



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

**Projeto de um sistema de controle de nível para tanques industriais.**

**Rodolfo Lima Lage**

João Monlevade, MG  
2019

**Rodolfo Lima Lage**

**Projeto de um sistema de controle de nível para tanques industriais.**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.  
Orientador: Prof. Marcelo Moreira Tiago

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**João Monlevade**  
**2019**

L174p Lage, Rodolfo Lima.  
Projeto de um sistema de controle de nível para tanques industriais  
[manuscrito] / Rodolfo Lima Lage. - 2019.

47f.:

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica. 2. Automação industrial. 3. Controladores programáveis. 4. Modelagem. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.51



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Rodolfo Lima Lage

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL PARA TANQUES INDUSTRIAIS**

Membros da banca

Marcelo Moreira Tiago - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto  
Marcio Feliciano Braga - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto  
Wendy Yadira Eras Herrera - Doutora - Universidade Federal de Ouro Preto

Versão final  
Aprovado em 28 de novembro de 2019.

De acordo

Marcelo Moreira Tiago



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/01/2020, às 20:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0031400** e o código CRC **37447286**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.203672/2019-81

SEI nº 0031400

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br

# Resumo

Este trabalho apresenta as etapas de projeto para o desenvolvimento de um sistema de controle de nível para tanques. Os ensaios foram realizados utilizando a planta didática SMAR PD3-F. Também foram utilizados um instrumento para medição de nível por meio de pressão diferencial, uma válvula pneumática e uma bomba monofásica de 0.5 HP. Uma rede Fieldbus foi utilizada para permitir a comunicação entre instrumentos e controlador, e um conversor foi utilizado para permitir a comunicação do controlador com um computador por meio da rede Ethernet. Tanto a identificação quanto o controle do sistema foram feitos remotamente, utilizando o *software* Matlab. A plataforma OPC foi utilizada para permitir a comunicação entre os instrumentos da planta e o Matlab. Através das leis físicas que regem o sistema, foi realizado a modelagem caixa branca para obtenção de uma função de transferência que descrevesse o comportamento do sistema, além disso, ensaios experimentais foram feitos para realizar outro tipo de modelagem, a modelagem caixa preta, e ambas respostas encontradas foram utilizadas para projetar um controlador PID. Como resultado, obteve-se um sistema de controle de nível com faixa de operação entre 50% e 75% do nível de operação do tanque e erro de regime permanente de 0,2%.

**Palavras-chave:** Instrumentação, Controle Remoto de Instrumentos, Controle de Nível, OPC.

# Abstract

This work presents the design steps for the development of a tank level control system. The tests were performed using the SMAR PD3-F teaching plant, and a differential pressure level measuring instrument, a pneumatic valve and a 0.5 HP single-phase pump were used. A Fieldbus network was used to enable communication between instruments and controller, and a converter was used to enable controller to communicate with a computer over the Ethernet network. Both system identification and control were done remotely using Matlab software. The OPC platform was used to enable communication between plant instruments and Matlab. Through the physical laws governing the system, the white box modeling was performed to obtain a transfer function that described the behavior of the system. In addition, experimental tests were performed to perform another type of modeling, the black box modeling, and both. The answers found were used to design a PID controller. As a result, a level control system with operating range between 50% and 75% of tank operating level and steady state error of 0.2% was obtained.

**Keywords:** Instrumentation, Remote Instrument Control, Level Control, OPC.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Medição de nível por pressão diferencial. . . . .	7
Figura 2 – Válvula de controle tipo globo com atuador pneumático. . . . .	8
Figura 3 – Planta Didática Smar PD3-F. Em destaque, tem-se o reservatório de água (1), o tanque de aquecimento (2), o tanque de mistura (3), as duas bombas existentes na planta (4) e as válvulas pneumáticas utilizadas para controle de vazão e nível (5). . . . .	10
Figura 4 – Diagrama P&I da planta didática SMAR PD3-F . . . . .	11
Figura 5 – Célula capacitiva do transmissor de pressão . . . . .	12
Figura 6 – Transmissor de pressão LD302 . . . . .	13
Figura 7 – Esquema do transdutor pneumático . . . . .	14
Figura 8 – Posicionador de válvula . . . . .	14
Figura 9 – Especificações da bomba monofásica HYDROBLOC P500 . . . . .	15
Figura 10 – Plataforma de controle e automação de processos - DFI302 . . . . .	16
Figura 11 – Módulo controlador - DF63 . . . . .	16
Figura 12 – Arquitetura do protocolo OPC. . . . .	19
Figura 13 – Topologia da rede de comunicação. . . . .	20
Figura 14 – Ilustração para o sistema de controle de nível do tanque de aquecimento.	21
Figura 15 – Representação das leis que atuam no sistema. Na Figura, $Q_i$ representa a vazão de entrada, $Q_o$ a vazão de saída e $h$ a altura da coluna d'água.	24
Figura 16 – Resposta ao degrau unitário de uma função de transferência de primeira ordem. . . . .	27
Figura 17 – Exemplo de sistema em malha fechada . . . . .	28
Figura 18 – Interface gráfica do <i>simulink</i> - Malha de controle PID . . . . .	31
Figura 19 – Abertura da válvula para setpoint de 25% e 50%. . . . .	33
Figura 20 – Abertura da válvula para setpoint de 75% e 100%. . . . .	34
Figura 21 – Resposta do sistema para degrau de 25%, 50%, 75% e 100%. . . . .	34
Figura 22 – Projeto do controle de nível desenvolvido no <i>Simulink</i> . . . . .	36
Figura 23 – Resposta do sistema para $K_p = 9,38$ e $K_i = 0,407$ - Modelagem Caixa Preta . . . . .	37
Figura 24 – Resposta do sistema para $K_p = 18,05$ e $K_i = 0,531$ - Modelagem Caixa Branca . . . . .	37
Figura 25 – Abertura da válvula de controle para $K_p = 9,38$ e $K_i = 0,407$ . . . . .	39
Figura 26 – Resposta do sistema para controle de nível de 75%. . . . .	40
Figura 27 – Resposta do sistema para controle de nível de 25%. . . . .	40

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Revisão Bibliográfica	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do Trabalho	3
<b>2</b>	<b>SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE DE NