

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Emulador eletrônico de planta industrial com interface virtual

Nayele Almeida Lucena

Itumbiara/GO
2021

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Nayele Almeida Lucena

Matrícula: 20151040100065

Título do Trabalho: Emulador Eletrônico de Planta Industrial com Interface Virtual

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 23/05/2021.
Local Data

Nayele Almeida Lucena

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Nayele Almeida Lucena

Emulador Eletrônico de Planta Industrial com Interface Virtual

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Prof. Dr. Bruno Gabriel
Gustavo Leonardo Zambolini Vicente
Coorientador: Prof. Me. Prof. Me. Willian
Martins Leão

Itumbiara- GO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L935e Lucena, Nayele Almeida
 Emulador eletrônico de planta industrial com interface
 virtual. / Nayele Almeida Lucena. -- Itumbiara, 2021.
 71 f. : il. color.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
 de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação,
 Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2021.
 Orientador: Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo
 Zambolini Vicente.
 Coorientador: Prof. Me. Willian Martins Leão

 1. Sistemas eletrônicos. 2. Arduino (Controlador
 programável). 3. Automação industrial.

 I. Título. II. Vicente, Bruno Gabriel Gustavo Leonardo
 Zambolini. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e
 Tecnologia de Goiás.

CDD 629.8

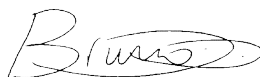
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266

Nayele Almeida Lucena

EMULADOR ELETRÔNICO DE PLANTA INDUSTRIAL COM INTERFACE VIRTUAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora, parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Aprovado em 11 de fevereiro de 2021.



Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente
IFG – Câmpus Itumbiara
Orientador



Prof. Me. Willian Martins Leão
CEFET/MG – Câmpus Contagem
Coorientador



Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli
IFG – Câmpus Itumbiara
Avaliador



Prof. Me. Wellington do Prado
IFG – Câmpus Itumbiara
Avaliador

Itumbiara/GO
2021

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família, em especial a minha mãe que me apoiou nos momentos mais difíceis e ao meu pai que me ajudou com o desenvolvimento da parte física do trabalho.

Agradeço aos meus amigos: Ana Luiza R. Pacheco, Dario B. S. Neto, Rony S. Gomes, Rafael B. Sicheroli, João Eduardo M. Costa, Stefane B. Germano, que não só me apoiaram mas como me ajudaram a chegar onde estou.

Agradeço aos meus colegas de classe, em especial Lucas Eusebio e Maria Clara S. Borges, que me acompanharam nessa jornada.

Agradeço a Amanda S. Vieira , minha cunhada, que me ajudou na revisão do texto.

Agradeço também ao Arthur A. S. Vieira, que além de colega de classe, também é meu companheiro, e me ajudou e apoiou nos momentos mais difíceis desse percurso.

Agradeço a todos os professores que colaboraram para o meu conhecimento, em especial ao Professor Willian que inicialmente idealizou esse projeto, e também ao orientador, Professor Bruno.

Agradeço ao IFG pelo oportunidade.

Resumo

Lucena, N. **Emulador Eletrônico de Planta Industrial com Interface Virtual**. 71 p. Monografia – Câmpus Itumbiara, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, 2021.

O trabalho apresentado nessa monografia consiste no desenvolvimento de um emulador eletrônico de planta industrial, que tem por objetivo o estabelecimento de uma plataforma para a experimentação da interação entre sistema de controle via CLP e um processo contínuo. Para tal, os fundamentos de transporte de fluídos concernentes a uma planta de nível acionada por uma moto-bomba foram equacionados, e, através da aplicação de técnica numérica de resolução, produziu-se e testou-se a solução de *hardware* projetada e embarcada em uma placa Arduino UNO, desempenhando a função da planta de processo, assim como uma interface de interação com o usuário construída através do software *Processing*, na qual há comunicação direta com o Arduino. Os resultados demonstraram que tanto a placa do projeto quanto os programas computacionais desenvolvidos respondem conforme o esperado, comportando-se como o sistema contínuo escolhido para emulação. Ao final, mapeou-se as potencialidades e possíveis melhorias futuras aplicáveis ao projeto, evidenciando um potencial novo ramo de trabalhos a serem desenvolvidos.

Palavras-chave: Emulação de Processos; Sistemas Eletrônicos Embarcados; Controle via CLP

Abstract

Lucena, N. **Electronic Emulator of Industrial Plant with Virtual Interface.** 71 p. B.Sc. in Engeneering Thesis – Câmpus Itumbiara, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, 2021.

The study presented in this monograph consists in the development of an electronic emulator of an industrial plant, which aims to establish a platform for experimenting the interaction between a PLC control system and a continuous process. In doing so, the fundamentals of fluid transport related to a level plant driven by a motor-pump were equated, and, through the application of a numerical resolution technique, the designed embedded hardware solution was produced and tested in an Arduino UNO board, operating the function of the process plant, likewise an interaction interface with the user develop through the Processing software, in which there is a direct communication with the Arduino. The results revealed that both the designed board and the developed computer programs respond as expected, behaving like the continuous system chosen for the emulation. Finally, the potential and possible improvements applicable to the project were mapped, showing a potential new line of work to be developed.

Keywords: Process Emulation; Embedded Electronic Systems. PLC Control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Planta didática de nível da EDUTEC	23
Figura 2 – Planta didática de controle de vazão, nível e temperatura	24
Figura 3 – Planta de nível simulada no SIMMAQ 3D	24
Figura 4 – Diagrama do E3P	27
Figura 5 – Fluograma de Emulação	28
Figura 6 – Diagrama do condicionamento de sinais do E3P	29
Figura 7 – Sensor de nível tipo boia	30
Figura 8 – Atuação do sensor de nível tipo boia	30
Figura 9 – Sensor ultrassônico industrial	31
Figura 10 – Atuação do sensor ultrassônico industrial	31
Figura 11 – Optoacoplador	32
Figura 12 – Circuito da entrada digital para o CLP	32
Figura 13 – Conversor MCP4725	33
Figura 14 – Circuito utilizado para conversão do sinal	33
Figura 15 – Amplificador operacional não-inversor	34
Figura 16 – Circuitos divisores de tensão	36
Figura 17 – Projeto 3D da PCI	37
Figura 18 – PCI do emulador	38
Figura 19 – Parte exterior do E3P	39
Figura 20 – Planta de nível	40
Figura 21 – A curva da bomba	41
Figura 22 – Planta de nível com cotas	42
Figura 23 – Desenhos do tanque	48
Figura 24 – Interface de interação com o usuário v1.0	48
Figura 25 – Interface de interação com o usuário - Início	49
Figura 26 – Interface de interação com o usuário v2.0	50
Figura 27 – Janela para entrada de dados	50
Figura 28 – Interface de interação com o usuário - Configurações adicionais	51

Figura 29 – Interface de gráfica da planta com cotas	52
Figura 30 – Fluxograma do algoritmo de erros	53
Figura 31 – Interface de entrada de dados com mensagem de erro	54
Figura 32 – Interface gráfica da planta	54
Figura 33 – Interface com parâmetros pré-definidos	58
Figura 34 – Trilhas da PCI	60
Figura 35 – Multímetros mostrando a tensão das entradas digitais	61
Figura 36 – Janela de interface mostrando os níveis do tanque	62
Figura 37 – Multímetros mostrando a tensão da entrada analógica	63
Figura 38 – Multímetros mostrando a tensão da saída analógica	64
Figura 39 – Valores impressos interpretados pelo Arduino	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de Materiais para uma Planta Didática Real	35
Tabela 2 – Lista de Materiais da PCI	38
Tabela 3 – <i>Feedback</i> dos avaliadores	59
Tabela 4 – Conversões de sinais da saída analógica	65

Lista de abreviaturas e siglas

AO	Amplificador Operacional
CI	<i>Circuito Integrado</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
DAC	<i>Conversor Digital-Analógico</i>
DT	<i>Divisor de Tensão</i>
E3P	<i>Emulador Portátil de Plantas de Processo</i>
FIT	<i>Indicador Transmissor de Vazão</i>
GUI	<i>Interface Gráfica de Usuário</i>
IHM	<i>Interação Humano-Máquina</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
LED	<i>Diodo Emissor de Luz</i>
LIT	<i>Indicador Transmissor de Nível</i>
LSH	<i>Chave de Nível Alto</i>
LSL	<i>Chave de Nível Baixo</i>
LSLL	<i>Chave de Nível Muito Baixo</i>
PCI	<i>Placa de Circuito Impresso</i>
PIC	<i>Controlador de Interface Periférica</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivativo</i>

Lista de símbolos

E_{total}	Energia total no ponto analisado
E_c	Energia cinética
E_p	Energia potencial
E_{pr}	Energia de pressão
m	Massa
v	Velocidade do fluido
g	Gravidade
P	Pressão no ponto analisado
h	Altura do ponto analisado
h_{max}	Altura máxima do tanque
$h_{convertido}$	Altura convertida
h_b	Carga Manométrica
h_f	Perda de carga na tubulação
h_1	Altura no ponto 1
h_2	Altura no ponto 2
k	Coefficiente de perda de carga
Q	Vazão na tubulação
A	Área da tubulação analisada

A_r	Área da tubulação de recalque
h_{max}	Carga manométrica máxima
$h(Q_{\omega_{max}})$	Altura para vazão em máxima rotação
w_b	Rotação da bomba
w_{max}	Rotação máxima da bomba
f	Fator de atrito
L	Comprimento da tubulação
L_{eq}	Comprimento equivalente de tubulações
D	Diâmetro da tubulação
v	Velocidade do fluido
Re	Reynolds
ε	Rugosidade absoluta do material
Q	Vazão volumétrica
Q_e	Vazão de entrada
ρ	Massa específica do fluido
μ	Coeficiente de viscosidade
γ	Peso específico
V	Tensão Elétrica
t	Tempo atual
t_{ant}	Tempo anterior

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Plantas Didáticas	22
1.1.1	Planta Reais	22
1.1.2	Planta Virtuais	24
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivos específicos	25
1.3	Organização do trabalho	26
2	Desenvolvimento	27
2.1	Funcionalidade	27
2.2	Condicionamento de Sinais	29
2.2.1	Arduino → CLP	30
2.2.2	CLP → Arduino	35
2.3	Placa de Circuito Impresso	36
2.4	Descrição do Processo Emulado no Arduino	39
2.4.1	Planta de Nível Emulada	39
2.4.1.1	A bomba	41
2.4.1.2	Sensores	41
2.4.2	Fundamentos de Transporte dos Fluidos	42
2.4.3	Métodos Numéricos	46
2.5	Interface gráfica	47
2.5.1	Versão 1.0	47

2.5.2	Versão 2.0	49
3	Validação do Emulador	57
3.1	Teste de <i>Software</i>	57
3.1.1	Parâmetros	57
3.1.2	Teste de Controle	58
3.1.3	Teste de Usabilidade	58
3.2	Teste de <i>Hardware</i>	59
3.2.1	Continuidade	60
3.2.2	Entradas Digitais	60
3.2.3	Entradas Analógicas	62
3.2.4	Saídas Digitais	63
3.2.5	Saídas Analógicas	63
3.3	Resultados de Funcionamento	65
4	Conclusão	67
4.1	Considerações finais	67
4.2	Trabalhos futuros	67
	Referências	69

Introdução

O engenheiro é visto como o solucionador de problemas, no qual tem diversos desafios para desvendar, tendo como principais desafios aderir seus projetos e soluções à sustentabilidade, saúde, ambiente e entre outros (FURTADO, 2013). Desse modo, o ensino da engenharia deve moldar-se às necessidades do mercado, considerando a busca por profissionais que tenham a capacidade de desempenhar atividades dos vários setores de desenvolvimento (SILVA; CECÍLIO, 2007).

O engenheiro necessita adquirir habilidades práticas para ser capaz de solucionar problemas. Infelizmente, em muitos casos, essa aptidão tem sido agregada apenas no mercado de trabalho devido a escassez de recursos e práticas pedagógicas para o desenvolvimento dentro do ambiente escolar. Dessa forma, as aulas práticas irão auxiliar já que elas proporcionam grandes espaços para que o aluno seja atuante, construtor do próprio conhecimento, buscando visualizar amplamente o processo em estudo e descobrindo soluções com os próprios erros (PRESTES; RODRIGUES, 2016).

Os alunos precisam aprender que problemas de engenharia não são resolvidos apenas com matemática, pois julgamento e percepção são cruciais. Com a experiência prática, eles podem desenvolver sensibilidade quanto a quantidade, dimensões, valores e proporção (SHAABAN, 2013).

Dessa forma, quanto maior for a disponibilidade e diversidade de recursos didáticos, maior será a versatilidade de práticas pedagógicas do professor, o que possibilita um maior desempenho do aluno ao assimilar a teoria à prática, desenvolvendo assim, as habilidades necessárias para o mercado de trabalho.

A implementação de um dispositivo que permita maior interação dos alunos com um sistema prático é importante, visto que a experiência é o processo aonde surge o interesse, a motivação e a indagação, resultando em um aprendizado completo e uma formação de conhecimento madura (BATISTA et al., 2017). No contexto da Engenharia de Controle e Automação, os conhecimentos relacionados ao desenvolvimento de soluções para o ramo

industrial dependem de novas tecnologias e de novas formas de ensino e aprendizagem.

Segundo Maia (2002), a utilização de interfaces didáticas possibilitam, aos estudantes de automação, um aumento da velocidade de aprendizado, da motivação e a eficácia nos resultados desejados. Levando em consideração que, ao primeiro contato com sistemas de automação, o aluno tem hesitação quanto a forma de lidar com os equipamentos, uma forma de conceder confiança e segurança seria utilizar de plantas eletrônicas didáticas.

No entanto, tais plantas didáticas são de custo elevado, ocupam muito espaço e, podem exigir adequações estruturais, o que as vezes tornam inviáveis para uma aplicação. Dessa forma, um equipamento barato, portátil e multifuncional é mais interessante para os alunos praticarem seu conhecimento de controle e automação.

1.1 Plantas Didáticas

As plantas didáticas são importantes para a aplicação de aulas práticas de instalações industriais, acionamentos, instrumentação, além de auxiliar no ensino da programação do CLP - Controlador Lógico Programável. A seguir, será apresentado alguns exemplos de plantas didáticas, tanto reais quanto virtuais, já disponíveis no mercado.

1.1.1 Planta Reais

Existem diversos modelos de plantas didáticas no mercado, serão abordados aqui dois exemplos deles.

- Planta EDUTEC

Essa planta didática de nível e vazão contém os tanques e o painel que possui sensores de vazão, nível, pressão, um módulo CLP, IHM- Interface Homem-Máquina. Com ela, é possível desenvolver os conhecimentos de programação do CLP, programação do IHM, estudo de I/O(Input/Output) digitais e analógicas (ASTRALCIENTÍFICA, 2020).

Além disso, tem como vantagem ser uma planta bem completa, por ter seu projeto construtivo bem fiel ao um modelo real, o seu comportamento será o mais próximo de uma sistema de nível e vazão. Porém, como desvantagens esse ocupa muito espaço e possui alto custo de aquisição (ASTRALCIENTÍFICA, 2020).

Figura 1 – Planta didática de nível da EDUTEC



Fonte: AstralCientífica (2020)

- Planta Didática Experimental de Silva, Lopes e Amaral (2020)

Assim como a anterior, essa é de vazão e nível, porém nesta também há controle de temperatura. Esta planta foi elaborada por Silva, Lopes e Amaral (2020) para fins didáticos, contando com tanques de reservatório de 100L e 41L, sensores de vazão, nível e temperatura e também o CD600, um controlador digital de processos, capaz de controlar simultaneamente até 4 malhas de controle.

A planta conta com ferramentas desenvolvidas para aplicação em controle, assim como oferece algumas aplicações didáticas, tal como: controle manual de processos, utilização do controle PID, estudo de calibração e estabilidade em variadas condições de controle, análise do comportamento do sistema em variados padrões de distúrbio, demonstração da aplicabilidade de um regulador eletrônico por setpoint remoto, assim como outras aplicações (SILVA; LOPES; AMARAL, 2020).

Abaixo na Figura 2, mostra a planta didática concluída.

Figura 2 – Planta didática de controle de vazão, nível e temperatura



Fonte: Silva, Lopes e Amaral (2020)

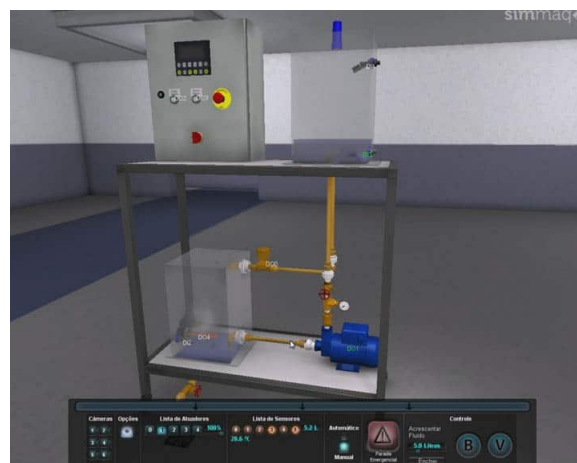
1.1.2 Planta Virtuais

Assim como as plantas reais, existem diversos modelos de plantas virtuais, porém cada um com sua aplicação e propósito diferente. A seguir é mostrado um exemplo de uma planta virtual.

- Planta Virtual SIMMAQ 3D

O SIMMAQ 3D é um *software* para testar lógicas de controle do CLP, no qual contém a interface com simulação da plantas virtuais que permitem testar diversas situações de falhas do sistema, assim como o teste do código programado. É um sistema compacto que pode ou não ter comunicação com um CLP físico, além de ter pelo menos 5 plantas 3D (AUTTOM, 2020). No entanto, assim como o sistema abordado anteriormente, seu custo de aquisição é elevado.

Figura 3 – Planta de nível simulada no SIMMAQ 3D



Fonte: Auttom (2020)

Devido aos custos elevado de aquisição de uma planta industriais didática, tanto real quanto virtual, é necessário encontrar alternativas mais viáveis. Uma delas seria a elaboração de um dispositivo emulador que substitua a funcionalidade prática de tais plantas.

Em Batista et al. (2012), foi desenvolvido uma ferramenta de simulação de processos industriais com CLP via microcontrolador PIC 18F4550. O software foi programado em C, com telas de simulação permitindo a interação do usuário com o processo. Além do mais, o programa, além de ter alguns processos já pré-definidos, também permite que o usuário crie um novo processo, graças à facilidade de uso do software de elaboração.

Assim como o anterior, em Francisco e Campo (2017) é desenvolvida uma ferramenta de simulação de processo, desta vez utilizando um Arduino Duo para a planta, um sistema SCADA para interação com o usuário e Simulink para o monitoramento.

Já em Seschini e Galvez (2007) foi utilizado um ambiente Windows com linguagem Visual Basic para simular as plantas industriais. Dessa forma, foi dada a oportunidade ao usuário de ter maior controle das plantas, além de facilitar a troca de planta, ou seja, é possível programar um novo modelo de forma facilitada.

Há muitos títulos que elaboraram projetos com o intuito de simular um processo industrial para acrescentar ao conhecimento dos alunos. O presente trabalho proporcionará aos estudantes uma nova ferramenta para complementar os estudos de controle e automação.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desse projeto é desenvolver um dispositivo eletrônico compacto e de baixo custo que emule o comportamento, ao menos em parte, de processos industriais, como um aditivo para experimentações didáticas em cursos de engenharia. Dessa forma, sendo uma opção inicial prática e fácil de instalar e utilizar, com o foco de promover a aprendizagem dos conceitos e fundamentos do controle e automação nas instituições de formação técnica e de engenharia.

Além disso, é necessário explorar outros tipos de dispositivos diferentes para desenvolver nos alunos a habilidade de reconhecimento dos sistemas de automação, de forma que o conhecimento seja mais abrangente.

1.2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um emulador de processo de baixo custo com uma interface amigável;
- Simular o comportamento físico de uma planta de nível utilizando conhecimentos de fenômenos de transporte;

- Validar o emulador eletrônico através de testes com CLP implementando técnicas de controle e nível de um processo.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um dispositivo eletrônico portátil que emula um processo industrial. Este documento está organizado em quatro capítulos, sendo o primeiro a introdução do assunto. Posteriormente, no capítulo 2, é abordado o desenvolvimento do projeto na parte construtiva e também na programação. Além disso, também será detalhado os teste que serão efetuados, tal como teste de *hardware* e *software*. Desse forma, logo após, no capítulo 3 é apresentado os resultados do trabalho, assim como uma análise de erros. Por fim, no último capítulo, as considerações finais, a partir do trabalho realizado, são apontadas.

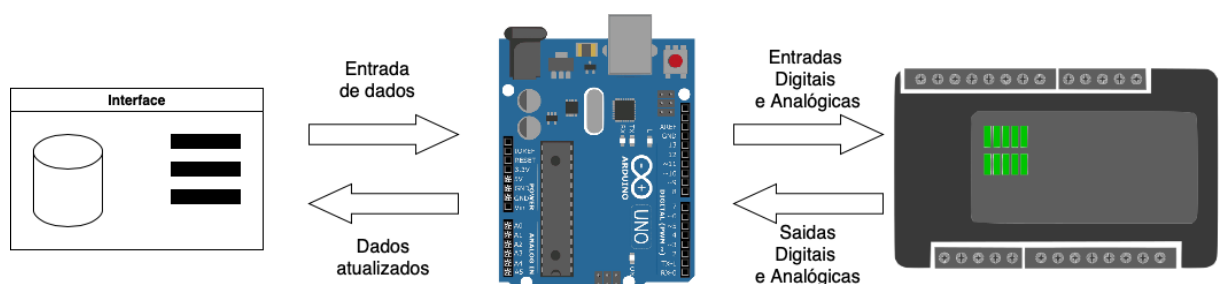
Desenvolvimento

O desenvolvimento do E3P, **E**mulador **P**ortátil de **P**lantas de **P**rocessos, foi dividido em quatro etapas: definição da placa de circuito impresso, desenvolvimento do código emulador do processo, elaboração da interface amigável e validação do protótipo.

2.1 Funcionalidade

O emulador conta com três partes: física, programação do processo e interface gráfica.

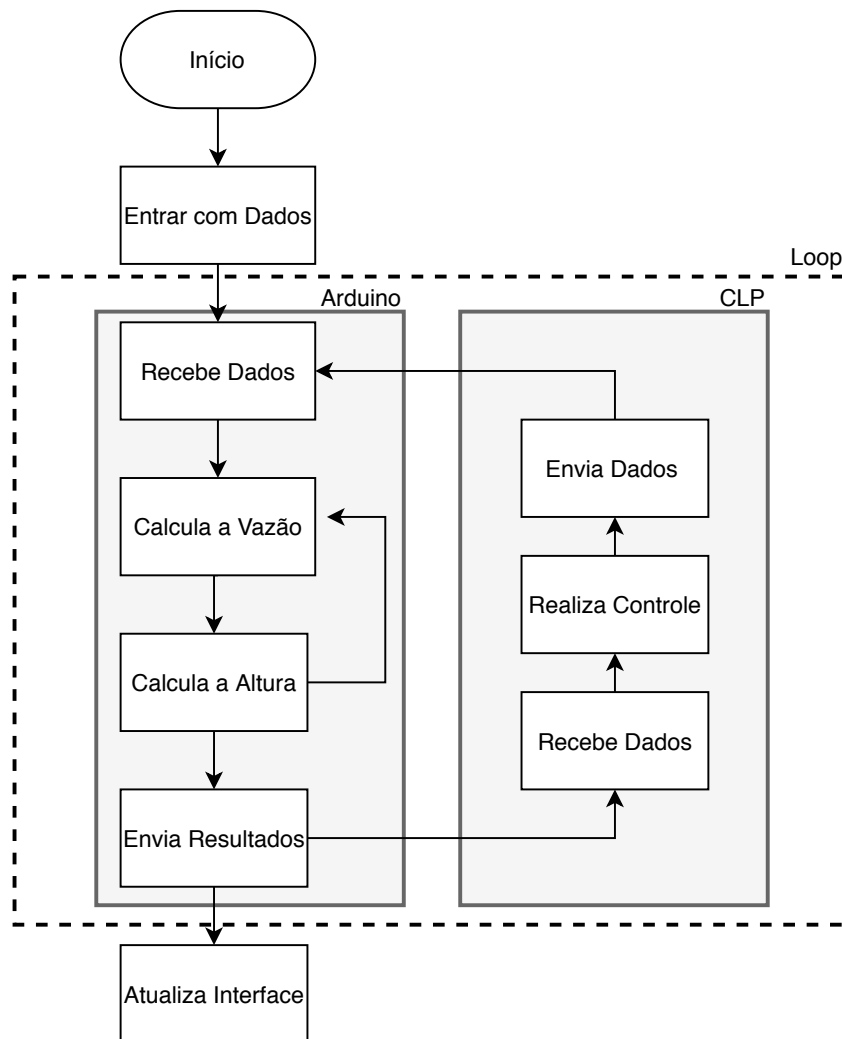
Figura 4 – Diagrama do E3P



Fonte: Próprio Autor

Em sua parte física, para realizar a emulação do sistema foi escolhido a plataforma eletrônica Arduino, por ser de fácil programação e fácil conexão com os outros elementos do E3P. No Arduino, ocorre todo o processo da planta, como podemos ver no fluxograma abaixo:

Figura 5 – Fluograma de Emulação



Fonte: Próprio Autor

O Arduino recebe os dados do usuário sobre as medidas dos elementos e então emula a planta, calculando a vazão de saída da bomba e a altura do fluido no tanque. Essa altura é representada por um sensor analógico, enquanto outros três sensores digitais indicam pontos específicos de nível. Com esses sinais, o CLP realiza o controle da planta, repassando as informações para o Arduino, que novamente refaz os cálculos e atualiza a interface gráfica. Dessa forma, o E3P é capacitado para interagir com qualquer CLP com o número necessário de entradas e saídas analógicas e digitais.

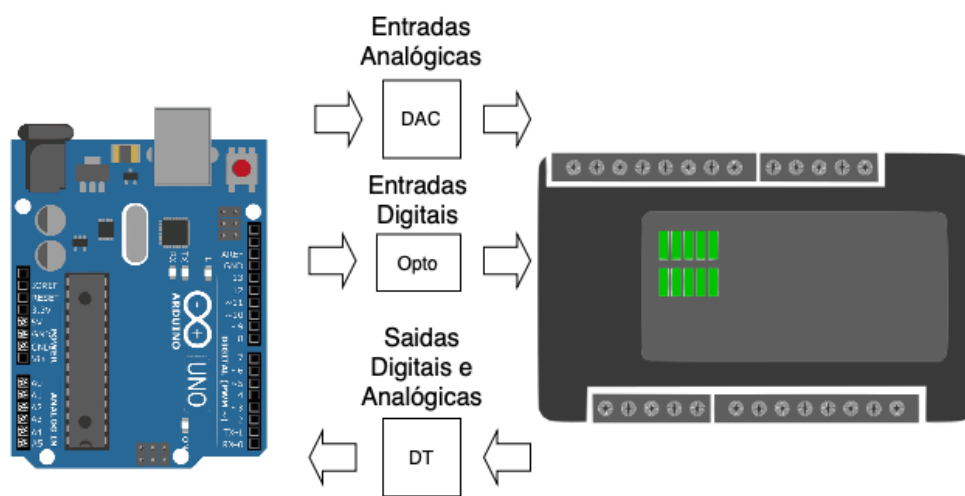
Também ocorre comunicação com o computador para a apresentação da interface gráfica. Para isso, foi escolhido o *software Processing*, pois é gratuito e de programação simples para o desenvolvimento de interfaces, utilizando a linguagem de programação *Java*. O mesmo tem comunicação facilitada com o Arduino, além de ser multiplataforma, suportando os sistemas Windows, MacOS e Linux. Na interface, haverá o envio de dados iniciais definidos pelo usuário e serão exibidas informações da planta do processo, assim como os dados de entrada e os resultados do controle.

Para o desenvolvimento do processo, foi escolhida a emulação de uma planta de nível, haja visto que consiste em um processo de relativa facilidade para validação, o que contribui para a popularização da aplicação do projeto aqui desenvolvido.

2.2 Condicionamento de Sinais

Na comunicação entre o Arduino e o CLP, foi necessário fazer algumas conversões de sinais para que ambos dispositivos pudessem trabalhar com o mesmo sinal.

Figura 6 – Diagrama do condicionamento de sinais do E3P



Fonte: Próprio Autor

Ao lidar com diferentes tipos de dispositivos num mesmo equipamento é necessário atentar-se com as limitações de cada um deles. Cada equipamento tem um limite de tensão diferente, portanto, realizando a conversão dos sinais, é possível garantir que todos eles façam a comunicação sem problemas. Por exemplo, o CLP recebe uma tensão de 24V em suas entradas digitais, enquanto o Arduino envia 5V em suas saídas digitais. É necessário que haja uma conversão de tensão de 5V até 24V para que o CLP receba adequadamente o sinal. Além disso, é necessário ter atenção a algumas situações indesejadas, tais como: erro de ligação, manuseio inadequado pelo usuário e presença de interferências eletromagnéticas no meio.

Para que todo o circuito de conversão de sinais seja devidamente acomodado, é necessário fazer as ligações através de uma *protoboard* ou uma Placa de Circuito Impresso (PCI). A *protoboard* é uma ótima opção para protótipos, considerando que é fácil a remoção e interligação dos Circuitos Integrados (CI). Porém, para um circuito definitivo, utilizar uma *protoboard* não é a escolha ideal, levando em conta a possibilidade de falhas em contatos e fácil desconexão acidental. Dessa forma, uma PCI é a opção mais adequada para o uso proposto.

