Para o acionamento do ebulidor elétrico utilizamos a rotina "PWM". Essa rotina gera um pulso na saída Q0.1 de acordo com a parametrização realizada. A Figura 31 mostra a aba de parametrização do PWM, na qual é possível configurar a base de tempo TB (*time base*), o multiplicador da base de tempo P (*preset*) e a saída em que serão gerados os pulsos (*dedicated output*). O tempo de um ciclo de PWM será dado por PT_B . O tempo do ciclo que a saída ficará em nível alto é chamada de

Duty Cycle (razão cíclica) e é calculada por $PT_B \frac{R}{100}$, onde R representa a porcentagem de tempo em que se deseja manter a saída em nível alto.

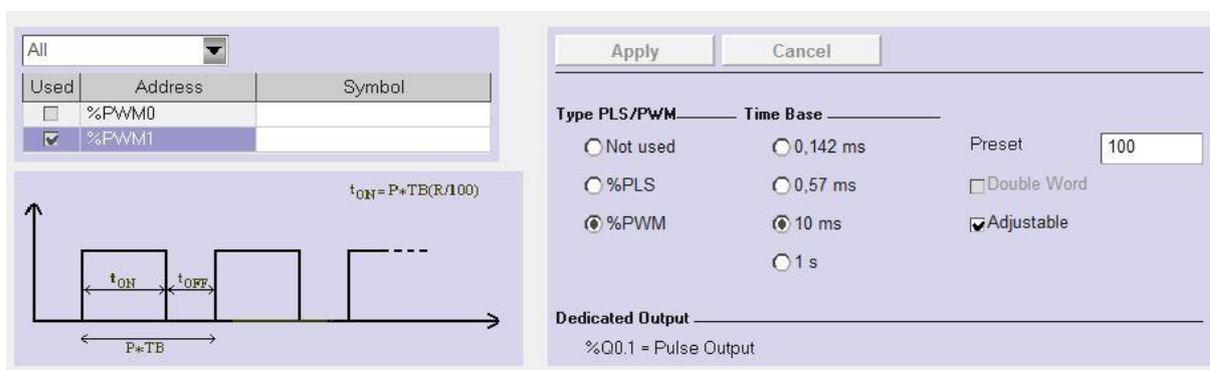


Figura 31 - Aba de parametrização do PWM
Fonte: Software TwidoSuite

O PWM1 é habilitado através da memória %M50 como mostra a Figura 33, e sua saída é acionada durante um tempo proporcional ao valor armazenado na variável %PWM1.R como mostra a Figura 32.

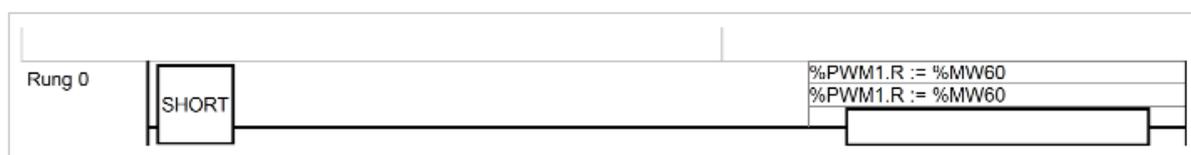


Figura 32 - Variável do preset recebendo o valor da memória
Fonte: Software TwidoSuite

A memória %MW60 armazena o valor de *duty cycle* para o acionamento do ebulidor, sendo determinado ou pela rotina PID de temperatura ou manualmente, através das interfaces de supervisão, sendo que este valor transmitido pode variar de 0 a 100.



Figura 33 - Linha de comando do acionamento do PWM
Fonte: Software TwidoSuite

4.10 INTERFACE DE SUPERVISÃO

Para o sistema supervisório foram desenvolvidas duas interfaces de supervisão. Uma das interfaces é a IHM da Schneider Electric HMI S5T e a outra no computador, utilizando o software supervisório E3 da Elipse. A interface da IHM é mais simples, sendo constituída apenas por botões de acionamento, gráficos de medição e campos para entrada de dados. A função desta é substituir os botões convencionais de acionamento manual (botoeiras). Já a interface do computador é mais completa, pois contém, além dos recursos disponíveis na interface da IHM, uma representação da bancada que permite a visualização das variáveis e dos equipamentos em tempo real, através de animações compatíveis com a realidade. As Figuras 34 e 35 mostram as telas do supervisório desenvolvido para a IHM, enquanto a Figura 36 mostra a tela do supervisório desenvolvido no software E3.

No sistema supervisório da IHM, a tela de temperatura mostrada na Figura 34 contém o botão “Ligar”, que aciona toda a bancada e o botão “Auto On”, que habilita o modo automático de acionamento do ebulidor elétrico pela ação do controlador. Possui o campo de entrada “Temp Manual” que permite ao operador escolher a potência desejada do ebulidor através da porcentagem do PWM (0 a 100%). Além disso, possui um gráfico que indica a temperatura sendo medida e outro que indica em qual potência o ebulidor se encontra quando ligado.

