



INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - IFSC
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

Projeto Integrador V

Henrique G. Silvério

Luiz F. Niquelatte

Matheus G. Zweibrucker

Florianópolis - Santa Catarina

Setembro de 2022

Henrique G. Silvério
Luiz F. Niquelatte
Matheus G. Zweibrucker

Projeto Integrador V

Trabalho submetido à avaliação, como requisito parcial, para a obtenção de nota na disciplina de Projeto Integrador, ministrada pelos professores Francisco Rafael Moreira da Mota e Valdir Noll

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC
Campus Florianópolis

Florianópolis - Santa Catarina
Setembro de 2022

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE CÓDIGOS

1

INTRODUÇÃO

O grupo pretende neste projeto construir uma base que possa manter refrigerado um recipiente contendo alguma bebida. Desse modo, foi pensado em utilizar uma placa peltier, que em conjunto com um dissipador de calor poderá prover a habilidade térmica procurada.

1.1 Contextualização do tema

Este projeto trabalha no controle e automação de uma planta de nível de água didática, constituída de dois tanques e controlada por um Controlador Lógico Programável (CLP). O sistema tem como objetivo demonstrar as propriedades de um processo de simples entrada e simples saída (SISO - simple input, simple output).

Sistemas de controle de nível são de grande importância dentro do cenário industrial. De acordo com Rodrigo Silva (2014), processos que envolvam o uso ou até a produção de petróleo, utilizam um controle de nível e dependem de sua eficiência para garantir a segurança tanto do equipamento, como dos técnicos envolvidos no processo.

Embora o conceito deste projeto seja simples, o processo de controle de nível pode ter uma maior complexidade, principalmente quando o processo demanda uma vazão de entrada ou saída variáveis. Assim sendo, é importante que sejam feitos estudos para a implementação e dimensionamento de um controle eficiente, especialmente em um ambiente educacional com um enfoque em aproximar o aluno de um ambiente profissional, ao passo que aplica seus conhecimentos.

1.2 Objetivos

Dentre os objetivos do projeto integrador será realizado o modelamento de uma planta de nível, a elaboração de um controlador para o sistema. Ao final do projeto, será feito um sistema supervisório, que será utilizado para monitoramento e controle da variável de referência.

Além de controlar a planta este projeto tem o intuito de que os envolvidos possam aplicar e aprofundar seus conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Controle de Processos, Informática Industrial e Técnicas de Automação Industrial. Para tal finalidade, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o processo;
- Realizar Modelagem matemática do sistema;
- Executar manutenções ou ajustes necessários na planta;
- Efetuar testes em malha aberta para identificação de constantes;
- Identificar um modelo de controle.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão abordados neste tópico os fundamentos dos conceitos teóricos que embasam o trabalho tanto com a parte física quanto com as ferramentas de software utilizadas ou desenvolvidas no projeto.

2.1 Controle de processos

Franklin (2013) diz que a ideia principal sobre controle de processos é que a saída de um sistema pode ser medida e enviada a um controlador, que fará o controle. Ainda de acordo com o autor, em sistemas de controle retroativos, a variável controlada é medida e a informação é realimentada ao controlador, a fim de influenciar a variável controlada, geralmente aproximando esta de um valor desejado a uma velocidade monitorada.

Dentro do controle comumente utilizam-se algumas terminologias, algumas das quais foram utilizadas no desenvolvimento deste projeto, como por exemplo:

Termo	Entendimento
Controle de processo	Implementação de dispositivos e processos que levam uma variável de determinada planta a uma resposta desejada
Planta	Conjunto de atuador e processo, comumente define a parte física do sistema a ser controlado
Atuador	Meio que permite ação sobre as variáveis do processo. Possibilita variação intencional do valor da variável controlada.
Processo	Operação sujeita ao controle.
Perturbação	Qualquer característica não considerada no controle da planta que possa afetar a variável controlada de maneira imprevista.
Sensor	Mede a variável controlada.
Valor de referência ou Setpoint	O valor que deseja-se alcançar com a variável controlada.
Realimentação	Prática de controle onde é comparada a variável controlada com o valor de referência a fim de obter um erro, a ser considerado pelo controlador.
Variável controlada	Variável focal do controle. Também entendida como variável de saída da planta.
Erro	Diferença entre a variável de referência e a variável controlada.
Controle	Bloco que a partir do erro e da lógica do sistema comanda o atuador, a fim de minimizar o erro.

Tabela 1 – Tabela de termos de controle.

2.2 Teoria do controle clássico

Historicamente são vistos dois tipos de controle, de malha aberta e fechada. Segundo Frankiln (2013), no controle de malha aberta não há sensor para realizar a medição, impossibilitando ação de correção sobre a saída em relação ao sinal de referência. Segundo o autor, no controle de malha fechada é incluso um sensor para medir o sinal de saída, possibilitando a realimentação desse sinal para cálculo do erro. Assim possibilitando um controle mais preciso e robusto sobre a variável controlada.