2.2.1 Arduino → CLP

Na comunicação do Arduino com o CLP, tem-se entradas digitais e analógicas do CLP, essas representadas por sensores que foram emulados pelo Arduino, ou seja, não existem fisicamente no projeto.

Os sensores são responsáveis por detectar alterações e movimentações em diversos ambientes e aplicações. Eles garantem segurança, qualidade e confiabilidade no processo industrial (DJP, 2020). Para as entradas digitais do CLP, serão considerados sensores digitais, estes utilizados para emulações de chaves de nível tipo boia. Esse sensor é importante para identificar se o nível de um fluido dentro de um reservatório está abaixo ou acima de uma determinada posição. Exemplo de aplicação é que no instante que o sensor é sensibilizado, um atuador (motor ou válvula) é acionado. A Figura 7 é o exemplo de um sensor de nível tipo boia.

Figura 7 – Sensor de nível tipo boia

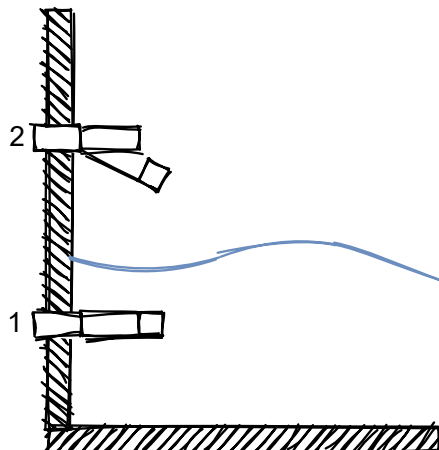


Fonte: OMEGA (201-)

Como nesse projeto os sensores serão emulados pelo Arduino, o sensor mostrado na Figura 7 não existe fisicamente no E3P.

A Figura 8 mostra dois sensores de nível tipo boia. O sensor 1 está com o contato fechado, indicando que o nível do fluido está na mesma altura ou acima do sensor. Já o sensor 2 está com contato aberto, indicando que o nível está abaixo da altura do sensor. O sensor 1 pode indicar que o nível está extremamente baixo, ou seja, ele ao ficar com contato aberto pode acionar um alarme para informar a situação.

Figura 8 – Atuação do sensor de nível tipo boia



Fonte: Próprio Autor

Já para o sensor analógico, será emulado um sensor ultrassônico, o qual é muito utilizado na indústria para a medição de distância, devido a sua característica de não necessitar de contato com o material a ser detectado. Pode ser utilizado para materiais granulados, em pó ou fluidos (SILVEIRA, 2020). Na figura 9 é mostrado um exemplo de sensor ultrassônico.

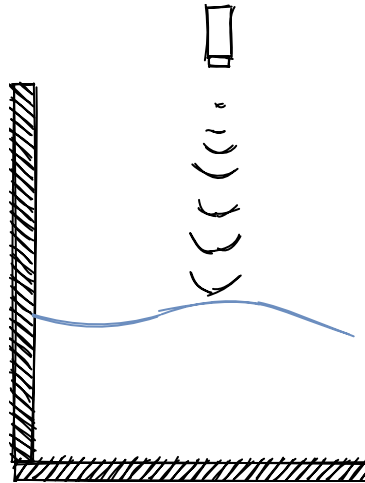
Figura 9 – Sensor ultrassônico industrial



Fonte: (BHS, 2020)

O sensor ultrassônico funciona a partir da emissão de uma onda sonora de alta frequência, que, por sua vez, ao atingir um objeto resulta em um eco que retorna ao sensor, produzindo um sinal elétrico (BALLUFF, 2018). A Figura 10 ilustra o funcionamento do sensor.

Figura 10 – Atuação do sensor ultrassônico industrial



Fonte: Próprio Autor

Assim como o sensor tipo boia, o sensor ultrassônico será emulado pelo Arduino, dessa forma, não existindo fisicamente no projeto.

Para adequar os sinais do Arduino para o CLP, é necessário elaborar alguns circuitos de condicionamento de sinais. Para as entradas digitais, teria a opção de utilizar um relé eletromecânico ou um optoacoplador.

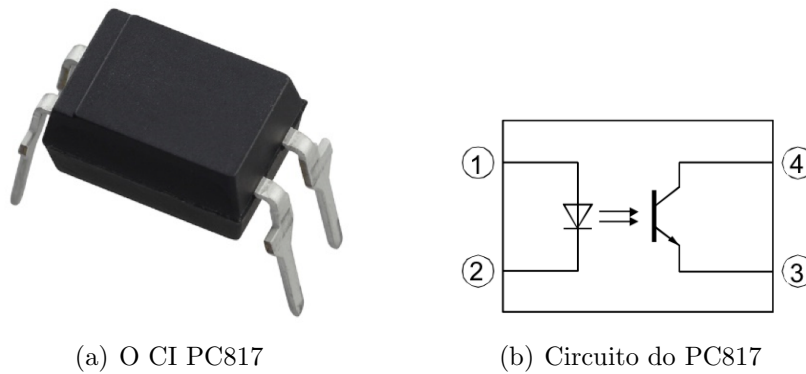
O relé eletromecânico é um comutador no qual uma corrente cria um campo magnético, fazendo com que ocorra a comutação com o contato, dessa forma, conduzindo o sinal (STROSKI, 2018). O optoacoplador é um CI no qual transmite sinais sem contato

direto por meio de um feixe de luz, ou seja, contém isolamento elétrico. Além de ter maior velocidade de comutação que um relé eletromecânico, também tem menor custo. São muito utilizados em circuitos mais sensíveis, como os que contém microcontroladores, o que torna ele ideal para esse projeto (SOARES, 2019a).

Portanto, foi utilizado um sistema com optoacopladores, contendo um para cada uma das seis entradas digitais.

A Figura 11 apresenta o CI escolhido, PC817, e seu circuito. De um dos lados dos terminais, temos um led infravermelho e, de outro, tem um fototransistor. Quando o LED é energizado ele emite uma luz que é percebida pela base do fototransistor, dessa forma, conduzindo do coletor(pino 4) para o emissor(pino 3)(SOARES, 2019b).

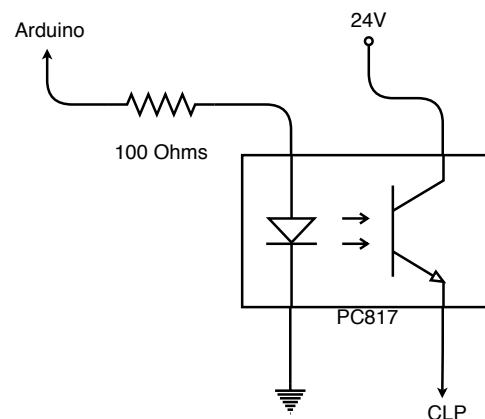
Figura 11 – Optoacoplador



Fonte: Corporation (2018)

O objetivo desse CI é isolar eletricamente o circuito entre o Arduino e o CLP, e realizar a conversão de sinais sem a necessidade de aumentar o valor da tensão, como podemos observar na Figura 12.

Figura 12 – Circuito da entrada digital para o CLP



Fonte: Próprio Autor

Já para as entradas analógicas, foi utilizado um Conversor Digital-Analógico (DAC) em cada uma das duas entradas. O DAC serve para que seja enviado do Arduino sinais digitais que serão transformados em sinais analógicos, para que o CLP possa receber esse sinal. O conversor escolhido foi o MCP4725 (Figura 13), esse utiliza interface I2C para comunicação entre ele e o Arduino através dos pinos SCL e SDA. O sinal Analógico se obtém através do pino OUT. A tensão de operação varia de 2.7V à 5.5V (MICROSHIP, 2009).

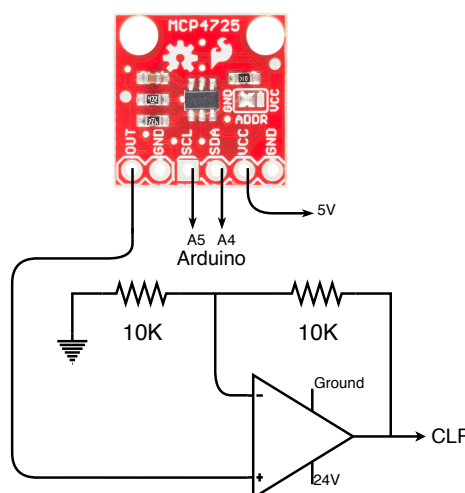
Figura 13 – Conversor MCP4725



Fonte: Próprio Autor

Considerando que a entrada analógica do CLP trabalha com 0-10V, e o DAC tem uma saída de 0-5V, é necessário fazer a amplificação desse sinal. Para isso, foi utilizado um Amplificador Operacional (AO) para alterações de valores de tensão osciladores, filtros e outros (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). A Figura 14 apresenta o circuito que foi utilizado.

Figura 14 – Circuito utilizado para conversão do sinal

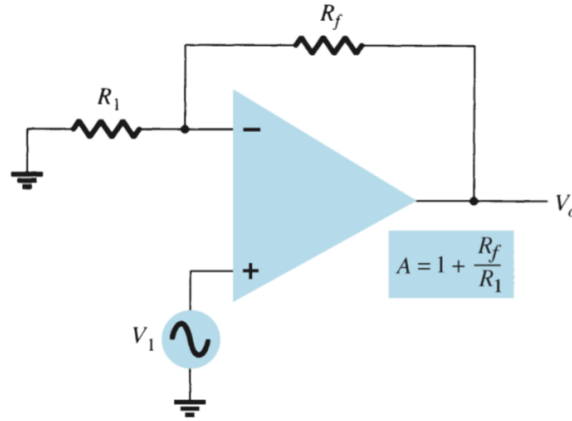


Fonte: Próprio Autor

O AO foi utilizado para implementar um amplificador não-inversor, conforme mostrado na Figura 15, com ganho definido pela seguinte equação:

$$G = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2.1)$$

Figura 15 – Amplificador operacional não-inversor



Fonte: Boylestad e Nashelsky (2013, p.542)

Dessa forma, o ganho do circuito é:

$$G = 1 + \frac{10k}{10k} = 2 \quad (2.2)$$

Portanto, considerando que a entrada V_i varia de 0~5V vindo do Arduino, temos que a saída do circuito da Figura 14 é:

$$V_{out} = G \cdot V_i \quad (2.3)$$

$$V_{out}(0) = 2 \cdot 0 = 0V \quad (2.4)$$

$$V_{out}(5) = 2 \cdot 5 = 10V \quad (2.5)$$

Logo, o sinal de saída do circuito varia entre 0~10V.

Há dois DAC no sistema, dessa forma, considerando a interface I2C, é necessário que cada DAC tenha seu próprio endereço. O endereço padrão é 0x60. Para alterá-lo em um dos DAC para 0x61, foi necessário soldar o pad central e V_{cc} da região ADDR do MCP4725. Dessa forma, é possível distinguir cada um deles através desse endereço. Para enviar um sinal para o pino OUT, o DAC trabalha com um intervalo de sinal de 0 a 4095, sendo equivalente a 0-5V. Considerando que o sinal do sensor ultrassônico será utilizado

para entrada analógica, foi, então, necessário converter o valor de altura do tanque para se adaptar ao intervalo de sinal do DAC.

$$h_{convertido} = \frac{h * 4095}{h_{max}} \quad (2.6)$$

O DAC irá ler o $h_{convertido}$ e irá transmitir o sinal equivalente a 0-5V.

2.2.2 CLP → Arduino

O CLP enviará para o Arduino alguns dados de controle, tal como a rotação da bomba e o sinal para alerta, que poderia ser usado tanto um alarme sonoro quanto visual. Nesse caso, foi usado um alarme visual.

A elaboração de uma planta didática real com todos os equipamentos necessários, tal como tanque, sensores, atuadores, entre outros, tem o custo muito elevado, como pode ser apontado na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de Materiais para uma Planta Didática Real

Equipamento	Quantidade	Valor	Total
Tanque Cilíndrico 300L	1	R\$690,00	R\$690,00
Sensor de nível tipo boia	3	R\$ 354,00	R\$1062,00
Sensor Ultrassônico Industrial	1	R\$1.508,47	R\$1.508,47
Tubulação 50mm 3m PVC	1	R\$47,90	R\$47,90
Joelho 90° 50mm	1	R\$5,04	R\$5,04
Válvula	1	R\$320,00	R\$320,00
			R\$3633,41

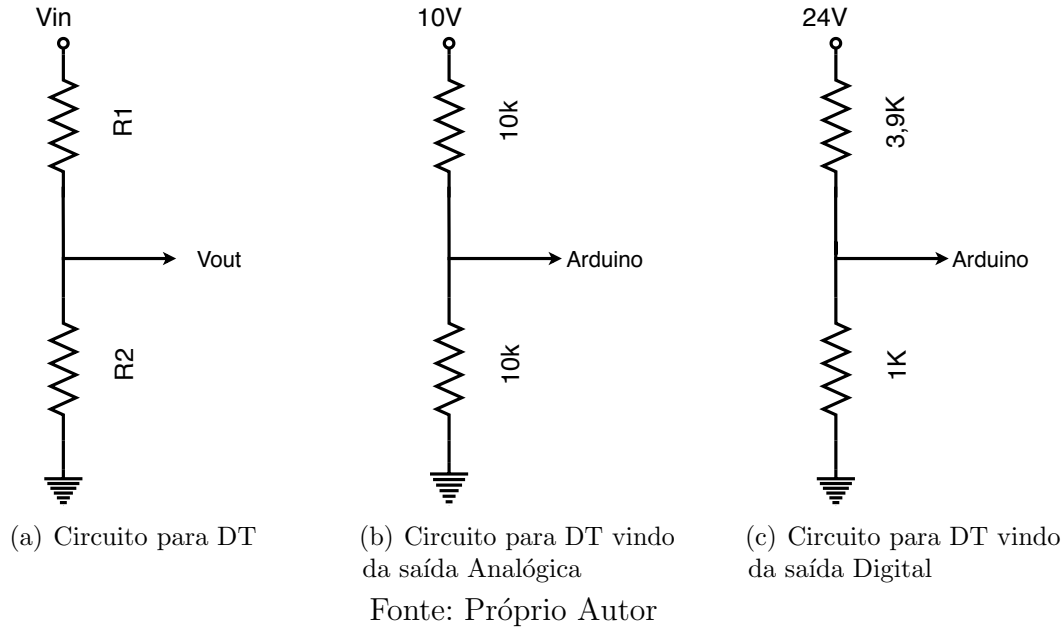
Além dos materiais da Tabela 1, é necessário considerar a bomba e a necessidade de um painel elétrico. Além disso, em uma planta real não é possível fazer alterações nos tamanhos do tanque e das tubulações. Por esse motivo, as emulações dos processos trazem diversas opções com o baixo custo.

Do CLP pro Arduino temos 6 saídas digitais e 2 analógicas. Em ambas foram utilizados Divisores de Tensão(DT), conforme a Figura 16(a).