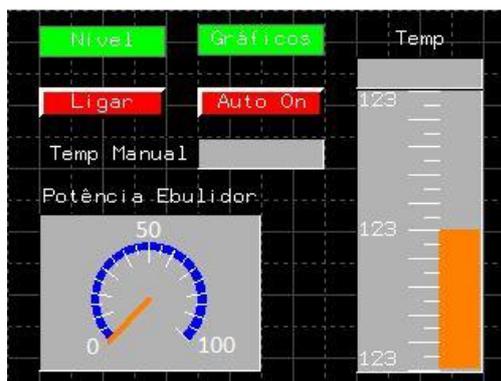


Figura 34 - Tela de temperatura do supervisório da IHM
Fonte: Autoria própria

A tela de nível mostrada na Figura 35 também contém o botão “Ligar” que aciona toda a bancada e o botão “Auto On” que, neste caso, habilita o modo automático do acionamento da bomba centrífuga pelo controlador PI. Nesta tela, o campo de entrada “Bomba Manual” possibilita que o operador acione a bomba centrífuga conforme desejado, inserindo valores de 0 a 100%.

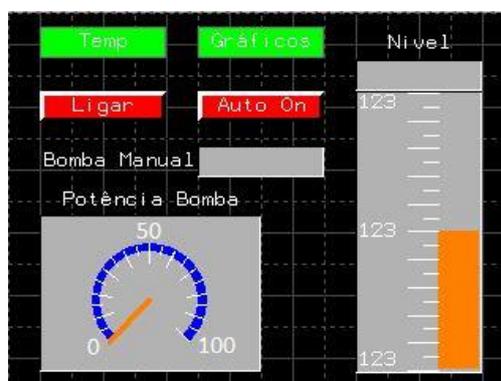


Figura 35 - Tela de nível do supervisório da IHM
Fonte: Autoria própria

Por fim, o sistema supervisório do computador mostrado na Figura 36 é constituído por uma imagem representativa da bancada inteira, que mostra: o nível de água descendo e subindo dentro dos reservatórios; a bomba, o ebulidor e a válvula sendo acionados (as imagens alternam entre a cor verde e vermelha para ligado e desligado, respectivamente.); as pás do misturador movimentando-se, indicando seu funcionamento; e os valores medidos de temperatura, fluxo (quando a válvula é aberta) e nível.

Nessa interface existem botões para ligar o controle automático de nível e de temperatura, do mesmo modo que a interface da IHM, um botão para ligar toda a bancada e ainda um botão de configuração de parâmetros que abre outra tela da interface, a qual contém campos de entrada para a inserção das variáveis dos sistemas de controle e pode ser vista na Figura 37. Além disso, é constituída por gráficos que mostram em tempo real, os valores do nível, da temperatura e a saída de controle além dos campos de entrada para o acionamento manual da bomba centrífuga e do ebulidor, sendo eles “comando da bomba” e “comando do ebulidor”, respectivamente.

Outro fator importante presente neste sistema supervisório é a tela de alarmes que possibilita o monitoramento das variáveis do processo quando essas ultrapassam os limites pré-determinados, gerando avisos e registrando o histórico.

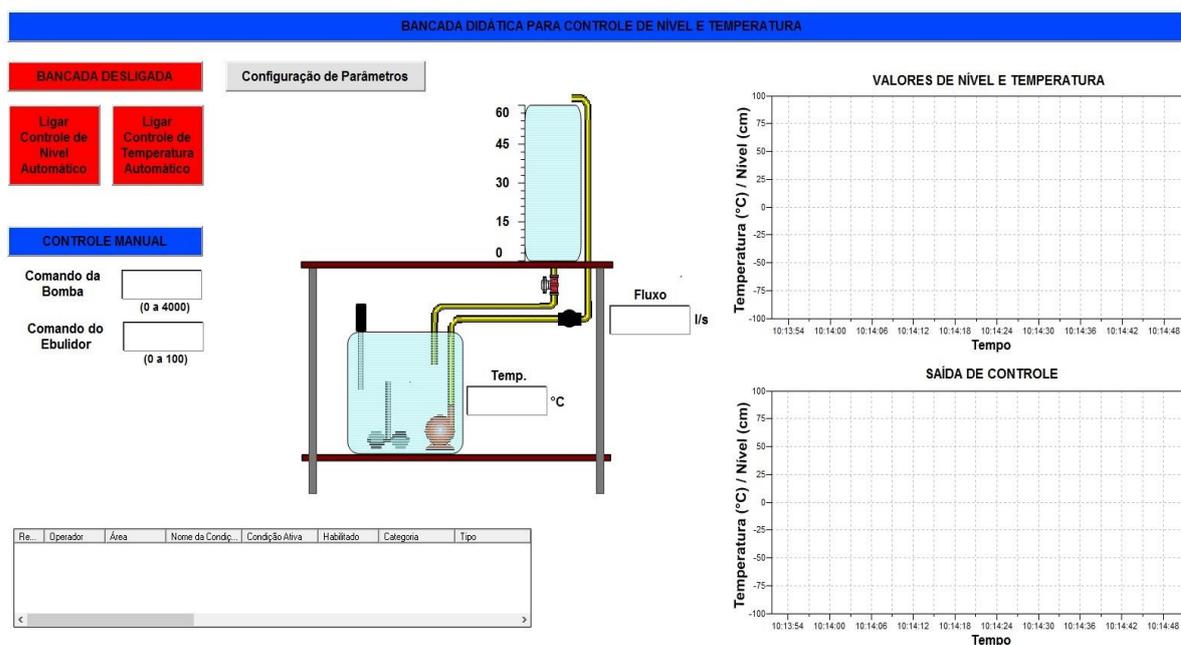


Figura 36 - Sistema de supervisão
Fonte: Autoria própria

| CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| NÍVEL | TEMPERATURA |
| <input type="text"/> SetPoint | <input type="text"/> SetPoint |
| <input type="text"/> Kp | <input type="text"/> Limite Máx |
| <input type="text"/> Ti | <input type="text"/> Limite Min |
| <input type="text"/> Td | |
| ALARMES | ALARMES |
| <input type="text"/> Nivel Máx | <input type="text"/> Temp Máx |
| <input type="text"/> Nivel Min | <input type="text"/> Temp Min |

Figura 37 - Tela de configuração dos parâmetros do CLP
Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS

5.1 SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL

Para o sistema de controle de nível foram obtidas duas funções de transferência através da técnica de identificação da planta demonstrada no item 3.4.2. Por meio destas funções de transferência, utilizando as regras de Skogestad, foi possível ajustar os parâmetros do controlador PI e controlar o nível do sistema de maneira eficiente.

5.1.1 Resultados experimentais (nível)

Primeiramente, foi aplicado um degrau de tensão de 8,9 V na bomba que resultou na estabilização do nível do tanque superior em 27,4 cm e, com esse nível, determinamos o ganho estático do sistema

$$K_E = \frac{27,4}{8,9} = 3,07 \frac{cm}{V}. \quad (5.1)$$

Analisando a curva experimental obtida com a técnica de identificação da planta, ao medirmos o tempo que a saída demora para atingir 63% do nível máximo encontramos a constante de tempo do sistema, que é de aproximadamente 200 segundos. Considerando essas informações, a função e transferência obtida é

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{3,07}{200s + 1} \quad (5.2)$$

A Figura 38 apresenta a resposta ao degrau com a curva experimental obtida na aquisição de dados representada em azul, e a simulação da função da transferência utilizada para o cálculo do controlador PI, representada em vermelho.

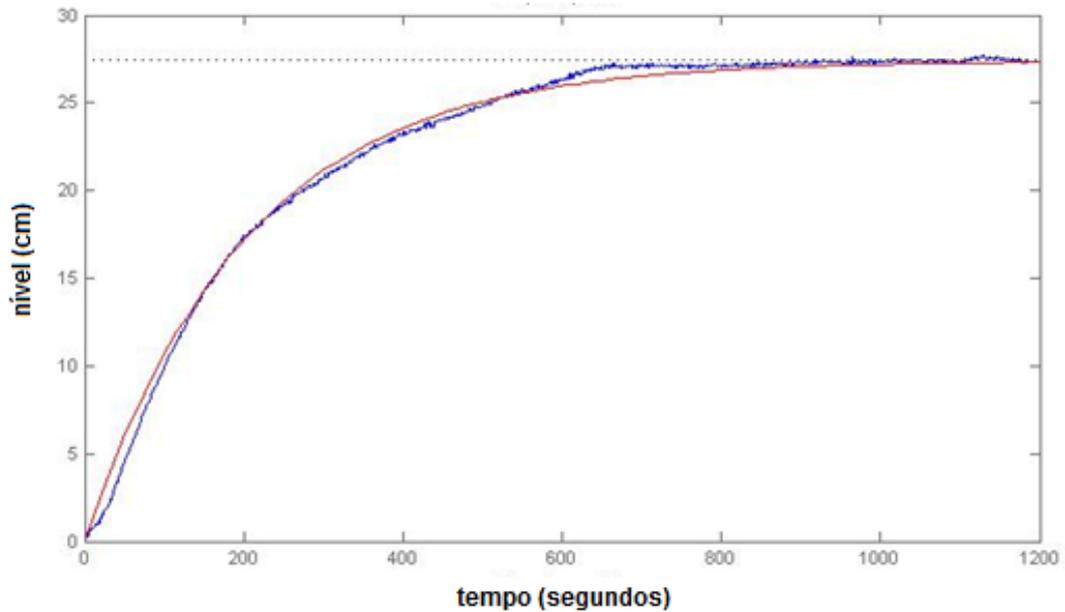


Figura 38 - Resposta ao degrau com aplicação de 8,9 V

Para testar o sistema em um outro ponto de operação, aplicamos uma tensão de 10,41 V na bomba e obtivemos um nível máximo de 40,5 cm e conseqüentemente um ganho estático de 3,89 cm/V.

$$K_E = \frac{40,5}{10,41} = 3,89 \text{ cm/V} \quad (5.3)$$

Analisando a curva experimental, também foi encontrada uma constante de tempo de aproximadamente 200 segundos, tornando esta função de transferência semelhante a anterior, exceto pelo ganho estático. A função de transferência obtida é

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{3,89}{200s + 1} \quad (5.4)$$

Por fim, a Figura 39 apresenta a resposta ao degrau, com a curva experimental obtida na aquisição de dados, representada em azul, e a simulação da função da transferência utilizada para o cálculo do controlador PI, representada em vermelho.