2.3 Tipos de controladores

Um dos controladores mais utilizados atualmente é o controlador de três termos, que utiliza a ação Proporcional, Integral e derivativa. Utilizando como base o livro de Franklin (2013) podemos separar os controladores em três tipos:

O controlador Proporcional (P), se trata de um ganho de sinal no erro de forma linear, a fim de reduzir o erro de regime, contudo pode reduzir também o coeficiente de amortecimento.

Já o Integrador (I), permite ignorar totalmente perturbações constantes, mas introduz dinâmicas na resposta do controlador, que podem ser indesejadas e tornar o sistema instável.

Além disso, o Derivativo (D) suaviza a resposta e aumenta a estabilidade do sistema, contudo por trabalhar na variação do erro, não é indicado em sinais que apresentem instabilidade, ou que devam responder rapidamente a perturbações.

É importante ressaltar que os controladores I e D dificilmente serão utilizados sozinhos, o mais comum são seus usos com o controlador proporcional formando os controladores PI, PD e PID.

2.4 Técnicas de instrumentação e controle de nível

O controle feito será do nível de um tanque, com área vazão de saída supostamente constante. Para isso, se faz necessária a utilização de um sensor e um atuador.

A planta trabalhada conta com um sensor diferencial de pressão ao fundo do tanque, que pode ser utilizado para obter o nível de água. Como o sensor foi projetado para grandes variações de pressão, o mesmo possui resolução relativamente baixa para este problema e, por este motivo, foi utilizado um amplificador de sinal na sua saída.

A planta também utiliza como atuador uma bomba d'água a fim de variar a vazão de entrada. Para possibilitar o controle da bomba pelo CLP foi utilizado um driver, o qual é controlado pela razão cíclica de um PWM. Para controlar a planta foi utilizado um CLP da Schneider Eletric o Twido, que recebe o sinal amplificado do sensor e está conectado ao driver para comandar a ativação da bomba.

2.5 Método clássico de modelagem de processos Smith

De acordo com CLAUDIO GARCIA o método Smith é um método gráfico utilizado para estimar aproximadamente o modelo de processos estáveis com sistemas de até segunda ordem de forma empírica. Onde, primeiramente obtém-se a resposta do sistema para um sinal degrau de entrada, então são analizados alguns tempos em relação à curva obtida. Por fim, são calculados os valores das constantes K , Θ , τ_1 e τ_2 baseados nos tempos, a fim de estimar a seguinte função de transferência representada pela equação 2.1.

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\Theta \cdot s}}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1))} \quad (2.1)$$