Considerando que o Arduino recebe sinais de 0~5V nos seus terminais analógicos e a saída analógica do CLP envia de 0~10V, é necessário fazer um circuito DT para que regule esse sinal para 0~5V (Figura 16(b)).

Da mesma forma, o Arduino em seus terminais digitais recebe 5V, e a saída digital do CLP envia 24V. Portanto, o circuito DT, da Figura 16(c), é ideal para essa conversão.

Figura 16 – Circuitos divisores de tensão



Para dimensionar os resistores necessários para o circuito DT, considerando a Figura 16(a), se utiliza a fórmula:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.7)$$

Portanto para o circuito da Figura 16(b), temos:

$$V_{out}(0) = 10 \cdot \frac{10k}{10k + 10k} = 0V \quad (2.8)$$

$$V_{out}(10) = 10 \cdot \frac{10k}{10k + 10k} = 5V \quad (2.9)$$

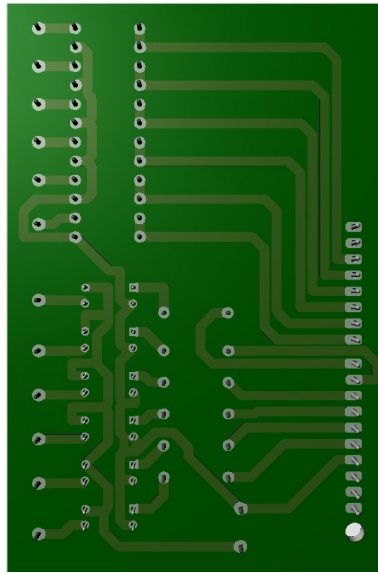
Já para o circuito da Figura 16(c), temos:

$$V_{out}(24) = 24 \cdot \frac{1k}{3,9k + 1k} \approx 4,9V \quad (2.10)$$

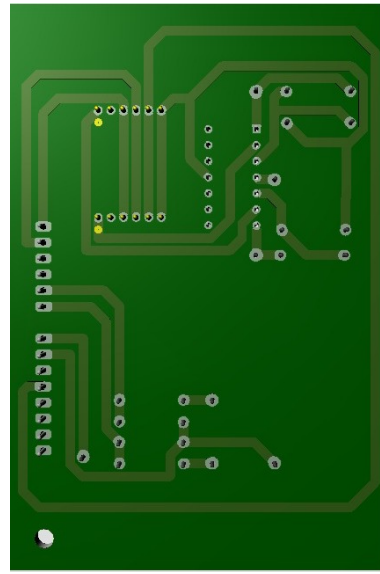
2.3 Placa de Circuito Impresso

Após o dimensionamento e especificação de todos os componentes da PCI, foi necessário elaborar o projeto da placa para definir a conexão e a disposição de todos os elementos do circuito. Nesse projeto, foram estrategicamente posicionados os componentes e traçadas as trilhas que iriam conectá-los. Na Figura 17, podemos ter uma visualização 3D de como ficou o projeto depois de pronto.

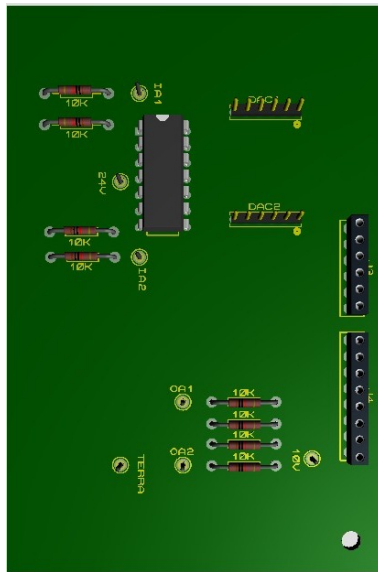
Figura 17 – Projeto 3D da PCI



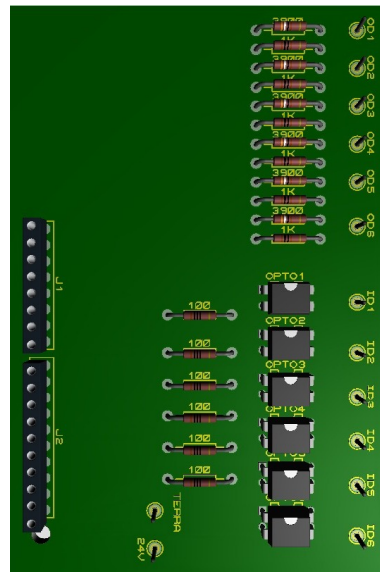
(a) Trilhas da PCI - I/O Digitais



(b) Trilhas da PCI - I/O Analógicas



(c) PCI com componentes - I/O Analógicas



(d) PCI com componentes - I/O Digitais

Fonte: Próprio Autor

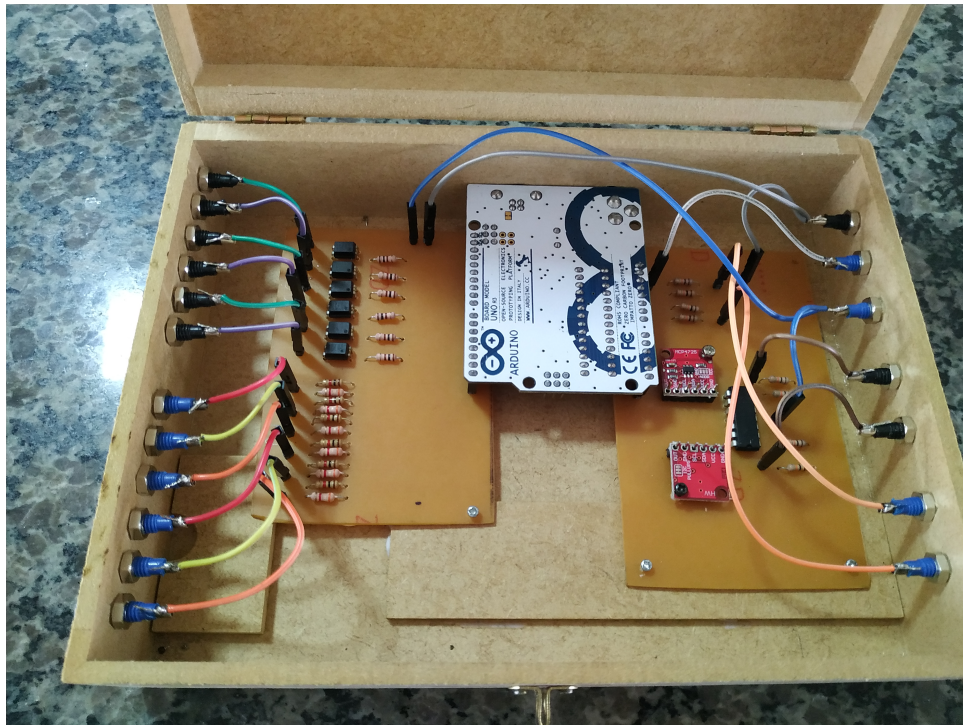
Na Tabela 2, é descrito os componentes eletrônicos e materiais utilizados na elaboração da PCI.

Tabela 2 – Lista de Materiais da PCI

Nome	Quantidade	Valor
Placa 60x90mm	2	R\$16,50
Arduino UNO	1	R\$59,90
Resistores 10k Ω	8	R\$1,2
Resistores 100 Ω	6	R\$0,9
Resistores 3,9k	6	R\$0,9
Resistores 1k	6	R\$0,64
Optoacoplador PC817	6	R\$4,80
DAC MCP4725	2	R\$37,80
Barra de Pinos 180 graus	2	R\$3,00
Borne Azul	10	R\$22,00
Borne Preto	9	R\$22,00
Caixa de madeira	1	R\$7,00
	Total	R\$176,64

Após a elaboração, a PCI foi posicionada em uma caixa, onde foi conectado os bornes para pino mini banana(Figuras 18 e 19).

Figura 18 – PCI do emulador



Fonte: Próprio Autor

Na figura 19(a), pode-se observar as entradas e saídas analógicas e também a alimentação do emulador, sendo: 24V, 10V e terra. Já na Figura 19(b), tem as entradas e saídas digitais. Por fim, na Figura 19(c), o acesso de comunicação do Arduino.

Figura 19 – Parte exterior do E3P



(a) I/O Analógica



(b) I/O Digital



(c) Comunicação do Arduino

Fonte: Próprio Autor

2.4 Descrição do Processo Emulado no Arduino

Conforme o estabelecido, no sistema de prototipagem rápida Arduino UNO ou Mega 2560, deve ocorrer toda a emulação computacional do comportamento da planta de nível.

Assim, a seguir, é apresentado a descrição da planta industrial emulada pelo sistema embarcado proposto.

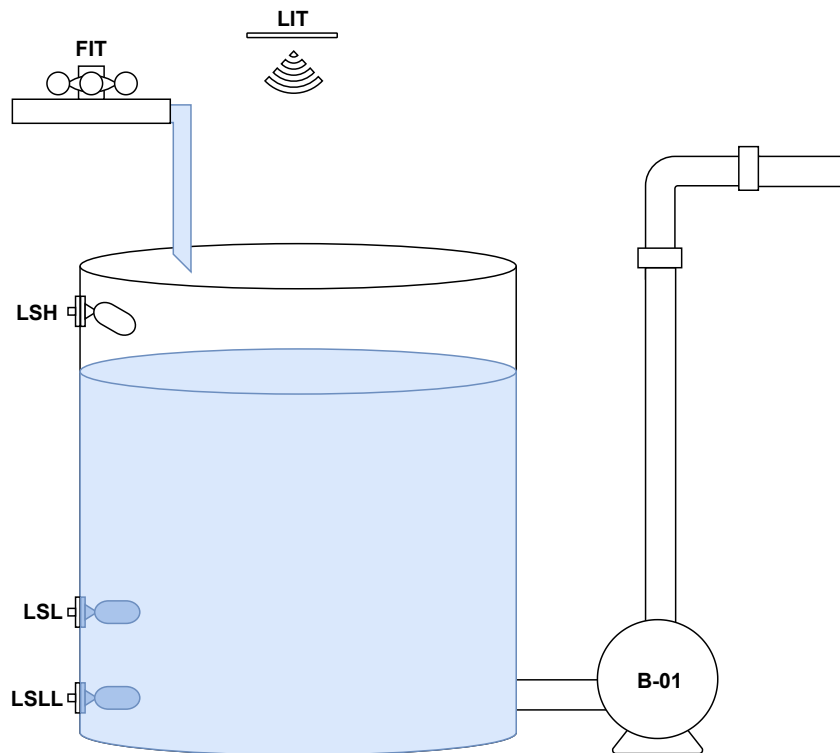
2.4.1 Planta de Nível Emulada

O processo escolhido para a emulação foi de uma planta de nível, típica em processos industriais de mineradoras, alimentícias e químicas. Nesse tipo de processo é comum requisitos funcionais como: impedimento da operação de bombas à vazio; perda de produtos pelo transbordamento do reservatório; precisão na dosagem de produtos através da bomba. Todas essas restrições podem ser garantidas por uma automação adequada que garanta a padronização e a qualidade do produto final, conserve o patrimônio da

empresa, maximize a produtividade, propicie segurança dos colaboradores, enfim, que agregue credibilidade da empresa na visão dos clientes.

A planta emulada possui um tanque cilíndrico de dimensões variáveis que serão inseridas pelo usuário, uma válvula de entrada de líquido, uma bomba para bombear o líquido para outro recipiente e, por fim, sensores para auxiliar no controle de nível.

Figura 20 – Planta de nível



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 20, considera-se:

- **FIT** - *Flow Indicator Transmitter* - Sensor de Vazão de Entrada do Processo
- **LIT** - *Level Indicator Transmitter* - Sensor Ultrassônico
- **LSH** - *Level Switch High* - Chave de Nível Alto
- **LSL** - *Level Switch Low* - Chave Nivel Baixo
- **LSLL** - *Level Switch Low Low* - Chave Nivel Muito Baixo
- **B-01** - Bomba

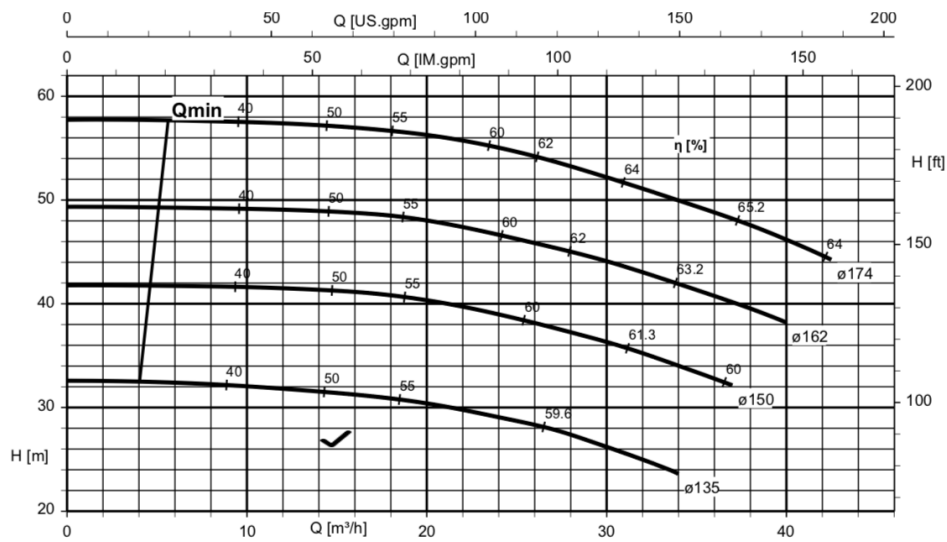
As cinco primeiras siglas na legenda foram adotadas com objetivo de atender a norma internacional de simbologia de instrumentos ISA S5.1, o que ajuda ao usuário do emulador a familiarizar com convenções amplamente adotadas nas indústrias.

2.4.1.1 A bomba

Para que o sistema represente de forma mais próxima ao real possível, é necessário escolher e inserir os parâmetros de uma bomba com propriedades reais. Para tal, foi escolhida a bomba MegaCPK da fabricante KSB[®], que é segura para o uso com fluidos agressivos, de baixo consumo energético e de tamanho reduzido em comparação com os modelos convencionais. Essa bomba pode ser utilizada também em indústria alimentícia, de bebidas, de papel, de borracha e também nas usinas siderúrgicas e de açúcar. (KSB, 2020).

A bomba escolhida trabalha com 60Hz e 3500rpm, designada por MCPK 050-032-160 CD, sendo 50mm de diâmetro de sucção, 32mm de diâmetro de recalque, 160mm diâmetro nominal do rotor. C se refere ao material do corpo ser de aço inoxidável e D material do rotor duplex.

Figura 21 – A curva da bomba



Fonte: KSB (2013)

Para obtenção do polinômio da curva, aplicou-se um procedimento de ajuste de curva, que resultou na obtenção de um polinômio de grau 3, caracterizado pela equação:

$$h(Q_{\omega=3500}) = -(3 \cdot 10^{-5})Q^3 - (75 \cdot 10^{-4})Q^2 + (61 \cdot 10^{-3})Q + 57.935 \quad (2.11)$$

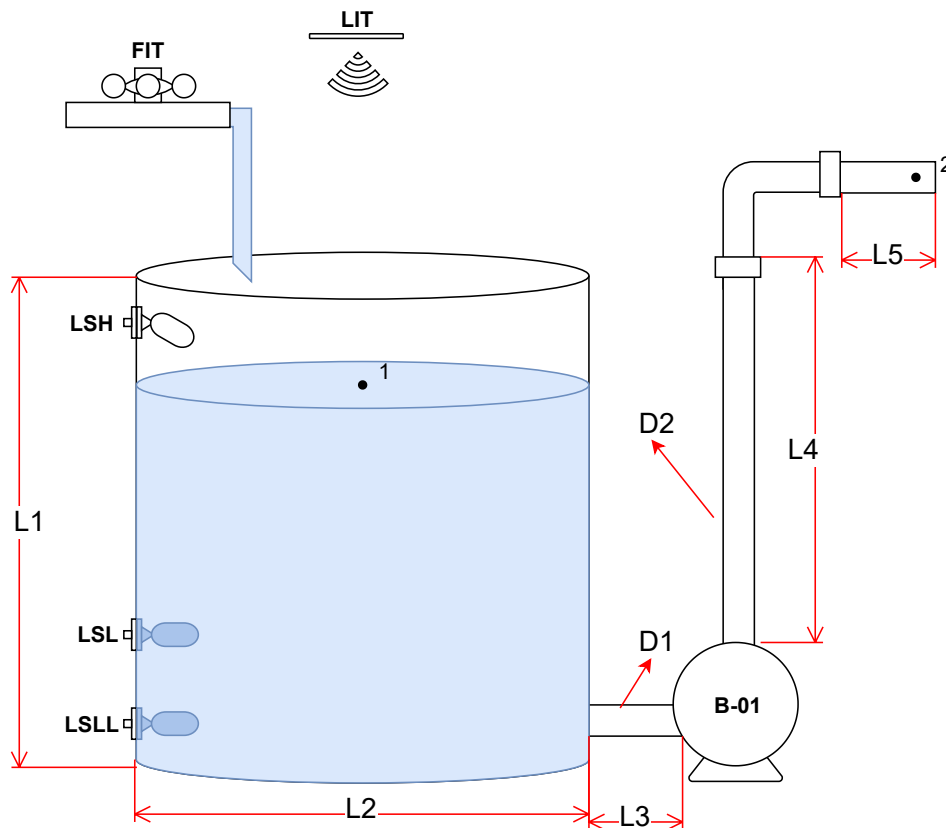
2.4.1.2 Sensores

Na planta emulada, foi considerado os três sensores do tipo bóia, LSL, LSH, posicionados ao longo do tanque e também há um LIT, um sensor ultrassônico posicionado acima do tanque para a medição do nível atual.

2.4.2 Fundamentos de Transporte dos Fluidos

O sistema físico da planta a ser emulada consiste em um processo de transferência de quantidade de movimento, portanto, o fluido emulado está sujeito a condições de operação que necessitam do embasamento teórico de Mecânica dos Fluidos em regime estático (ou não acelerado) (BRUNETTI, 2008). Assim, essa subseção dedica-se à fundamentação dos conceitos centrais pertinentes ao projeto. Para emular o comportamento da bomba, primeiramente será necessário dimensionar o sistema. Dessa forma, na Figura 22, temos as representações das medidas a serem utilizadas no dimensionamento.

Figura 22 – Planta de nível com cotas



Fonte: Próprio Autor

Considerando a análise de balanço de energia para os pontos 1 e 2 da Figura 22, partimos do princípio de conservação de energia:

$$E_{total} = E_c + E_p + E_{pr} \quad (2.12)$$

Sendo:

- E_{total} - Energia total no ponto analisado;
- E_c - Energia Cinética;
- E_p - Energia Potencial;
- E_{pr} - Energia de pressão.

A partir do princípio de conservação de energia, é possível obter a equação de Bernoulli. A partir dela, podemos aproximar o comportamento dos fluidos (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011). Dessa forma, substituindo os valores das energias:

$$E_{total} = \frac{mv^2}{2} + mgh + P \quad (2.13)$$

Sendo:

- m - Massa;
- v - Velocidade do fluido;
- h - Altura do ponto analisado;
- g - Gravidade;
- P - Pressão no ponto.

Se dividirmos por mg , considerando $mg=\gamma$ (peso específico), temos:

$$E_{total} = \frac{v^2}{2g} + h + \frac{P}{\gamma} \quad (2.14)$$

Portanto, o balanço de energia dos pontos se dá por:

$$E_{total1} = E_{total2} \quad (2.15)$$

Considerando o escoamento de um fluido incompressível, ou seja, o peso específico é o mesmo entre dois pontos do trecho das tubulações ($\gamma_1 = \gamma_2$). E substituindo a fórmula 2.14 em 2.15, temos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2} + h_2 \quad (2.16)$$

Além disso, pode-se igualar as pressões e considerar a carga manométrica e as perdas de carga na tubulação:

$$h_b + \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{g} + h_1 = \frac{1}{2} \frac{v_2^2}{g} + h_2 + h_f \quad (2.17)$$

- h_b - Carga Manométrica;
- h_f - Perda de carga na tubulação.

Se isolarmos h_b e considerarmos $v_1 = 0$, temos:

$$h_b = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_2 - h_1 + h_f \quad (2.18)$$

A partir da equação de continuidade de fluidos, temos:

$$Q_1 = Q_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.19)$$

A equação da continuidade relaciona a velocidade dos fluidos com a área disponível.

Temos que:

$$v_2 = \frac{Q_2}{A_2} \quad (2.20)$$

Sendo:

Q - Vazão na tubulação;

A - Área da tubulação.

Substituindo v_2 na equação 2.18:

$$h_b = \frac{Q^2}{2gA_r^2} + h_2 - h_1 + hf \quad (2.21)$$

Sendo:

A_r - Área da tubulação de recalque;

Segundo Fox, Pritchard e McDonald (2011), os fabricantes de bombas desenvolvem carcaças diferentes a partir de um projeto comum, isso leva a criação de regras de semelhança ou equações de similaridade. Com isso, ao obter a semelhança dinâmica, as características da bomba podem ser relacionadas por:

$$\frac{h_1}{w_1^2 D_1^2} = \frac{h_2}{w_2^2 D_2^2} \quad (2.22)$$

Esta equação pode ser usada para prever efeito de variação na velocidade, tamanho e diâmetro do rotor da bomba. Dessa forma, mantendo a mesma bomba, a semelhança geométrica é garantida e a cinemática será conservada se não houver cavitação, então, para esse caso, há variação de velocidade e o diâmetro do rotor fixo (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011). Portanto:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \quad (2.23)$$

Substituindo:

$$\frac{h_b}{h_{max}} = \left(\frac{\omega_b}{\omega_{max}} \right)^2 \quad (2.24)$$

Sendo:

- h_{max} - Carga manométrica máxima;
 w_b - Rotação da bomba;
 w_{max} - Rotação máxima da bomba.

Isolando h_b :

$$h_b = \left(\frac{\omega_b}{\omega_{max}} \right)^2 \cdot h(Q_{\omega_{max}}) \quad (2.25)$$

Igualando as equações 2.21 e 2.25:

$$\left(\frac{\omega_b}{\omega_{max}} \right)^2 \cdot h(Q_{\omega_{max}}) = \frac{Q^2}{2gA_r^2} + h_2 - h_1 + h_f \quad (2.26)$$

Para a perda de carga, será utilizada a equação de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.27)$$

- f - Fator de atrito;
 L - Comprimento da tubulação;
 D - Diâmetro da tubulação;
 v - Velocidade do fluido.

Para melhor compreensão, será considerado que:

$$k = \frac{f(L + L_{eq})}{D2g} \quad (2.28)$$

Sendo L_{eq} a variável correspondente ao comprimento equivalente de peças especiais. Nesse sistema terá apenas uma peça especial na região de recalque, sendo ela uma curva 90° de raio longo para tubulação de aço galvanizado.

Para o cálculo de f , será utilizada a equação de Swamee & Jain, apresentado por Porto (2006), por se adaptar a vários tipo de escoamento. Portanto:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2.29)$$

Sendo:

- Re - Reynolds;
 ε - Rugosidade absoluta do material.

Para calcular o Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.30)$$

Sendo:

ρ - Massa específica do fluido;

μ - Coeficiente de viscosidade.

Então, substituindo v e a equação 2.28 na equação 2.27:

$$h_f = \frac{k_r Q^2}{A_r^2} + \frac{k_s Q^2}{A_s^2} \quad (2.31)$$

Substituindo h_f na equação 2.26:

$$\left(\frac{\omega_b}{\omega_{max}}\right)^2 \cdot h(Q_{\omega_{max}}) = \frac{Q^2}{2gA_r^2} + h_2 - h_1 + \frac{k_s Q^2}{A_s^2} + \frac{k_r Q^2}{A_r^2} \quad (2.32)$$

Através dessa equação, será possível ter o valor da rotação atual da bomba.

Como foi realizado no capítulo 2.4.1.1, temos a curva da bomba como:

$$h(Q_{\omega_{max}}) = -(3 \cdot 10^{-5})Q^3 - (75 \cdot 10^{-4})Q^2 + (61 \cdot 10^{-3})Q + 57.935 \quad (2.33)$$

Além disso, o comportamento do nível do tanque se dá pela variação do nível no tempo igual a variação de vazão de entrada e vazão de saída sobre a área do tanque. Como podemos ver:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{Q_e - Q}{A} \quad (2.34)$$

Sendo:

A - Área do tanque;

h - Altura do líquido no tanque;

Q - Vazão de saída;

Q_e - Vazão de entrada.

Dessa forma, será possível obter o valor do nível atual do tanque, simulando assim, o sensor ultrassônico.

2.4.3 Métodos Numéricos

Considerando a equação 2.32 para encontrar o real valor da vazão, é necessário realizar um método numérico para encontrar as raízes dessa equação. Há vários métodos numéricos, sendo o de Newton Raphson muito popular, utilizando a função:

$$i_{k+1} = i_k - \frac{f(i_k)}{f'(i_k)} \quad (2.35)$$

Este método necessita de um valor inicial para iniciar a compilação. No caso desse projeto, i seria o Q . Para isolar e derivar o Q da equação 2.32, demandaria um custo computacional muito alto, o que poderia causar lentidão no processo de cálculo, travamento no programa ou até perda de dados. Portanto, foi escolhido o método da secante, pois, além de não ter que usar a derivada da função, é um método mais simples e de rápida resposta. Pode ser calculado a partir da equação:

$$X_{k+1} = \frac{x_{k-1}f(x_k) - x_kf(x_{k-1})}{f(x_k) - f(x_{k-1})} \quad (2.36)$$

Portanto, é necessário dois valores iniciais para aplicação do método da secante.

Algoritmo 1 Método da secante para encontrar raízes de Q

Dados: Q_0, Q_1

Resultado: Valor de Q atual

```

1 enquanto  $f(Q) < 10^{-3}$  faça
2    $Q = \frac{Q_0f(Q_1) - Q_1f(Q_0)}{f(Q_1) - f(Q_0)}$ 
3    $Q_0 = Q_1$ 
4    $Q_1 = Q$ 
5 fim
```

Assim que ocorre a convergência no método acima, é obtido o valor de Q . Nesse momento, este valor é utilizado na fórmula 2.34 para definir o valor atual de h_1 que é o nível atual do tanque.

Para encontrar o valor de h da fórmula 2.34 foi integrada a equação.

$$h(t - t_{ant}) = \frac{Q_e - Q}{A}(t - t_{ant}) \quad (2.37)$$

Sendo:

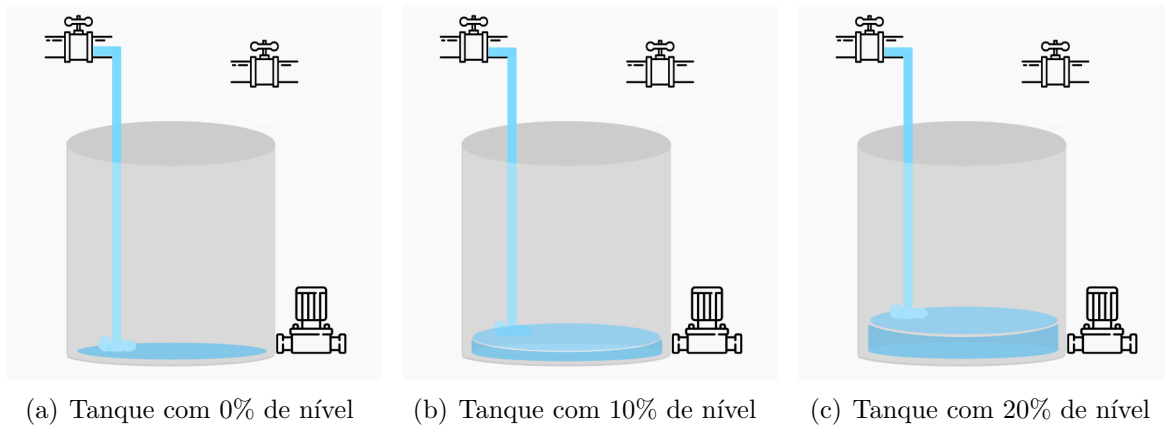
t - Tempo atual;
 t_{ant} - Tempo anterior.

2.5 Interface gráfica

2.5.1 Versão 1.0

A ideia inicial do trabalho era elaborar desenhos digitais da planta e implementá-los na interface utilizando o *software Processing* (apresentado no sub-capítulo 2.1), de modo que criasse uma animação conforme o nível do tanque fosse alterando. As primeiras imagens elaboradas podem ser vistas na Figura 23.

Figura 23 – Desenhos do tanque



Fonte: Próprio Autor

A primeira versão da interface pode ser vista na Figura 24:

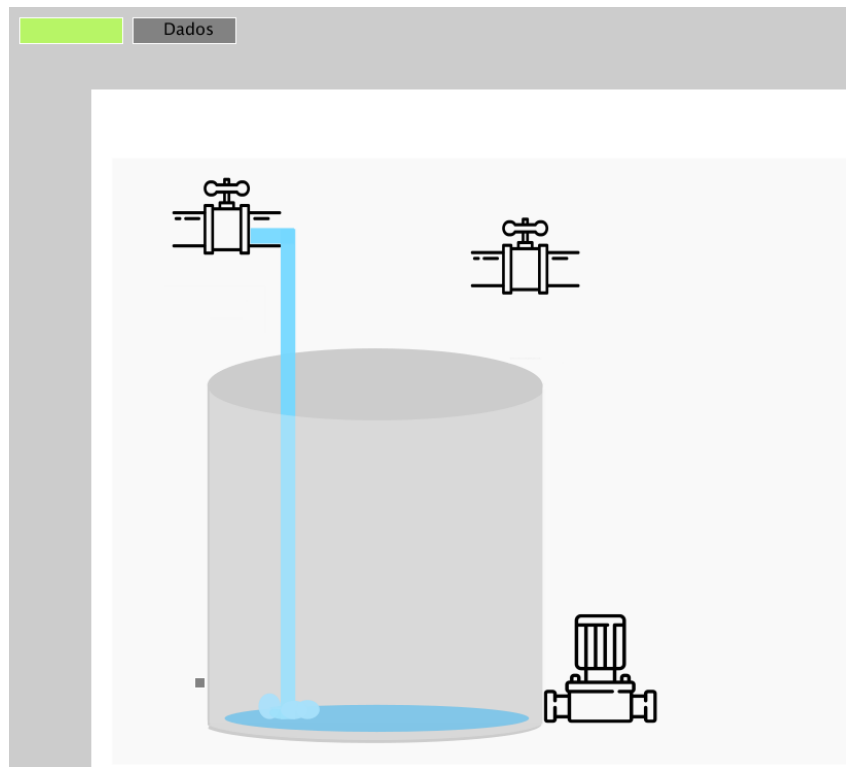
Figura 24 – Interface de interação com o usuário v1.0



Fonte: Próprio Autor

No botão Início teria a interface de visualização dos dados, como os dados atuais da planta, assim como a animação do tanque. Na Figura 25 é possível ver uma prévia.

Figura 25 – Interface de interação com o usuário - Início



Fonte: Próprio Autor

No botão Dados seria a janela de interação com o usuário, no qual este poderia entrar com os dados da planta.

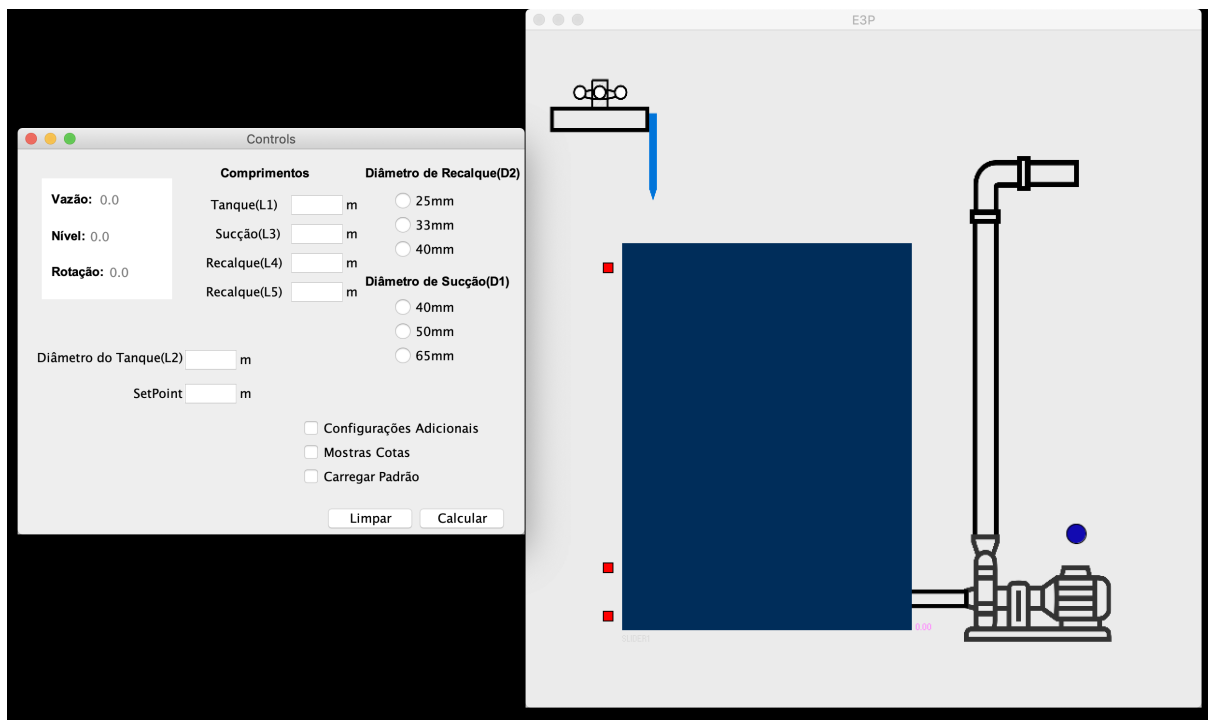
No decorrer do desenvolvimento, foi percebido que a troca de imagens para representar alterações de nível em intervalos de 10% era atrasada em relação à capacidade de processamento de respostas do *Processing*. Esse fato resultava em uma exibição que não correspondiam aos dados atuais, mas a uma versão ultrapassada dos mesmos.

2.5.2 Versão 2.0

Diante dos problemas apresentados no subcapítulo anterior, foram realizados diversas pesquisas e testes no *software* de interface utilizado, para chegar num versão melhorada da interface.

Devido ao *Processing* ser baseado na linguagem de programação *Java*, ele suporta o uso do *Swing*, um pacote de *widget* para uso na GUI (Interface Gráfica de Usuário). Como os componentes do pacote *Swing* só poderiam ser usados em uma janela separada do *processing*, foi decidido que as entradas de dados seriam nessa janela, e na janela do *processing* apresentado o desenho e animação do processo da planta. Na Figura 26 podemos observar ambas as janelas.

Figura 26 – Interface de interação com o usuário v2.0



Fonte: Próprio Autor

Na primeira janela, temos a entrada de dados, apresentado pela Figura 27.

Figura 27 – Janela para entrada de dados

The image shows a 'Controls' window for data entry. It contains the following fields and options:

- Vazão:** 0.0
- Nível:** 0.0
- Rotação:** 0.0
- Comprimentos:**
 - Tanque(L1): [] m
 - Sucção(L3): [] m
 - Recalque(L4): [] m
 - Recalque(L5): [] m
- Diâmetro de Recalque(D2):**
 - ☐ 25mm
 - ☐ 33mm
 - ☐ 40mm
- Diâmetro de Sucção(D1):**
 - ☐ 40mm
 - ☐ 50mm
 - ☐ 65mm
- Diâmetro do Tanque(L2):** [] m
- SetPoint:** [] m
- Buttons: ☐ Configurações Adicionais, ☐ Mostras Cotas, ☐ Carregar Padrão,

Fonte: Próprio Autor

Para a criação do design dessa interface, foi utilizado o *software* gratuito GuiGenie, usado para construção de interfaces GUI para *Java*. Ele apresenta uma interface intuitiva, de forma que seja rápido e fácil o desenvolvimento com o pacote *Java Swing*.

Na interface, existem campos para entrada de dados de comprimentos e diâmetros, tanto do tanque quanto das tubulações, e *setpoint* de controle. Para a escolha dos diâmetros de sucção e recalque, há três opções para cada: para diâmetro de sucção temos 40mm, 50mm e 65mm; enquanto para diâmetro de recalque são 25mm, 33mm e 40mm. Esses valores são mais restritivos que os demais parâmetros devido aos limites naturais de diâmetros da bomba.

Além disso, possui três *checkbox*, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Interface de interação com o usuário - Configurações adicionais

Controls

Vazão: 0.0
Nível: 0.0
Rotação: 0.0

Comprimentos

Tanque(L1) m
Sucção(L3) m
Recalque(L4) m
Recalque(L5) m

Diâmetro de Recalq...

☐ 25mm
☐ 33mm
☐ 40mm

Diâmetro de Sucç...

☐ 40mm
☐ 50mm
☐ 65mm

Diâmetro do Tanque(L2) m

SetPoint m

Nível Inicial m

Vazão Válvula m³/h

☒ Configurações Adicionais
☐ Mostras Cotas
☐ Carregar Padrão

Limpar Calcular

Fonte: Próprio Autor

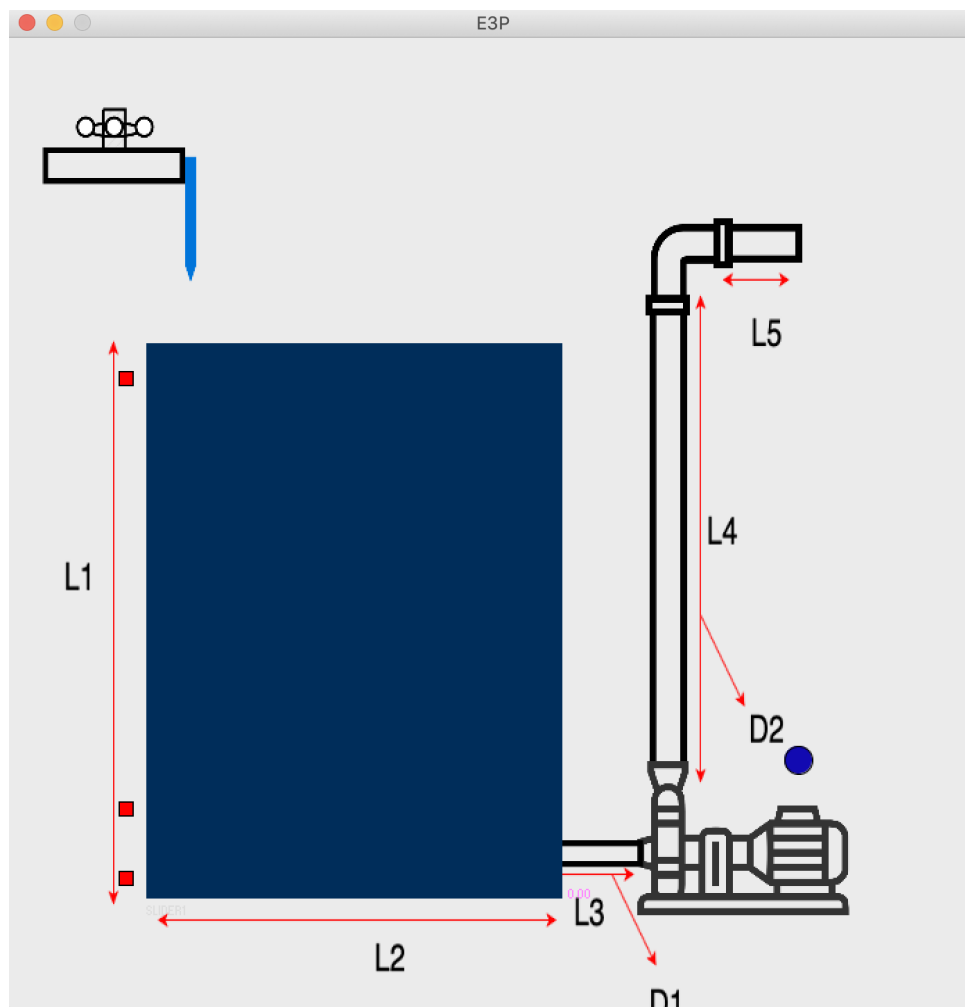
- 1º Configurações Adicionais

Aqui são adicionados dois campos a mais do que o padrão: Nível Inicial e Vazão Válvula, como pode ser observado na Figura 28. É uma configuração indicada para os usuários que querem se aprofundar mais no processo da planta sem muitas limitações. Quando a seleção dessa *checkbox* é removida, os campos abordados anteriormente desaparecem e é designado um valor padrão para os cálculos.

- 2º Mostrar Cotas

Já quando essa *checkbox* é marcada, é mostrado na janela do *Processing* a representação gráfica no desenho das características estruturais da planta, isso facilitará a identificar quais campos serão preenchidos para determinados valores. Na Figura 29, é possível observar as cotas na planta.

Figura 29 – Interface de gráfica da planta com cotas



Fonte: Próprio Autor

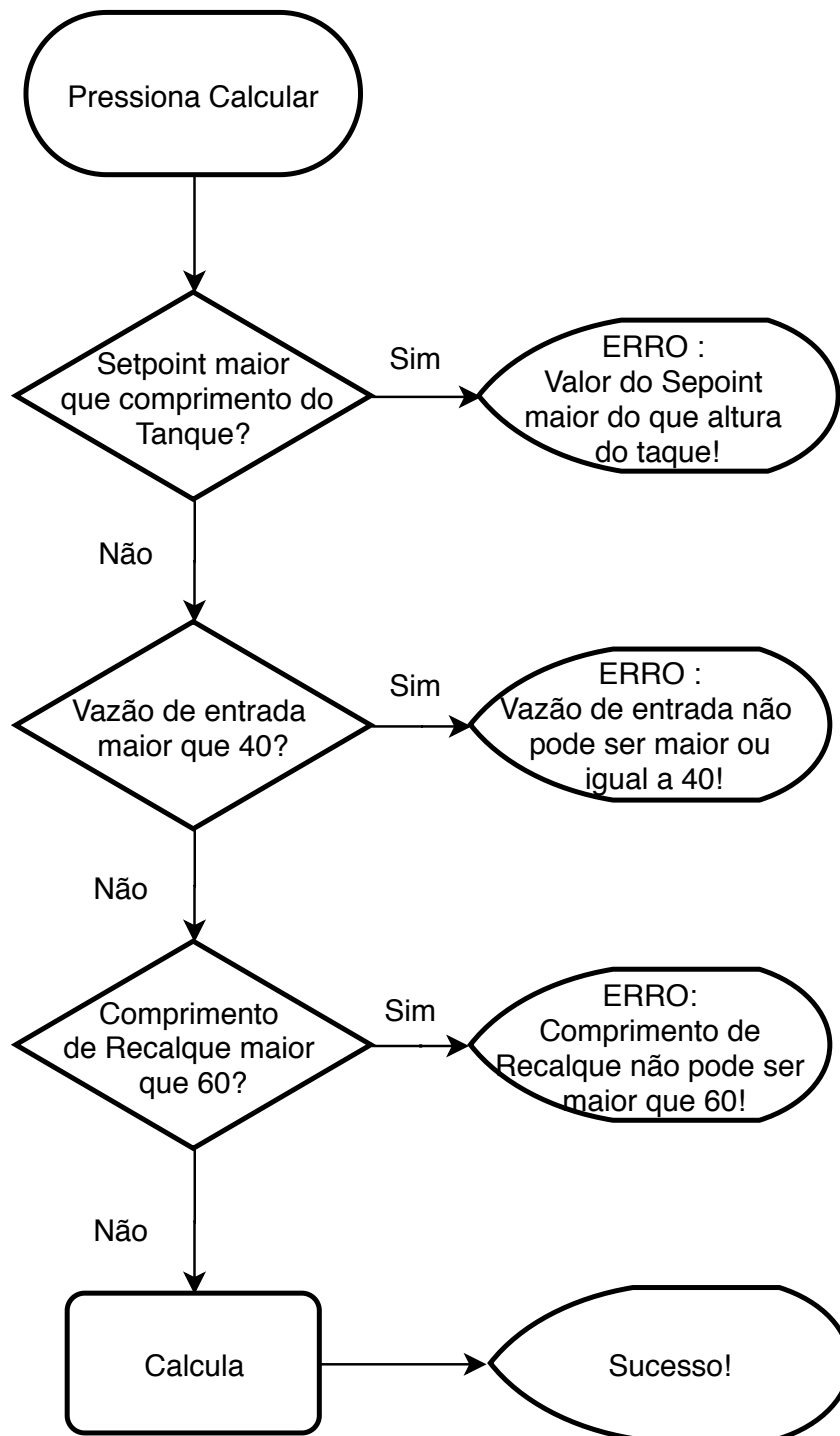
- 3º Carregar Padrão

Ao selecionar essa *checkbox*, é carregado em todos os campos um valor padrão.

O botão limpar remove todos os dados presentes em qualquer campo. Já quando o botão Calcular é pressionado, o programa verifica se há algum erro nos dados inseridos, se caso não houver, então estes dados são enviados para o Arduino.

O programa faz tratamento de dados para valores incoerentes, ou seja, que não fazem sentido com o sistema. Na Figura 30 é possível observar o fluxograma do algoritmo de erros e na Figura 31 como o erro aparece na janela de interface.

Figura 30 – Fluxograma do algoritmo de erros



Fonte: Próprio Autor

Figura 31 – Interface de entrada de dados com mensagem de erro

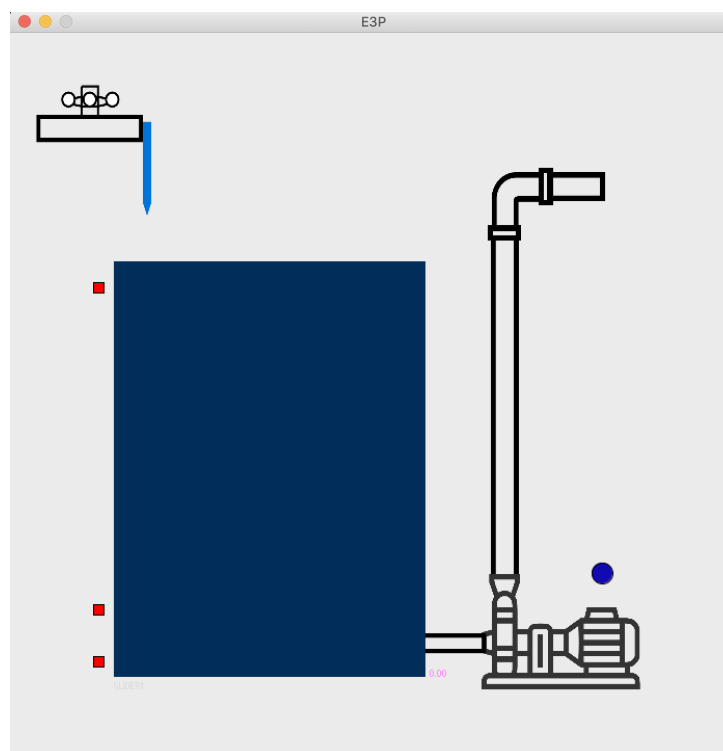
The 'Controls' window contains the following elements:

- Status Box (Left):** Displays 'Vazão: 0.0', 'Nível: 0.0', and 'Rotação: 0.0'.
- Comprimentos (Dimensions):**
 - Tanque(L1): 1.0 m
 - Sucção(L3): 0.2 m
 - Recalque(L4): 1.4 m
 - Recalque(L5): 0.5 m
- Diâmetro de Recalque(D2):** Radio buttons for 25mm (selected), 33mm, and 40mm.
- Diâmetro de Sucção(D1):** Radio buttons for 40mm (selected), 50mm, and 65mm.
- Other Inputs:**
 - Diâmetro do Tanque(L2): 0.5 m
 - SetPoint: 1.2 m
- Checkboxes:**
 - ☐ Configurações Adicionais
 - ☐ Mostras Cotas
 - ☒ Carregar Padrão
- Error Message:** 'ERRO : Valor do Sepoint maior do que taque!' (Note: 'Sepoint' is likely a typo for 'SetPoint' and 'taque' for 'tubo').
- Buttons:** 'Limpar' and 'Calcular'.

Fonte: Próprio Autor

No retângulo branco na Figura 31 é possível observar os valores atuais de vazão, nível e rotação. Estes valores vieram do Arduino após realizar todos cálculos da planta.

Figura 32 – Interface gráfica da planta



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 32 é apresentada a segunda janela, no qual mostra o *design* do processo da planta. Quando o controle do processo está em andamento, há uma animação no tanque para mostrar o comportamento que está sendo realizado. Além disso, existem três quadrados laterais que indicam os sensores de nível. Quando o líquido atinge este nível, o sensor assume a cor verde, indicando que a chave de nível está com contato fechado. Há também um círculo azul, representando uma lâmpada, que, por sua vez, está configurada para acender quando o nível do tanque estiver acima de 15%.

Validação do Emulador

Para a validação do emulador seria ideal a realização dos testes de forma completa, sendo para isso necessário a utilização de um CLP para testar todo o funcionamento. Entretanto, devido a pandemia do SARS-CoV-2, o acesso de alunos no Campus foi suspenso, e todas as atividades passaram a ser remotas, dessa forma não seria possível realizar os testes no CLP. Para contornar esta situação houve a mobilização da coordenação do curso a fim de viabilizar, perante a instituição, o empréstimo de alguns equipamentos de laboratório para auxiliar nos testes, feitos em casa.

Para verificar o bom funcionamento do E3P, é necessário realizar os testes de *software* e *hardware*, de maneira que minimize os erros, além de proporcionar uma experiência mais tranquila, dinâmica e simples para o usuário. Foram convidados alguns avaliadores para analisar a interface gráfica e os aspectos técnicos. Os testes realizados serão especificados a seguir.

3.1 Teste de *Software*

Na verificação de funcionamento do *software* foram realizados os seguintes passos:

3.1.1 Parâmetros

Primeiramente, foram definidos os parâmetros da planta, apresentados na Figura 33:

Figura 33 – Interface com parâmetros pré-definidos

The screenshot shows a software interface titled "Controls". On the left, a white box displays three status values: "Vazão: 0.0", "Nível: 0.0", and "Rotação: 0.0". Below this, several input fields are arranged in two columns. The left column includes "Diâmetro do Tanque(L2)" (0.5 m), "SetPoint" (0.20 m), "Nível Inicial" (0.1 m), "Vazão Válvula" (10 m³/h), and a "Sucesso!" label. The right column, under the heading "Comprimentos", lists "Tanque(L1)" (1.0 m), "Sucção(L3)" (0.2 m), "Recalque(L4)" (1.4 m), and "Recalque(L5)" (0.5 m). To the right of these, under "Diâmetro de Recalq...", are three radio buttons for 25mm (selected), 33mm, and 40mm. Below that, under "Diâmetro de Sucç...", are three radio buttons for 40mm (selected), 50mm, and 65mm. At the bottom right, there are three checkboxes: "Configurações Adicionais" (checked), "Mostras Cotas" (unchecked), and "Carregar Padrão" (checked). Two buttons, "Limpar" and "Calcular", are at the bottom right.

Fonte: Próprio Autor

Foram escolhidos valores proporcionais em relação à imagem apresentada pela planta do processo. Portanto, se definido como 1m de altura do tanque, os outros comprimentos foram definidos aproximadamente proporcionais.

3.1.2 Teste de Controle

Considerando a inviabilidade de testes no CLP, o controle da planta de processo foi implementado no Arduino. O controle escolhido foi PID (Proporcional Integral Derivativo) de forma que o nível chegue em seu *setpoint* com o menor tempo, com baixa oscilação e de forma eficaz.

Para definir o valor do PID, foi utilizado um método básico: definir um valor baixo para o proporcional e zerar o integral e derivativo, a partir disso, são ajustados os valores conforme a necessidade.

3.1.3 Teste de Usabilidade

No teste de usabilidade foi obtido informações a partir do uso do *software* pelos convidados para testar. Foi observado as ações do usuário ao usar o programa e também coletado o *feedback*.

O *feedback* final foi separado em visual e técnico, sendo o visual em relação a aparência da interface, e técnico a funcionalidade. A tabela a seguir apresenta os relatos dos avaliadores.

Tabela 3 – *Feedback* dos avaliadores

Avaliador	Tipo	<i>Feedback</i>	Sugestão	<i>Status</i>
Avaliador 1	Visual	Muitas Informações a serem incrementadas	Diminuir dados ou modificar localização	Não implementado
Avaliador 2	Visual	As janelas separadas torna o uso mais dinâmico	Nenhuma	-
Avaliador 2	Visual	Interface de animação simples e intuitiva	Nenhuma	-
Avaliador 3	Técnico	Os botões de seleção dos diâmetro não são dependentes	Alterar de forma que fiquem dependentes	Implementado
Avaliador 3	Técnico	Sem tratamento para espaços em branco	Fazer o tratamento	Implementado
Avaliador 3	Técnico	Tempo muito elevado de simulação para grandes tamanhos de tanque	Acelerar o tempo de simulação	Não implementado

Fonte: Próprio Autor

O avaliador 1 sugeriu que diminuísse a quantidade de dados a serem preenchidos ou que alterasse a localização dos dados de forma que não ficasse tão carregado. Essa sugestão não foi implementada, pois todos os dados são importantes para o processo de emulação. Quanto a alteração da localização dos dados também não é viável, devido ao tamanho da janela.

O avaliador 2 gostou das janelas serem separadas, contendo uma para interface de animação e uma para configuração. Alegou que ao manter as duas janelas visíveis na tela, permite que o uso da interface seja mais dinâmico e não ocorra confusão ao ficar trocando de janela.

O avaliador 3 percebeu que ao colocar valores altos para o tanque, o tempo de simulação aumenta muito, podendo a ficar algum um problema de execução.

A janela de interface gráfica da planta (Figura 32), todos os testadores consideraram simples e funcional.

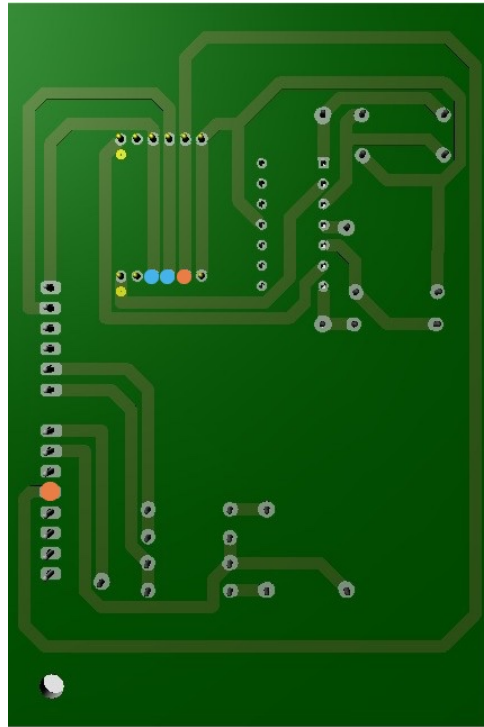
3.2 Teste de *Hardware*

Já para a verificação de funcionamento do *hardware* foram realizados os testes:

3.2.1 Continuidade

O primeiro teste foi verificar a continuidade das trilhas da PCI (Figura 34) a partir de um multímetro, de forma a identificar possíveis mal contato e erros de ligação.

Figura 34 – Trilhas da PCI



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 34, há pontos laranjas e azuis. Os pontos laranjas representam uma mesma trilha, os pontos azuis representa trilhas diferentes. Com a ponta do multímetro é verificada a continuidade entre os pontos laranjas, e também é verificado se não há continuidade nos pontos azuis. Todo esse processo foi realizado por todas as trilhas da PCI.

3.2.2 Entradas Digitais

Sensores tipo boia são emulados pelo E3P para a entrada digital do CLP, conforme abordado no subcapítulo 2.4.1.2. Para realização do teste foram definidos pinos fixos para cada sensor. Através da simulação no *Processing* é possível visualizar quando o sensor deve estar ativo, dessa forma, foi medida a tensão dos pinos de cada sensor.

Figura 35 – Multímetros mostrando a tensão das entradas digitais



(a) Tanque acima de 5% e abaixo de 15% de nível



(b) Tanque acima de 15% e abaixo de 95% de nível

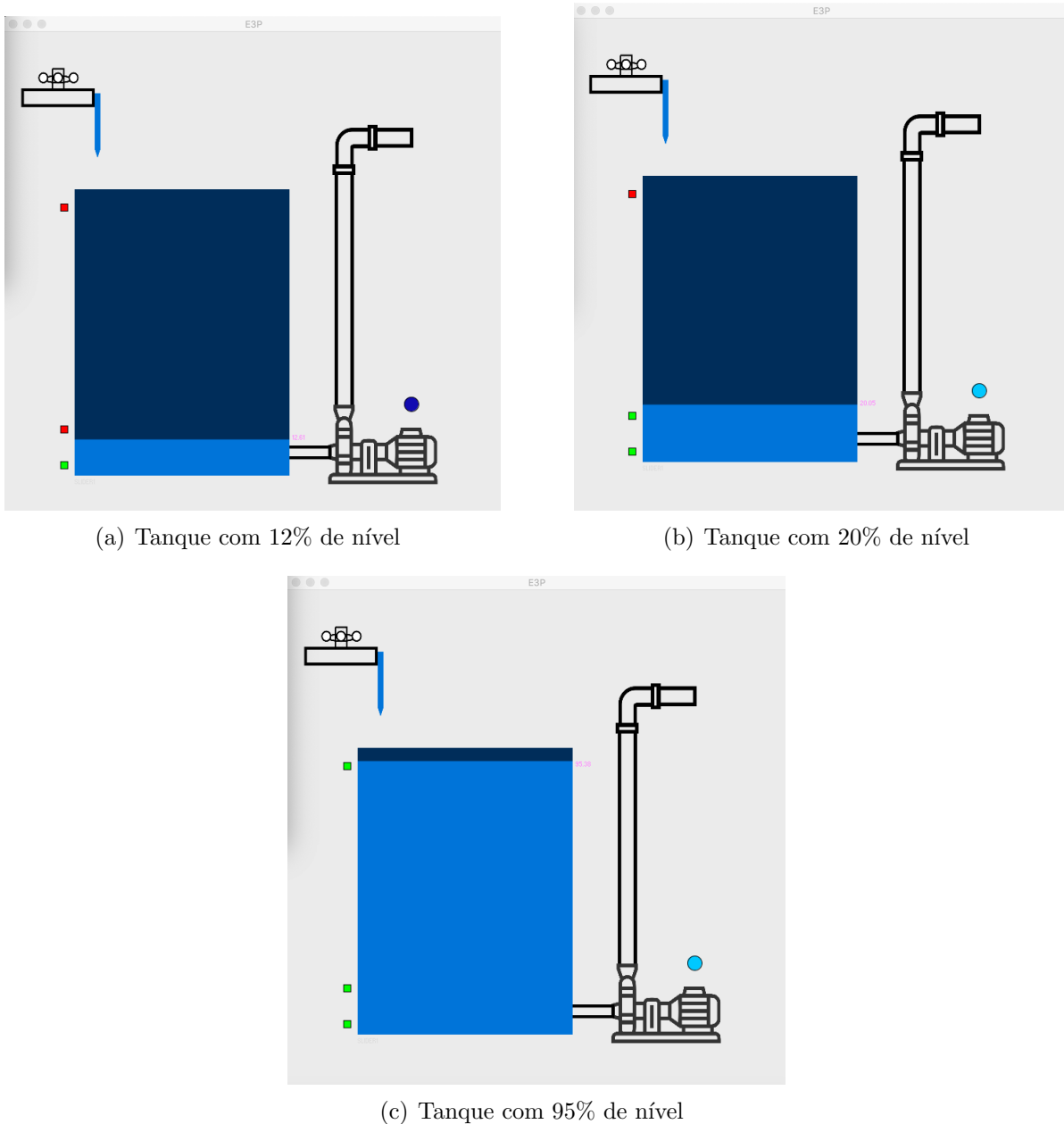


(c) Tanque acima de 95% de nível

Fonte: Próprio Autor

A Figura 35 foi obtida simultaneamente com a Figura 36 abaixo:

Figura 36 – Janela de interface mostrando os níveis do tanque



Fonte: Próprio Autor

3.2.3 Entradas Analógicas

O sensor ultrassônico foi emulado pelo E3P na entrada analógica do CLP. Dessa forma, os valores obtidos pela simulação do sensor ultrassônico passarão pelas transformações abordadas em 2.2.1 na Figura 14, e sairão pelo pino com uma variação de 0-10V. Através do multímetro é possível verificar esta variação.