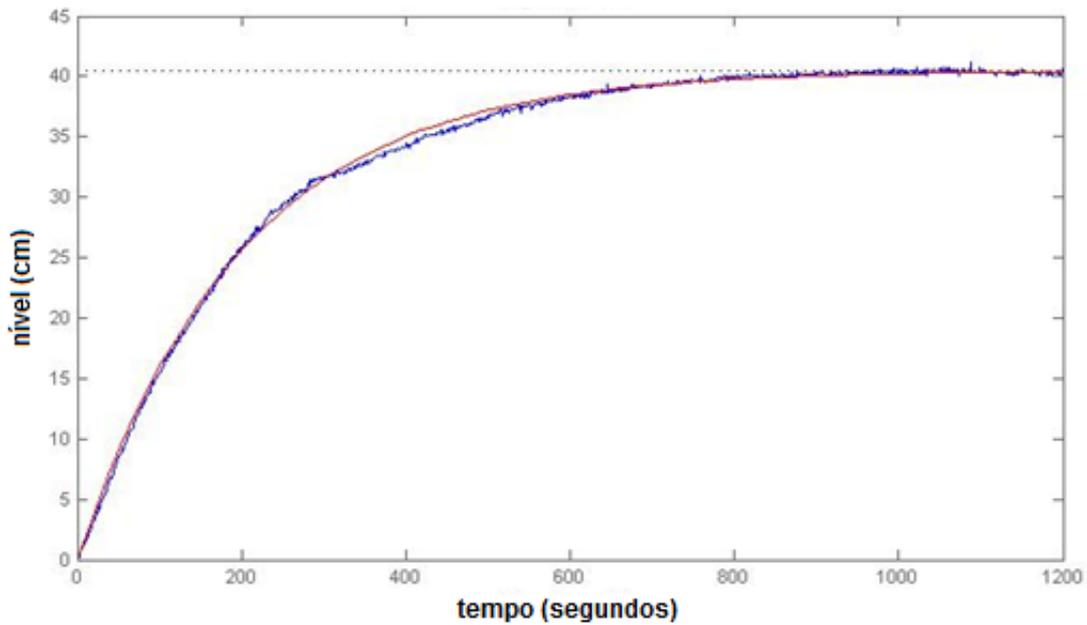


Figura 39 - Resposta ao degrau com a aplicação de 10,41 V

Por considerar que o nível estacionário da água no segundo teste é um bom patamar para tomar como ponto de operação padrão, ou seja, utilizar a referência de nível em torno de 40 cm, tomamos como função de transferência do sistema a FT da Equação 5.2.

O tempo de amostragem, que deve estar situado entre $T/125 < T_a < T/75$, sendo T a constante de tempo do sistema, foi estipulado em 1,6 segundos.

5.1.2 Cálculo do controlador PI de nível

Para ajustar os parâmetros do controlador PI, primeiramente identificamos a função de transferência do sistema e, em seguida, realizamos os cálculos utilizando as fórmulas descritas no Quadro 1 do item 3.4.2, com $T_c = 3$, a fim de determinar K_p e T_i . Logo

$$K_p = \frac{200}{3,89 * 3} = 17,14 \quad (5.5)$$

$$T_i = \min [200 ; 11,66] = 11,66 \quad (5.6)$$

Ao configura o bloco PID do CLP com esses valores foi obtida a resposta do sistema de controle de nível em malha fechada. Essa resposta pode ser visualizada na Figura 40.

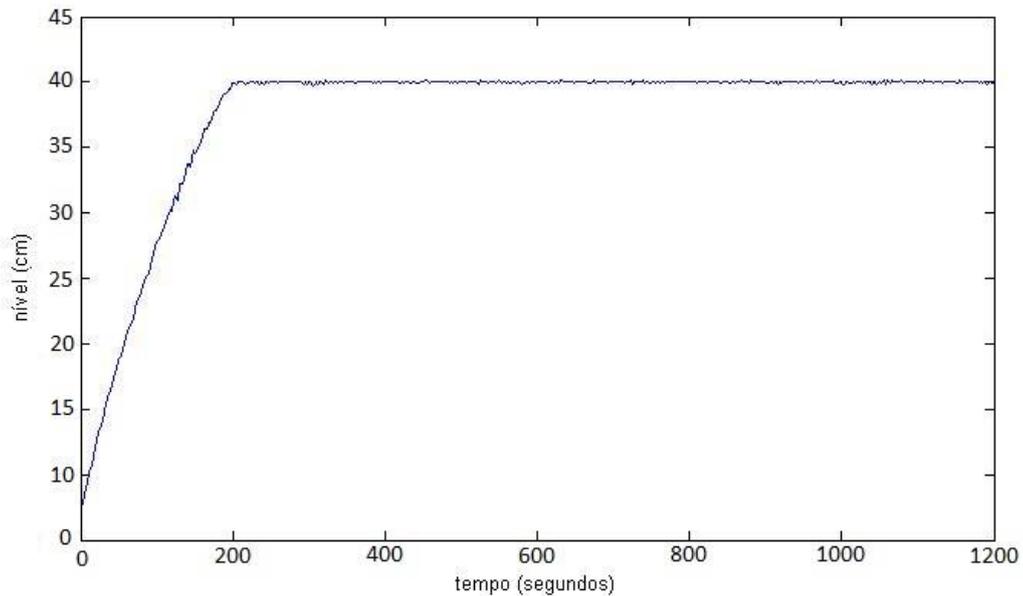


Figura 40 - Resposta do sistema de nível com um controlador PI

Podemos observar que o sistema segue a referência (*set point*) predefinida no bloco PID do CLP, sem apresentar um sobressinal elevado nem ao menos oscilações.

5.2 SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA

Para o sistema de controle de temperatura foram realizados os mesmos procedimentos utilizados no sistema de controle de nível. Para ajustar os parâmetros do controlador PI de temperatura foi necessário, primeiramente, utilizar a técnica de identificação da planta a fim de obter a função de transferência do sistema e, em segundo lugar, as regras de Skogestad para obter os valores dos parâmetros do controlador.