3

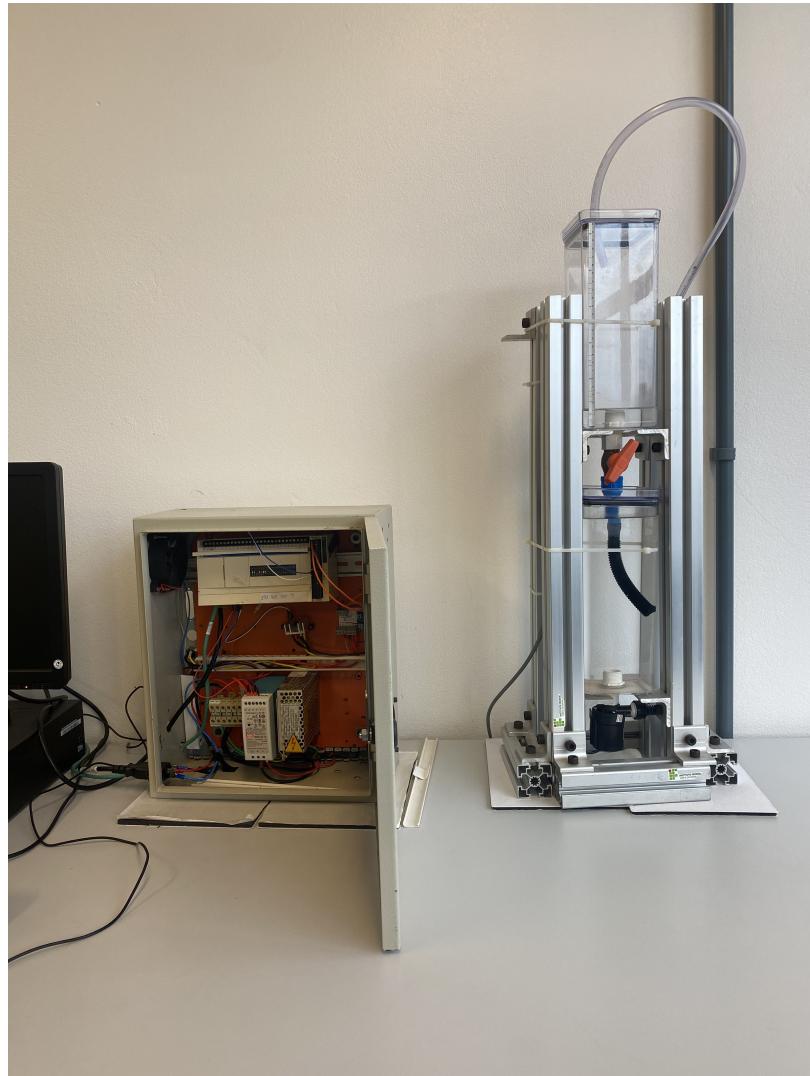
METODOLOGIA

Neste capítulo será exposto, além da estrutura da planta, quais foram as metodologias utilizadas pela equipe no decorrer do projeto para determinar as funções de transferência do sistema.

3.1 Estrutura do sistema

Foi utilizado para elaboração do projeto uma planta didática de controle de nível, disposta no laboratório de pesquisa e desenvolvimento. Esta planta é composta de dois módulos: controlador e o sistema. Podendo ser observado na imagem ?? o painel do controlador e o sistema com atuador sensor e tanque.

Figura 1 – Visão geral do sistema



Fonte: Dos autores

3.1.1 Sistema controlado

O sistema apresenta dois tanques, montados um sobre o outro, fixados por perfis de alumínio e também apresenta uma interligação sobre eles controlada por um registro manual. Além disso, contém um atuador, um sensor de pressão e válvulas de entrada e saída.

A bomba, que pode ser vista na imagem ??, é o único atuador do projeto e está interligando o tanque inferior a uma maniqueira de retroalimentação ao tanque superior. O atuador utilizado tem uma potência de 19W e uma tensão de alimentação de 12V.

Figura 2 – Tanque inferior, com bomba acoplada



Fonte: Dos autores

O sensor utilizado é um MPX2010DP, podendo ser visualizado na imagem ??, é um sensor diferencial de pressão, o qual mede a diferença de pressão em dois pontos. Nesta planta, uma das aberturas do sensor está na pressão atmosférica e a outra no fundo do tanque superior, portanto está sendo medido a pressão manométrica que a água exerce no sensor. Outro ponto importante a ser ressaltado, é de o sensor ter sido projetado para medir até 10KPa de pressão, pressão esta que tem magnitude superior que o sensor será submetido neste projeto, portanto foi acoplado um amplificador em sua saída, o qual será explicado melhor mais adiante.

Figura 3 – Sensor MPX2010DP acoplado ao tanque superior



Fonte: Dos autores

Os tanques utilizados são feitos em acrílico, tendo aproximadamente 100cm^2 de área de seção transversal e 25cm de altura, podendo ser visualizado o tanque superior na imagem ??.