Figura 37 – Multímetros mostrando a tensão da entrada analógica



(a) Saída do DAC

(b) Entrada Analógica do E3P

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 37(a) é possível observar a tensão de saída no DAC quando o tanque atinge aproximadamente 50% do nível. Já a Figura 37(b) mostra a tensão que entrará no CLP.

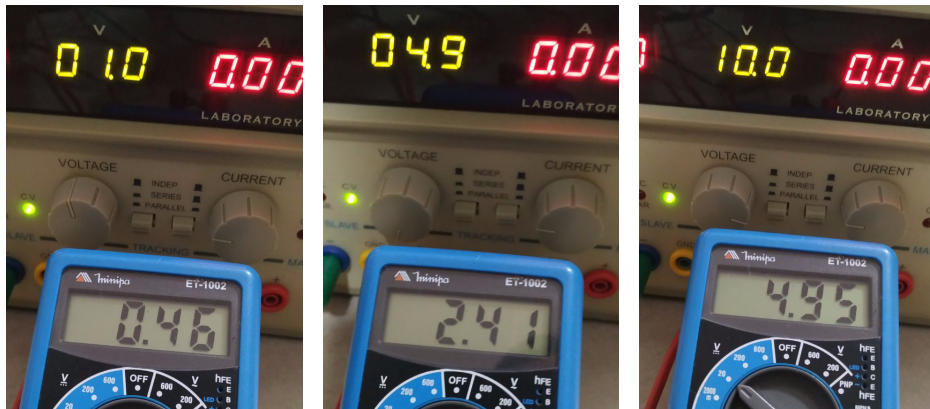
3.2.4 Saídas Digitais

A Saída digital é representada por uma lâmpada, quando o Arduino recebe os 24V vindos do CLP, é ativada a lâmpada na interface do *Processing*. Portanto, o pino foi energizado com 24V para testar a saída digital. Para uma melhor representação foi utilizado uma entrada digital interligada nessa saída para que fosse verificado o funcionamento. Foi escolhido a chave de nível baixo para ligar a saída digital que será responsável por ligar o led da interface gráfica. Pode-se observar isso na Figura 36(b).

3.2.5 Saídas Analógicas

Como saída digital temos o motor da planta, o CLP envia o sinal desse motor 0-10V, passando por uma transformação como foi abordado em 2.2.2 e mostrado na Figura 16. Para realizar o teste foram aplicadas diversas tensões entre 0 e 10V para verificar o recebimento desses dados pelo Arduino.

Figura 38 – Multímetros mostrando a tensão da saída analógica



(a) Saída analógica para 1V (b) Saída analógica para 5V (c) Saída analógica para 10V

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 38 tem-se a tensão aplicada no pino e os multímetros mostrando a tensão recebida pelo Arduino. Para realizar uma dupla verificação, também foi plotado alguns valores, incluindo o valor da saída analógica.

Os valores nível, vazão, rotação, estado da lâmpada e o valor da saída analógica são impressos na Figura 39, separados por vírgulas.

Figura 39 – Valores impressos interpretados pelo Arduino

```
0.1978894233,7.7738785743,379.8180236816,0,101
0.1983171939,7.7601027488,378.8291015625,0,101
0.1987504482,7.7481880187,377.9560546875,0,101
0.1991824340,7.7381696701,377.2007751464,0,101
```

(a) Saída analógica para 1V

```
0.2009464740,12.3545560836,656.2042846679,0,515
0.2004937887,12.3528327941,656.1754150390,0,515
0.1991483497,12.3352184295,655.3522949218,0,516
0.1987042522,12.3252363204,654.8339233398,0,516
```

(b) Saída analógica para 5V

```
0.2135829210,8.5334053039,423.3205566406,0,1023
0.2138688087,8.5868730545,426.5783691406,0,1023
0.2141435861,8.6416492462,429.9176330566,0,1023
0.2143941402,8.6976680755,433.3313293457,0,1023
```

(c) Saída analógica para 10V

Fonte: Próprio Autor

O valor recebido pelo Arduino varia de 0 a 5V após o condicionamento e, como dispõe de um A/D de 10 bits para leitura, tem assim os valores interpretados entre 0 a

1023, portanto o valor impresso equivale ao que é entendido pelo Arduino. Na Tabela 4 é possível observar as conversões.

Tabela 4 – Conversões de sinais da saída analógica

Valor da Saída	Conversão	Interpretação do Arduino
0V	0V	0
1V	0.5V	≈ 101
5V	2.5	≈ 511
10V	5V	≈ 1023

Fonte: Próprio Autor

3.3 Resultados de Funcionamento

Após os testes realizados e que foram abordados nos subcapítulos 3.1 e 3.2 pode-se concluir que O E3P atingiu os objetivos básicos, apesar de não realizado os testes no CLP.

Em relação a interface gráfica, é necessário que o usuário tenha as informações completas e consistentes a respeito das proporções do tanque e tubulações ao entrar com os dados, considerando que, devido a natureza numérico-computacional, quando os valores dimensionais são muito divergentes, o emulador naturalmente não consegue convergir os cálculos.

Já em relação ao *software* do emulador, foi observado que ao usar valores para tanques muito maiores, a simulação tem um maior tempo de execução, considerando que a bomba não é uma variável mutável, portanto, a mesma bomba que bombeia o produto de um tanque 0,5x1m, também bombearia um tanque de 5x10m.

Apesar do tempo de execução longo representar um prejuízo na eficiência das aulas didáticas, ele demonstra uma fidelidade em relação ao processo industrial envolvido. Considerando isso, é interessante a implementação de outros modelos de bomba que acomode os processos com tamanhos maiores de tanque.

Apesar de demonstrar uma fidelidade em relação ao processo industrial envolvido, esse maior tempo de execução poderia prejudicar as aulas didáticas. No entanto, uma solução seria a implementação de outros modelos de bomba que acomode os processos com tamanhos maiores de tanque.

Conclusão

4.1 Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo que emule o comportamento de processos industriais. Assim, foram abordados o desenvolvimento do emulador desde a modelagem matemática até a fase de validação por testes. O uso do emulador desenvolvido permite ao usuário compreender melhor um processo industrial, especificamente, uma planta de nível.

O emulador apresentou um desempenho dentro do esperado, considerando os testes abordados no capítulo 3. O *software Processing* atendeu adequadamente na elaboração na interface, de forma que como proposto, foi criada uma interface intuitiva de maneira que o usuário compreenda os dados que deve inserir e também interpretar a animação apresentada pela área de interação.

O custo elevado que teria uma planta didática real torna limitante o estudo desse tipo de processos industriais no ambiente das instituições. Como vantagens o E3P apresenta um custo baixo de desenvolvimento físico, não passando de R\$180,00 (Tabela 2), além disso, é um emulador pequeno e portátil, podendo ser utilizado com qualquer CLP que apresente os mesmos limites de tensão, sendo, entradas e saídas digitais de 24V, e entradas e saídas analógica de 0-10V. Porém, o E3P não foi testado com o CLP para qual foi projetado. Portanto, ao utilizar com o CLP o emulador pode apresentar outros problemas que não se manifestaram durante os testes.

4.2 Trabalhos futuros

Apesar de apresentar um desempenho satisfatório nos testes, no E3P há muitos pontos a serem melhorados ou modificados. A primeira sugestão seria a realização dos testes do CLP para verificar o funcionamento. Embora tenha tido bons resultados, ao simular com o CLP, pode-se encontrar problemas no qual não foram observados durante

os testes. Além disso, seria necessário realizar uma revisão no DAC, considerando que o mesmo apresentou algumas instabilidades.

Em relação a planta do processo, uma possibilidade interessante consiste em adicionar mais plantas de diferentes processos, para que o usuário tenha diversas opções para testar seus conhecimentos de controle. Também seria interessante a implementação de um sistema de erros interativos na interface. Esse sistema seria com a inclusão de botões na interface que ao serem acionados provocassem distúrbios no sistemas, como por exemplo a mudança de comportamento na vazão de entrada, oscilação na vazão de saída, entre outros. Além disso, a implantação de um painel elétrico, que poderia ser virtual, contando com botões de acionamento, botão de emergência, por exemplo, seria uma boa ideia de melhoria a ser implementada.

Outra implementação importante seria a modificação no código para incorporar a sugestão apresentada no capítulo3, envolvendo a inserção de novos modelos de bombas para adequar a tanques maiores.

Referências

ASTRALCIENTÍFICA. **PLANTA DIDÁTICA PARA CONTROLE DE NÍVEL E VAZÃO**. 2020. Disponível em: <<http://edutec.astralcientifica.com.br/produtos/planta-didatica-para-controle-de-nivel-e-vazao/>>. Acesso em: 04 out 2020.

AUTTOM. **Software Simulador Simmaq 3D**. 2020. Disponível em: <<https://auttom.com.br/produtos/software-simulador-simmaq-3d/>>. Acesso em: 25 set 2020.

BALLUFF. **Sensor ultrassônico: como ele funciona e de que modo pode ajudar a sua indústria?** 2018. Disponível em: <<https://balluffbrasil.com.br/sensor-ultrassonico-como-ele-funciona-e-de-que-modo-pode-ajudar-a-sua-industria/>>. Acesso em: 20 dez 2020.

BATISTA, C. E. R. et al. Software educacional de emulação de plantas de processos industriais discretos controladas por clp via microcontrolador. **COBENGE**, 2012.

BATISTA, W. G. et al. Importância da metodologia prática aplicada à engenharia como fator inerente à aquisição do conhecimento profissional: o caso da disciplina de ciência dos materiais. **JICE**, 2017.

BHS. **Sensor Ultrassônico Industrial**. 2020. Disponível em: <<https://www.bhseletronica.com.br/sensor-ultrassonico-industrial-preco.php>>. Acesso em: 20 dez 2020.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2013.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2008.

CORPORATION, S. **PC817XxNSZ1B Series**. 2018. Disponível em: <https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B_e.pdf>. Acesso em: 19 dez 2020.

DJP. **Sensores Industriais: descubra sua importância para a indústria**. 2020. Disponível em: <<https://djpaautomacao.com/sensores-industriais-descubra-sua-importancia-para-a-industria-moderna/>>. Acesso em: 20 dez 2020.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. [S.l.]: GEN LTC, 2011.

FRANCISCO, M. S.; CAMPO, A. B. Simulador de processos industriais aplicado ao ensino. **SBAI**, 2017.

FURTADO, A. F. Um estudo sobre o desafio do ensino de engenharia frente aos problemas econômicos, energéticos e a sustentabilidade. **Revista Encontro de Pesquisa em Educação**, 2013.

KSB. **Folheto de curvas características MegaCPK**. 2013. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwim1fO1jYftAhXoGbkGHen3B_AQFjAAegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ksb.com.br%2Fphp%2Fprodutos%2Fdownload.php%2Farquivo%3Dcurvas_60hz_2731_451_03_pb_megacpk.pdf%26tipo%3Dcurvas&usg=AOvVaw2vyF8jVmKeU-f3Z7naH2eA>. Acesso em: 25 set 2020.

_____. **MegaCPK-o início de uma nova era**. 2020. Disponível em: <https://www.ksb.com/ksb-pt/Produtos_e_Servicos/Industria/Aplicacoes/Industria_quimica/MegaCPK/>. Acesso em: 05 out 2020.

MAIA, J. da S. **FERRAMENTA PARA APRENDIZAGEM DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DISCRETO: CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (PLC) NA MODALIDADE E-LEARNING**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2002.

MICROSHIP. **2-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6**. 2009. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/mcp4725.pdf>>. Acesso em: 06 out 2020.

OMEGA. **Chaves de Nível de Montagem Lateral**. 201—. Disponível em: <<https://br.omega.com/pptst/LVN90.html#description>>. Acesso em: 20 dez 2020.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. [S.l.]: EESC USP, 2006.

PRESTES, E. B. de C.; RODRIGUES, L. M. Levantamento sobre a importância de aulas práticas para o ensino superior de engenharia. **SIEPE**, 2016.

SESCHINI, I.; GALVEZ, J. M. Um laboratório virtual para aplicações em ensino de automação e controle. **COBENGE**, 2007.

SHAABAN, K. Practical teaching and its importance in teaching civil engineering. **QSCIENCE Proceedings**, n. 4, April 2013.

SILVA, L. P.; CECÍLIO, S. A mudança no modelo de ensino e de formação na engenharia. **Educação em Revista**, v. 45, p. 61–80, junho 2007.

SILVA, R. B.; LOPES, M. P.; AMARAL, L. S. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA PARA ENSINO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE NÍVEL, VAZÃO E TEMPERATURA EM CURSOS DE ENGENHARIA**. 2020. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/7/artigos/103776.pdf>>. Acesso em: 04 out 2020.

SILVEIRA, C. B. **Sensor Ultrassônico: 10 Aplicações Para a Indústria**. 2020. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/sensor-ultrassonico/>>. Acesso em: 20 dez 2020.

SOARES, N. V. **Acoplador Óptico - O que é e para que serve?** 2019. Disponível em: <<https://blog.render.com.br/diversos/acoplador-optico-o-que-e-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 20 dez 2020.

_____. **Acoplador Óptico – O que é e para que serve?** 2019. Disponível em: <<https://blog.render.com.br/diversos/acoplador-optico-o-que-e-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 06 out 2020.

STROSKI, P. N. **Conheça o relé eletromecânico.** 2018. Disponível em: <<https://www.electricalibrary.com/2018/08/06/conheca-o-rele-eletromecanico/>>. Acesso em: 20 dez 2020.