5.2.1 Resultados experimentais (temperatura)

Com a aplicação de 200 W no ebulidor elétrico (equivalente a sinal de 20% de PWM), e temperatura inicial de 23,0 °C, obteve-se a temperatura máxima de 37,5 °C, resultando em uma variação de 14,5 °C. Como o CLP não trabalha com ponto flutuante, utilizamos o último dígito como a primeira casa decimal, ou seja, 230 equivale a 23,0 °C. Logo o ganho estático do sistema é de

$$K_E = \frac{145}{0,2} = 725 \quad (5.7)$$

Analisando a curva experimental obtida com a técnica de identificação da planta, ao medirmos o tempo que a saída demora para atingir 63% da temperatura máxima encontramos a constante de tempo do sistema que é de aproximadamente 3,23 horas (11660 segundos). Logo, a função e transferência obtida é

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{725}{11660s + 1} \quad (5.8)$$

A Figura 41 apresenta a resposta ao degrau de temperatura. A curva experimental obtida na aquisição de dados está representada em azul, porém nota-se que há bastante ruído, o que dificulta a modelagem. Provavelmente, este ruído seja proveniente da interferência eletromagnética que a bomba gera, podendo ser atenuada através da utilização de cabo blindado e filtros. Portanto, para melhorar a visualização da resposta, foi calculada a média móvel dos dados obtidos resultando na curva representada em vermelho. Por fim, a simulação da função da transferência utilizada para o cálculo do controlador está representada em branco.

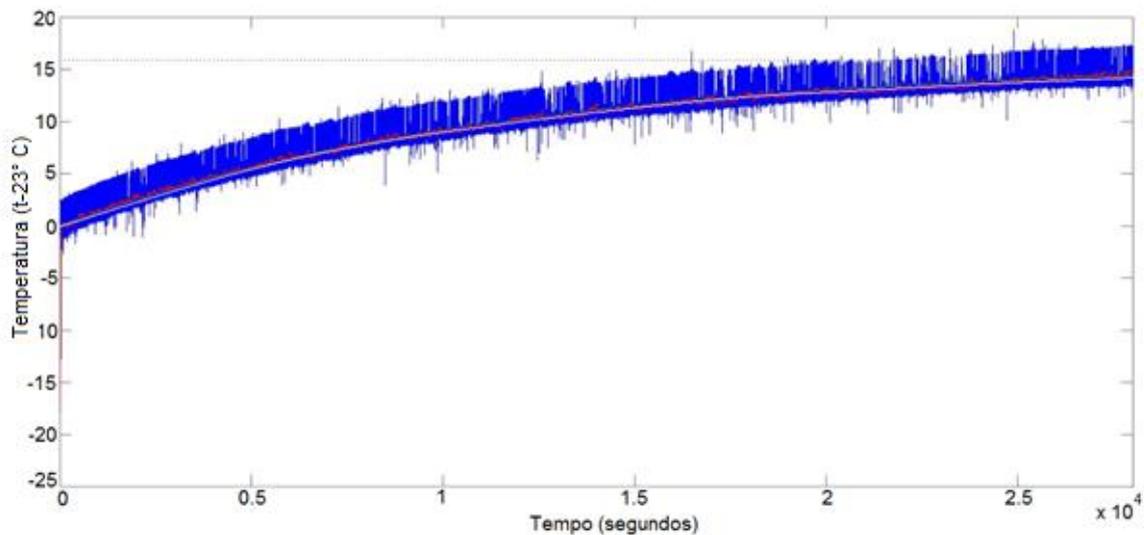


Figura 41 - Resposta ao degrau com aplicação de 200 W
Fonte: Autoria própria

Outra consideração importante é que a temperatura de 0 °C no gráfico da resposta ao degrau corresponde a uma temperatura de 23 °C. Portanto, todos os valores de temperatura mostrados neste gráfico devem ser acrescidos de 23 °C para obter os valores reais de temperatura medidos.

5.2.2 Cálculo do controlador de temperatura

Para ajustar os parâmetros do controlador PI de temperatura, utilizamos as fórmulas descritas no Quadro 1 do item 3.4.2, com $T_C = 2$. Os valores de K_p e T_i obtidos foram

$$K_p = \frac{11660}{725 * 2} = 8,04 \quad (5.9)$$

$$T_i = \min [11660 ; 1450] = 1450 \quad (5.10)$$

O tempo de amostragem, que deve estar situado entre $T/125 < T_a < T/75$, sendo T a constante de tempo do sistema, foi estipulado em 93 segundos.

Entretanto, ao parametrizar o CLP nos deparamos com o valor de T_i fora dos limites permitidos pelo CLP. Segundo o manual do CLP (TWIDOSUITE, 2009, p. 663), recomenda-se a utilização da função PID do equipamento para a regulação dos

processos que satisfaçam a seguinte condição: $2 < (T/\theta) < 20$, sendo T a constante de tempo do sistema e θ o tempo de atraso. Como no caso do sistema de temperatura a constante de tempo é bastante elevada e o atraso de transporte praticamente desprezível, o controle PID torna-se desnecessário e, no caso do CLP, impraticável com a utilização dos parâmetros K_p e T_i calculados. O manual do CLP sugere que para sistemas com $T/\theta > 20$ seja utilizado um simples controlador on/off (liga/desliga) com histerese no lugar do controlador PID.

No controlador *on/off* o elemento atuante, no caso o ebulidor, será ativado em duas posições fixas: “ligado ou desligado”. O sinal de saída permanece igual a um valor máximo ou a um valor mínimo dependendo do sinal do erro. Considerando o sinal do erro $e(t)$ e o sinal de saída $u(t)$, o comportamento do controlador é descrito por

$$u(t) = \begin{cases} 100 & \text{se } e(t) < 30 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } e(t) > 32 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.11)$$

onde $31 \text{ }^\circ\text{C}$ corresponde à temperatura de *setpoint* com variação de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e 100 e 0 correspondem aos valores repassados ao *preset* do PWM1, em porcentagem.

É importante destacar que foi mantida a estrutura de acionamento do ebulidor através do bloco PWM para que o usuário possa, eventualmente, fazer testes com outros tipos de controlador.

Neste tipo de controle o controlador é modelado conforme a Figura 42.

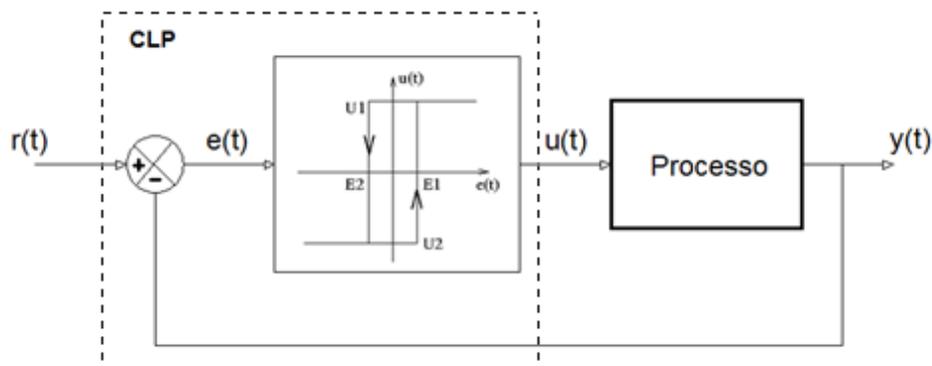


Figura 42 - Controle On/Off
Fonte: Autoria própria

Na Figura 42 destaca-se o processo de controle através do controlador *on/off* com histerese, de forma que a ação de controle $u(t)$ fica no valor máximo até que a saída $y(t)$ ultrapasse o valor do *set point* mais a variação aceitável (limite máximo), gerando assim um valor de erro máximo com sinal negativo, levando a saída de controle a zero. O sistema permanece com $u(t) = 0$ até que a saída caia abaixo do limite mínimo (*set point* menos a variação aceitável) e, então, a saída de controle seja ativada em $u(t) = 100$. O *set point* foi ajustado em 31 °C e os limites máximo e mínimo utilizados para temperatura foram 32 °C e 30 °C, respectivamente.

Aplicando o controlador no sistema de temperatura obteve-se a seguinte resposta:

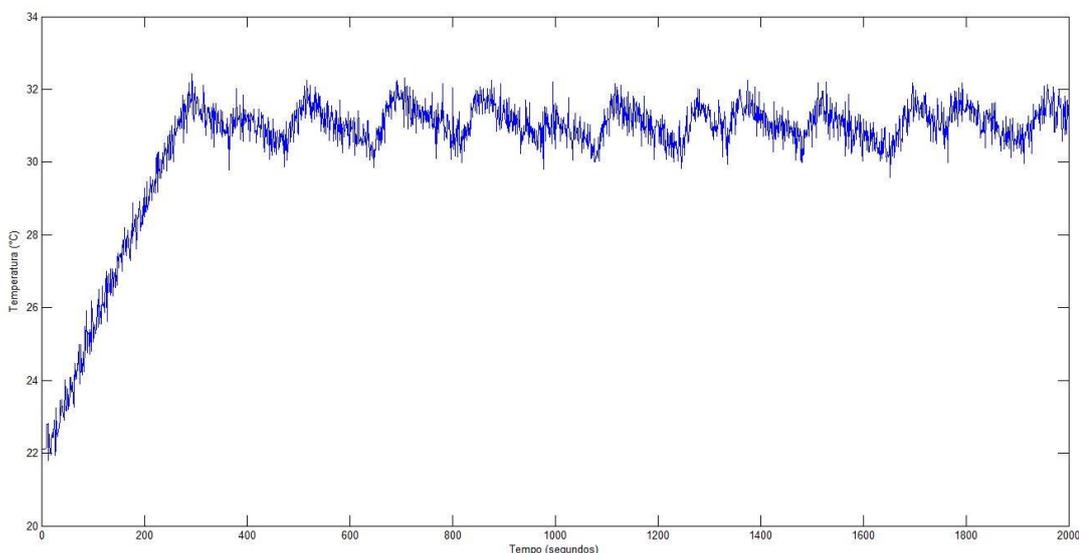


Figura 43 - Resposta do sistema de temperatura com um controlador On/Off
Fonte: Autoria própria

Podemos observar que o sistema segue a referência (*set point*) predefinida, porém apresenta oscilações, como esperado quando se é utilizado um controlador *on/off*. Os parâmetros de limite mínimo e máximo do controlador podem ser melhor ajustados para obter menos variação em torno da origem. Entretanto, com a medição apresentando tanto ruído um limite de tolerância menor acaba sendo impraticável.

6 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o sistema de controle de nível através do controlador PI obteve uma resposta satisfatória, com sobressinal mínimo e com poucas oscilações em torno da referência.

No sistema de controle de temperatura, a saída de controle apresentou oscilação devido à presença de ruído no sensoriamento, tornando a resposta do sistema com oscilações em torno da referência. Os ensaios de temperatura foram realizados com o nível do reservatório superior em 36 cm e a válvula de retorno totalmente aberta, de forma a operar próximo ao ponto de operação de controle de nível e trabalhar com a perda de calor em ambos os reservatórios.

Durante a construção da bancada, um dos problemas encontrados foi a utilização da válvula solenoide, visto que nenhuma das válvulas adquiridas na compra de materiais conseguia liberar a passagem de água por não haver pressão suficiente para tal. Uma solução seria a aquisição de uma válvula solenoide proporcional própria para uso industrial, porém esta possui um custo muito elevado sendo inviável para o projeto.

Através das interfaces (IHM e tela), foi possível realizar o controle de determinados equipamentos da bancada e, também, monitorar o funcionamento dos mesmos de maneira bastante visual e simplificada com a utilização de gráficos, animações e telas.

Por fim, viu-se a necessidade de melhorias neste projeto visando proporcionar a implementação de um sistema mais eficiente e confiável. Assim, como algumas propostas para trabalhos futuros, têm-se:

- Eliminar ruído do sensor de temperatura e investigar as vantagens de trocá-lo por um PT-100;
- Melhorar o Driver de acionamento da Bomba;
- Acrescentar um sensor de nível com flutuador magnético também no reservatório superior (nível máx. de segurança);
- Adicionar uma válvula solenoide proporcional na saída do reservatório superior, para possibilitar um controle de vazão de forma automática.

REFERÊNCIAS

BARCELLOS, Fabrício Padilha. **Sistema Didático para Controle de Nível e Temperatura**. 2005. 95 f. Monografia – Centro Federal de educação tecnológica de Pelotas, Pelotas, 2005. Disponível em: <http://projectotecnologico.com.sapo.pt/documentacao_files/tcc_fabricio_final_pdf.pdf> Acesso em: 05 maio 2014, 23:02.

BORTOLO, Karla F. Verificação da Necessidade de Dispositivos Didáticos Para o Ensino na Graduação em Engenharia Mecânica. In: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 34, 2006, Passo Fundo. Anais. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2006/artigos/1_69_790.pdf>. Acesso em: 15 set. 2014.

CAMPOS, Mario C. M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. Controles típicos de equipamentos e processos industriais. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

COELHO, Antônio A. Rodrigues; COELHO, Leandro dos Santos. Identificação de sistemas dinâmicos lineares. 1. ed. Florianópolis: Editora da USFC, 2004.

DAL MOLIN, Anderson; ZORZAN, Flávio Bouffleur; DARONCH, Jéferson. Desenvolvimento de uma bancada didática de hidráulica. Fórum Latino-americano de engenharia, Foz do Iguaçu, 13 nov. 2013. Disponível em: <http://www.unila.edu.br/sites/default/files/files/24%20-%20FLAE_DESENVOLVIMENTO_DE_UMA_BANCADA_DID%C3%81TICA_DE_HIDR%C3%81ULICA.pdf>. Acesso em: 28 outubro 2014.

ELIPSE SOFTWARE. Disponível em: <<http://www.elipse.com.br/port/e3.aspx>> Acesso em: 09 julho 2014, 15:05.

EXSTO Tecnologia – **Bancada didática de Nível, Vazão e Temperatura XC220**. Disponível em: <<http://www.exsto.com.br/uploads/download-automacao-e-controle->

xc220--banco-de-ensaios-em-controle-de-processos-nivel-e-vazao.pdf>. Acesso em: 06 maio 2014.

FERNANDES, Elisângela. David Ausubel e a Aprendizagem Significativa. **Revista Nova Escola**, São Paulo: Abril, dez. 2011. Edição 248.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Instrumentação industrial**: conceitos, aplicações e análises. 4. ed. São Paulo: Érica, 2006. 278 p.

FILHO, Bernardo S. da Silva. **Curso de controladores lógicos programáveis**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.lee.eng.uerj.br/downloads/cursos/clp/clp.pdf>>. Acesso em: 28 outubro 2014.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; NAEINI, Abbas Emami-. Feedback control of dynamic systems. 6. ed. New Jersey, USA: Prentice Hall (Person), 2010.

FREESCALE. **Datasheet**. Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated MPX5010. 2012. 6 p. Disponível em: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5010.pdf>. Acesso em: 20 julho 2014.

GOLNARAGHI, Farid; KUO, Benjamin C. Sistemas de controle automático. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**: gravitação, ondas e termodinâmica. 8. ed. vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

K.H. John; M. Tiegelkamp. **IEC 61131-3**: Programming Industrial Automation Systems. 2. ed. Springer, 2010.

LOPES, Marco Aurélio Moreira. **A importância dos sistemas supervisórios no controle de processos industriais**. 2009. 49 f. Monografia – Universidade Federal

de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2009/MARCO%20AURELIO%20M.%20L%20OPES.pdf>>. Acesso em: 27 junho 2014, 22:00.

NOVUS. **Manual de instruções**. Relé de estado sólido – SSR 10, 25, 40, 60, 80 e 100 A. 2014. Disponível em: <http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=905051&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=519490>. Acesso em: 23 novembro 2014.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PANAMBRA. Disponível em: <http://www.panambra.com/produto/Equipamento-didatico-para-treinamento-no-controle-de-nivel-e-de-fluxo-de-um-processo-38-001>>. Acesso em: 06 maio 2014.

PAREDE, Ismael Moura; GOMES, Luiz Eduardo Lemes. **Eletrônica: Automação industrial**. vol. 6. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

PORTAL EDUCAÇÃO – **Automação industrial e a sua importância dentro do cenário industrial hoje**. Disponível em: <http://www.portaleducacao.com.br/informatica/artigos/53683/automacao-industrial-e-a-sua-importancia-dentro-do-cenario-industrial-hoje>. Acesso em: 24 outubro 2014.

RAMOS, Mário Bertt de Arruda. **Proposta de planta didática multiprocesso e multitarefa**. 2013. 83 f. TCC – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-20012014-165625/?&lang=br>>. Acesso em: 09 abril 2014, 21:04.

SILVA, Ana Paula Gonçalves da; SALVADOR, Marcelo. O que são sistemas supervisórios? **Centralmat**, 2004. Disponível em:

<<http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/oQueSaoSistemasSupervisorios.pdf>>.

Acesso em: 27 junho 2014, 22:10.

SILVA, Rodrigo Baleeiro; LOPES, Murilo P.; AMARAL, Leonardo S. Projeto e construção de uma planta didática para ensino de estratégias de controle de nível, vazão e temperatura em cursos de Engenharia. **Abenge – Associação Brasileira de Educação de Engenharia**, Montes Claros, 2012. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/103776.pdf>>. Acesso em: 09 abril 2014, 21:11.

SILVEIRA, Leonardo; LIMA, Weldson Q. Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial. **Departamento de Engenharia de computação e automação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, Natal, 2003. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1_13.pdf>. Acesso em: 10 maio 2014, 14:30.

SKOGESTAD, Sigurd. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Modeling, identification and control. Elsevier Journal of Process Control. Trondheim - Norway, 2001.

SMAR – **Planta didática HART, FOUNDATION, Fieldbus e PROFIBUS**. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/produtos/view.asp?id=36>>. Acesso em: 06 maio 2014.

SOUZA, Geraldo Teles de. **Apostila**. Escola Técnica Estadual Pedro Ferreira Alves. Controle e automação industrial, 2004.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet**. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 30 outubro 2014.

T&S Equipamentos eletrônicos - **Planta de controle de nível**. Disponível em: <http://www.tesequipamentos.com.br/arq/DC-TS-1028.PDF>. Acesso em: 24 outubro 2014.

TWIDOSUITE V.2.2. **Programming guide**. Schneider Eletrics, 2009. 769 pgs. Disponível em: http://www.univasf.edu.br/~joseamerico.moura/pag_autom_arquivos/TWProgramming.pdf. Acesso em: 20 novembro 2014.

WENDLING, Marcelo. Apostila de Sensores. Universidade Estadual Palista – UNESP, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4--sensores-v2.0.pdf>. Acesso: 23 outubro 2014.

APÊNDICE A

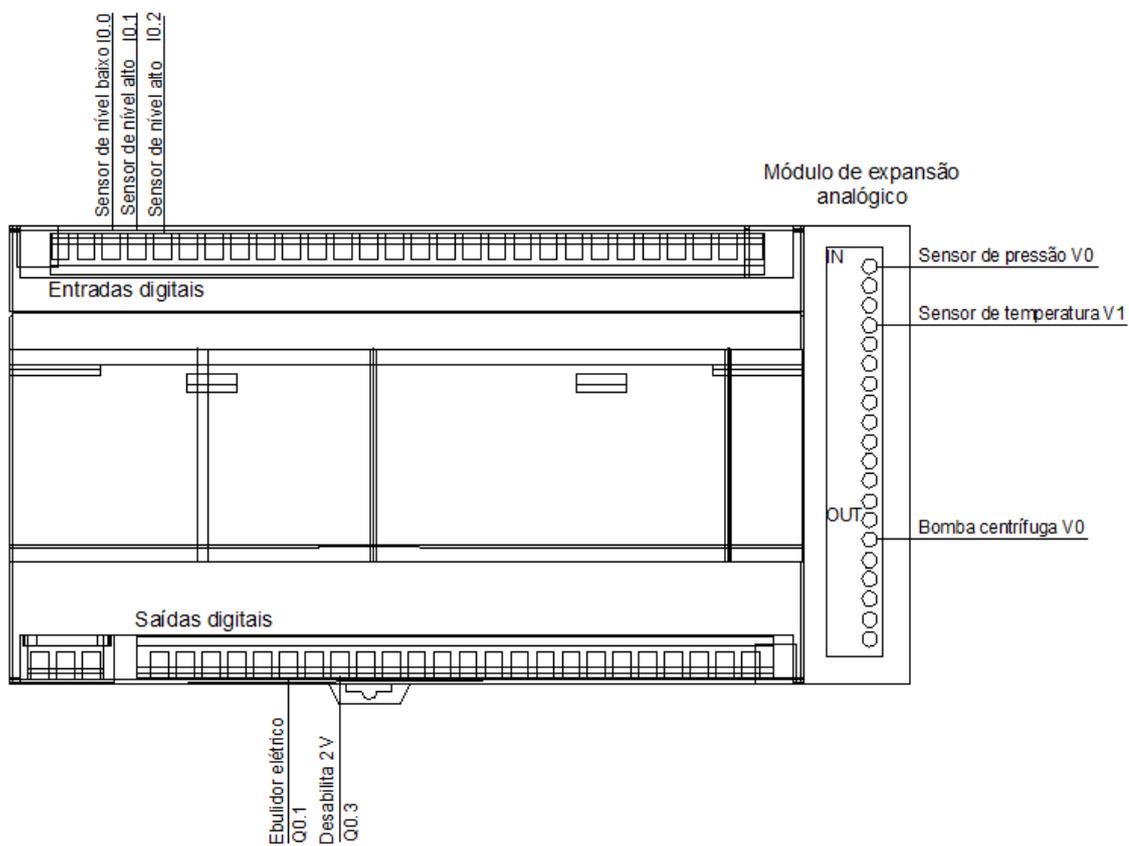


Figura 44 – Esquema de conexões das entradas e saídas no CLP