Figura 4 – Tanque superior

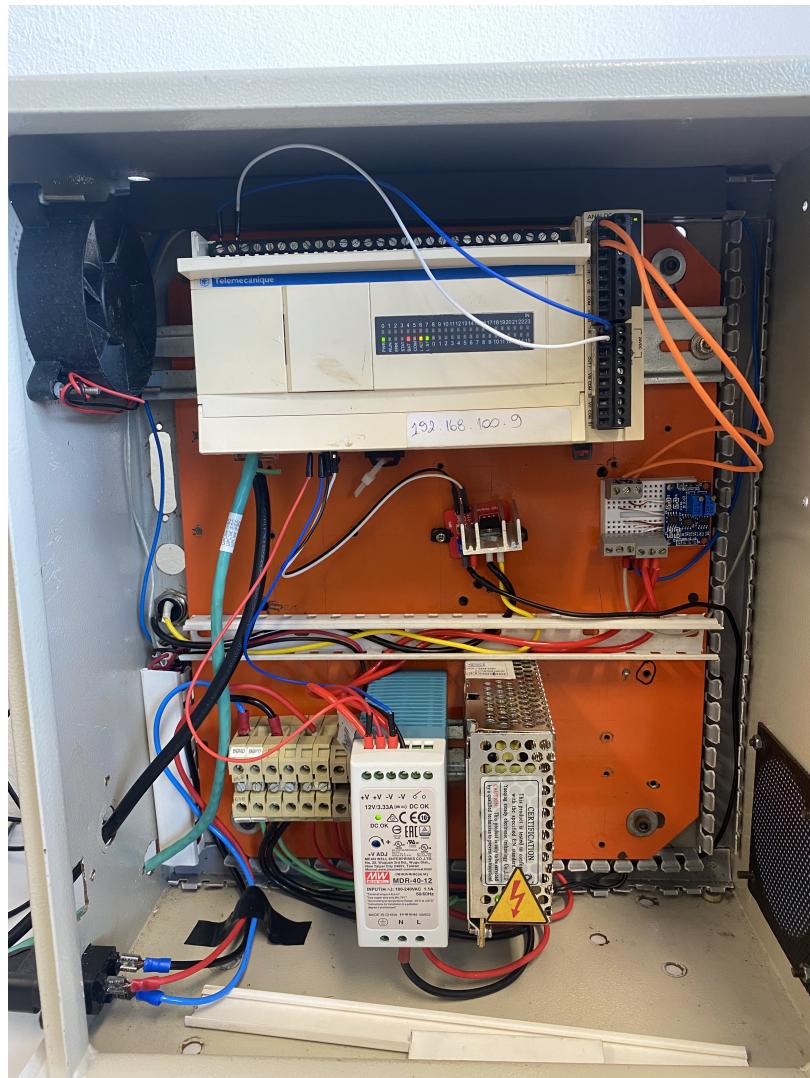


Fonte: Dos autores

3.1.2 Painel de controle

O painel de controle é formado por um painel metálico que é utilizado para fixação de componentes para o controle da planta. Neste projeto encontra-se instalado no painel um Controlador Lógico Programável (CLP), um amplificador de tensão, um driver DCIPF520, duas fontes de tensão, uma de 24V e uma de 12V. Na figura ?? pode ser visualizada a disposição dos intersetores citados

Figura 5 – Painel de controle da planta



Fonte: Dos autores

O CLP utilizado é fabricado pela Schneider Eletrics, é um Twido compact de modelo TWDLCAE40DRE, que está acoplado a um módulo com entradas analógicas para leitura do sensor e controle por PWM do driver da bomba. Podendo ser visualizado na imagem ??, este é o controlador que será utilizado para a implementação da lógica de controle de malha fechada.

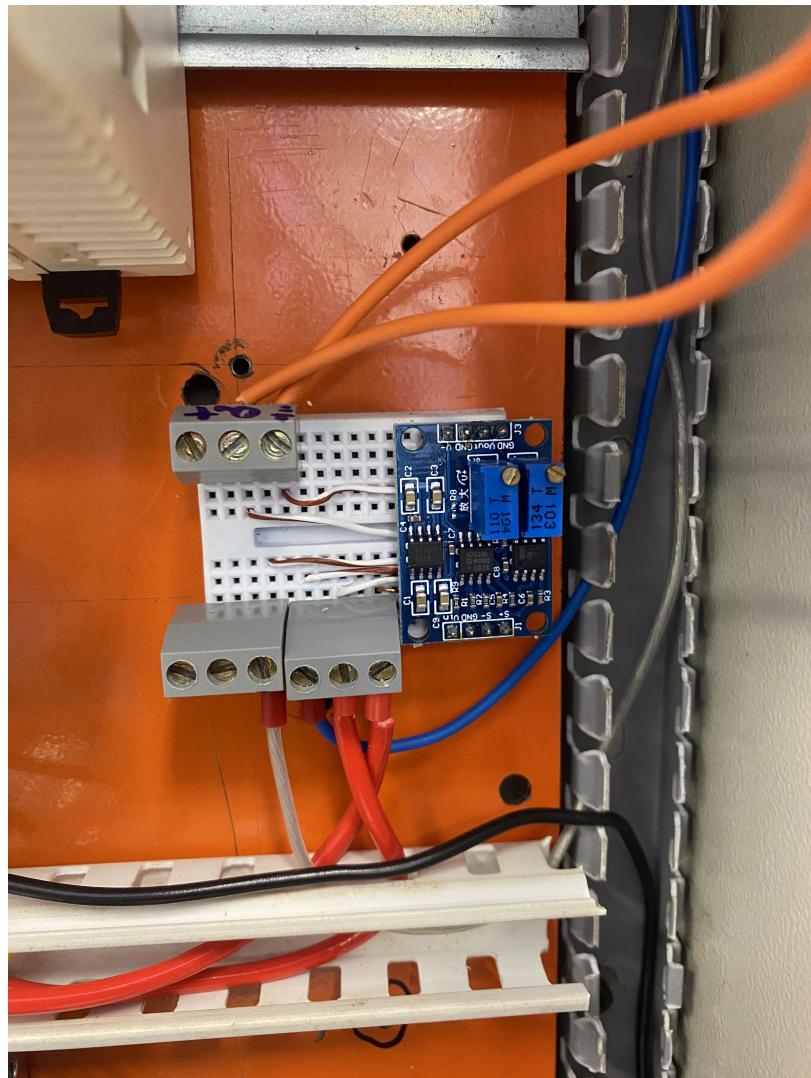
Figura 6 – Twido



Fonte: Dos autores

Para o controle do atuador, o sinal que sai do Controlador deve passar por um driver que faz o acionamento da bomba de acordo com o sinal enviado, em nosso projeto o driver DC-IRF520, observado na figura ??, tem uma tensão de trabalho de 3.3V a 5V e uma saída de até 24V.

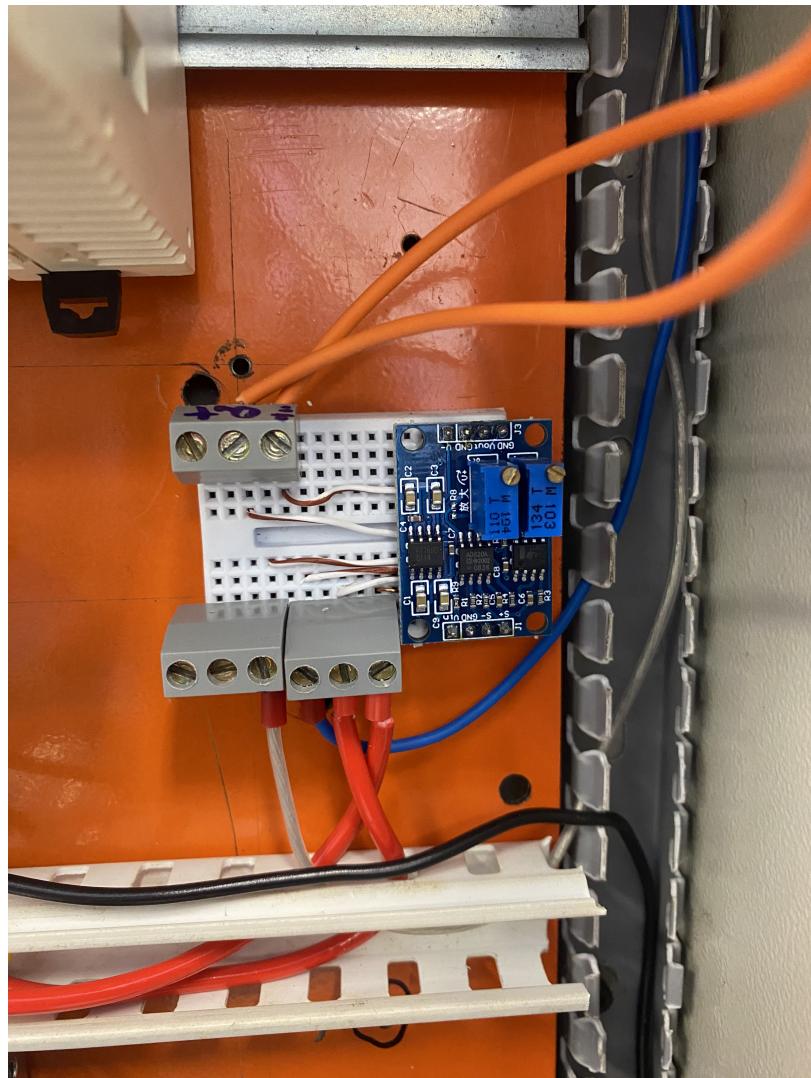
Figura 7 – DC-IRF520



Fonte: Dos autores

Na saída do sensor foi utilizado um Amplificador de tensão, para aumentar o sinal enviado pelo transdutor de pressão. O amplificador do sistema é do modelo AD620, possuindo uma ampliação ajustável de até 1000 vezes e uma tensão de trabalho de 3V a 12V e uma tensão de entrada que pode variar de $100\mu V$ ateé $300mV$. O amplificador pode ser visualizado na imagem abaixo:

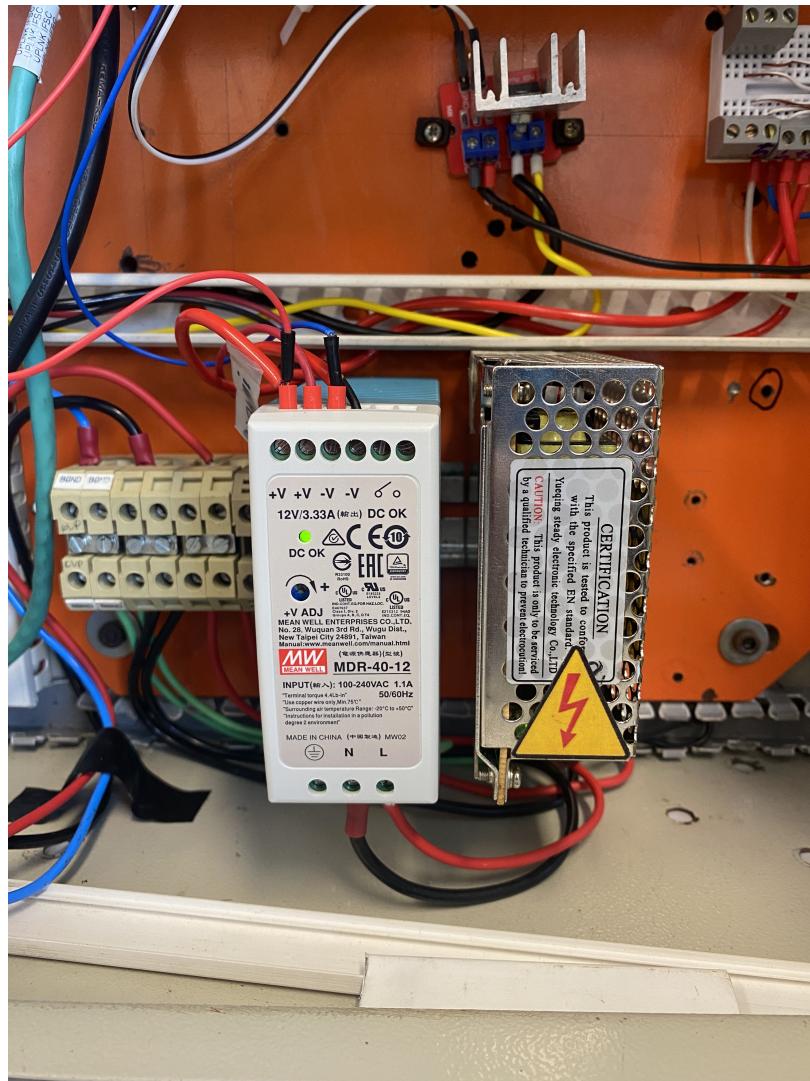
Figura 8 – Amplificador de sinal



Fonte: Dos autores

Além disso, foram utilizadas duas fontes chaveadas, uma com tensão de saída de 12V e uma de 24V que foram utilizadas para alimentar o sistema com as tensões e correntes necessárias para o funcionamento do sistema. As fontes podem ser observadas na imagem ??.

Figura 9 – fontes



Fonte: Dos autores

3.2 Metodologia de identificação do sistema em malha aberta

Para identificação do sistema em malha aberta, primeiramente foi estimado o modelo matemático da planta a partir das equações teóricas que caracterizam a planta. Em um segundo momento, aproximou-se o modelo matemático da planta de forma empírica com o método de Smith.

3.2.1 Identificação Teórica

Neste processo foi criado um modelo matemático da planta, com algumas simplificações, para que pudessem ser encontradas as funções transfêrencias de algumas faixas de trabalho do sistema. Além disso, foi necessário alguns experimentos práticos para se determinar o valor de algumas variáveis necessárias para a solução das equações.

3.2.1.1 Equacionamento das características

Considerando o objetivo de controle do nível a partir da altura (h), o equacionamento foi iniciado a partir da lei de conservação da massa, com ela podemos inferir que a variação do volume deve ser igual a vazão de entrada menos a vazão de saída:

$$\frac{dV}{dt} = V_e - V_s \quad (3.1)$$

Como a área de seção transversal do tanque é aproximadamente constante, podemos dizer que:

$$\frac{dV}{dt} = dh \cdot \frac{A}{dt} \quad (3.2)$$

Assim, foi obtida a equação que relaciona a altura (h) a variação da vazão, $V_e - V_s$:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V_e - V_s}{A} \quad (3.3)$$

Estimou-se V_e , a vazão controlada pela bomba, como uma constante K multiplicado uma tensão média, vinda do driver da bomba:

$$V_e = K \cdot U \quad (3.4)$$

Foi reescrito V_s da seguinte forma:

$$V_s = a \cdot v \quad (3.5)$$

Onde "a" é a área efetiva da válvula de saída do tanque superior e "v" é a velocidade da água que está saindo do tanque. Utilizando-se Bernoulli, foi possível escrever a

vazão de saída do tanque em função da área de saída da pressão e da massa específica da água, como visto na equação abaixo.

$$V_s = a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{P}{g\rho}} \quad (3.6)$$

Sendo assim, foi obtida a seguinte equação:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{KU - a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h}}{A} \quad (3.7)$$

E então foi feita a substituição de "h" e "U" por um valor de referência, "h₀" e "U₀", adicionados por um delta:

$$h = \Delta h + h_0 \quad (3.8)$$

$$U = \Delta U + U_0 \quad (3.9)$$

$$\frac{d(\Delta h + h_0)}{dt} = \frac{K(\Delta U + U_0) - a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\Delta h + h_0}}{A} \quad (3.10)$$

Em um estado de equilíbrio pode ser obtido:

$$KU_0 = a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_0} \quad (3.11)$$

Para que pudesse ser trabalhado com um sistema de primeira ordem, foi feita a linearização do termo $\sqrt{\Delta h}$ da penúltima equação, utilizando os primeiros dois termos da série de Taylor, obtendo o seguinte resultado:

$$\frac{d(A \cdot \Delta h)}{dt} = \Delta UK - \frac{a \cdot \sqrt{2g} \cdot \Delta h}{2 \cdot \sqrt{h_0}} + KU_0 - a \cdot \sqrt{2gh_0} \quad (3.12)$$

É possível eliminar alguns termos, quando consideramos um estado de equilíbrio:

$$\frac{d(\Delta h A)}{dt} = \Delta UK - \frac{a \cdot \sqrt{2g} \cdot \Delta h}{2 \cdot \sqrt{h_0}} \quad (3.13)$$

Fazendo a substituição de alguma constantes e isolando Δh , tem-se que:

$$\alpha = \frac{a \cdot \sqrt{2g} \cdot \Delta h}{2 \cdot \sqrt{h_0}} \quad (3.14)$$

$$\tau = \frac{A}{\alpha} \quad (3.15)$$

$$K_e = \frac{K}{\alpha} \quad (3.16)$$

$$\Delta h = \frac{\Delta U \cdot K_e}{s \cdot \tau + 1} \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta U} = \frac{K_e}{\tau \cdot s + 1} \quad (3.18)$$

3.2.1.2 Analize e medição de constantes

Para calcular os valores da função de transferência obtida em 3.2.1.2, foi necessário medir e estimar os valores de algumas constantes da planta, sendo elas: a (área efetiva de abertura da válvula de saída do tanque), A (área de seção transversal do tanque) , a qual foi medida com um paquimetro, e K (constante que relaciona a tensão média na bomba com a vazão gerada) e h0 (alturas de referencia).

A constante K foram feitos ensaios com a válvula de saída do tanque fechada, e ativando a bomba em uma série de razões cíclicas de PWM por um tempo constante de 10s controlado pelo CLP em malha aberta. Multiplicando a diferença de altura pela área do tanque foi obtida a diferença de volume e dividindo a diferença pelo tempo decorrido, a vazão para aquele PWM. segue plotagem dos pontos:

Figura 10 – Gráfico para calculo da constante K



Fonte: Dos autores

A partir da linearização do gráfico foi estimado o valor da constante K em 0,0009027. Para obtenção da área de saída do tanque, a, foi ligada a bomba em uma série de vazões conhecidas, e aguardado o sistema se estabilizar. Então, através da equação de Bernoulli, é calculada a área efetiva como $4.037088288e - 5m^2$.

Por fim, as alturas foram estimadas de maneira arbitrária, pois já que a importância dela para a equação de transferência é a precisão da linearização, desde que as alturas estejam bem distribuídas, espera-se um resultado adequado.

3.2.2 Identificação por método Smith

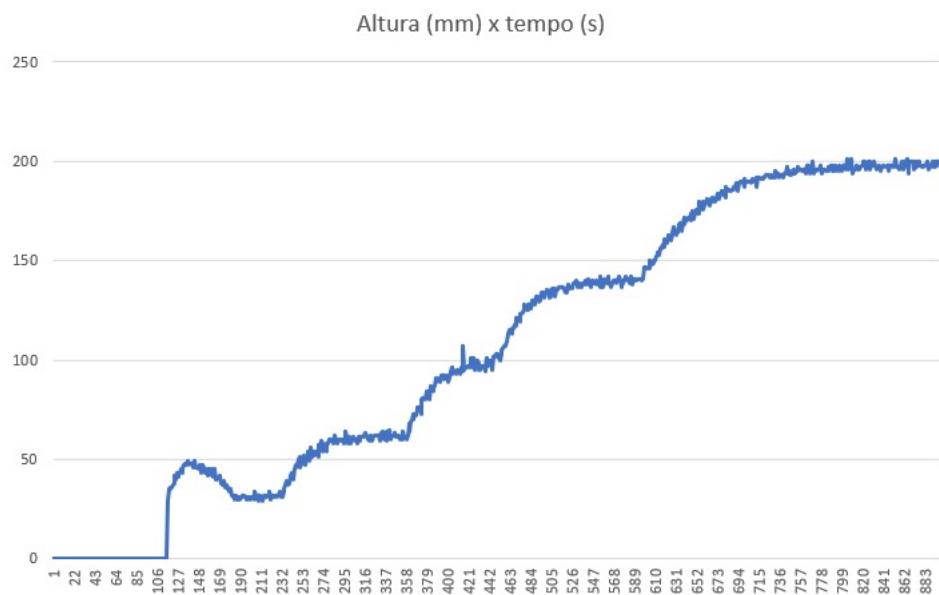
3.2.2.1 Obtenção dos dados em malha aberta

O primeiro passo do método Smith requer que sejam coletados os dados da planta em malha aberta reagindo a um sinal de entrada degrau.

Como o sinal de razão cíclica de PWM aplicado não ativou a bomba com menos

de 20%, a metodologia seguida para aplicação de sinal foi de estabilizar o sistema em uma vazão de entrada constante, e então aumentar o sinal em um valor fixo. Os sinais foram aplicados da seguinte forma: de 20% a 30%, de 30% a 40%, de 40% a 50% e de 50% a 60% da razão cíclica de PWM formando assim quatro conjuntos de dados para uso do método Smith, que podem ser visto na imagem ??.

Figura 11 – Gráfico para calculo da constante K



Fonte: Dos autores

3.2.2.2 Aproximação da função Transferência

Para a aproximação da função de transferência aplicando o método Smith, foi utilizada uma rotina de Python, primeiramente os dados foram lidos e separado nos períodos correspondentes a cada conjunto:

Código 3.1 – Parse de dados

```

1 full_series = pd.read_csv('de_10_em_10.csv', sep=';')['Output']
2 print(full_series)
3
4 delta_h_data_di = {
5     's_20_to_30': {
6         'start_idx': 232,

```

```

7      'end_idx': 359,
8      'data': full_series[232:359].reset_index(drop=True),
9      'delta_pwm': 10,
10     'delta_t': 359 - 232,
11   },
12   's_30_to_40': {
13     'start_idx': 358,
14     'end_idx': 443,
15     'data': full_series[358:443].reset_index(drop=True),
16     'delta_pwm': 10,
17     'delta_t': 443 - 358,
18   },
19   's_40_to_50': {
20     'start_idx': 442,
21     'end_idx': 597,
22     'data': full_series[442:597].reset_index(drop=True),
23     'delta_pwm': 10,
24     'delta_t': 597 - 442,
25   },
26   's_50_to_60': {
27     'start_idx': 596,
28     'end_idx': 899,
29     'data': full_series[596:899].reset_index(drop=True),
30     'delta_pwm': 10,
31     'delta_t': 899 - 596,
32   },
33 }
```

Após isso foram aplicadas operações em todos os conjuntos simultaneamente, salvando os dados calculados no dicionário correspondente de cada conjunto. Iniciando pela transposição dos valores do gráfico, reduzindo o valor de todos os pontos baseado no menor valor do conjunto:

Código 3.2 – Transposição de valores

```

1 def delta_data(di):
2     for key, item in di.items():
```

```

3     di[key]['data'] = item.get('data') - min(item.get('data'))
4     return di

```

Então foram calculadas a diferença da altura máxima para a primeira altura, Δ_h :

Código 3.3 – Calculo Delta h

```

1 def calculate_delta_h(di):
2     for key, item in di.items():
3         data = item.get('data')
4         di[key]['delta_h'] = max(data) - data[0]
5     return di

```

Foi calculada a constante K e os tempos utilizados para o método de Smith:

Código 3.4 – Constante K e tempos utilizados

```

1 def calculate_k(di):
2     for key, item in di.items():
3         delta_h = item.get('delta_h')
4         delta_pwm = item.get('delta_pwm')
5         di[key]['k'] = delta_h / delta_pwm
6     return di
7
8
9 def calculate_yts(di):
10    for key, item in di.items():
11        data = item.get('data')
12        di[key]['yt1_SM'] = (28.3 / 100) * max(data)
13        di[key]['t1_SM'] = data[data == min(data[data >= di[key]['yt1_SM']])].index[0]
14        di[key]['yt2_SM'] = (63.2 / 100) * max(data)
15        di[key]['t2_SM'] = data[data == min(data[data >= di[key]['yt2_SM']])].index[0]
16
17    return di

```

Com estes dados foram obtidos as constantes da equação 2.1, tau e theta:

Código 3.5 – Calculo Tau e Theta

```

1 def calculate_tau(di):

```

```
2     for key, item in di.items():
3         di[key]['tau_SM'] = 1.5 * (item.get('t2_SM') - item.get('t1_SM'))
4     return di
5
6
7 def calculate_teta(di):
8     for key, item in di.items():
9         teta_SM = item.get('t2_SM') - item.get('tau_SM')
10        di[key]['teta_SM'] = teta_SM if teta_SM > 0 else 0
11    return di
```

E por fim foi calculada a função de transferência estimada para a planta:

Código 3.6 – Calculo Função transferência

```
1 def calculate_tf(di):
2     for key, value in di.items():
3         k = value.get('k')
4         tau_SM = value.get('tau_SM')
5         di[key]['tf'] = control.tf(k, [tau_SM, 1])
6     return di
```

4

CONCLUSÃO

As considerações finais formam a parte final (fechamento) do texto, sendo dito de forma resumida (1) o que foi desenvolvido no presente trabalho e quais os resultados do mesmo, (2) o que se pôde concluir após o desenvolvimento bem como as principais contribuições do trabalho, e (3) perspectivas para o desenvolvimento de trabalhos futuros. O texto referente às considerações finais do autor deve salientar a extensão e os resultados da contribuição do trabalho e os argumentos utilizados estar baseados em dados comprovados e fundamentados nos resultados e na discussão do texto, contendo deduções lógicas correspondentes aos objetivos do trabalho, propostos inicialmente.

Antes de ir para as Referências, devo dizer que para obtê-las, você deve abrir o arquivo *referencias.bib*, neste arquivo estão as referências no formato *BibTex*. Para que as citações apareçam no seu trabalho você deve:

- pesquisar sobre o livro que você quer citar no site *scholar.google.com.br*.
- colocar o nome do título do livro o qual você procura.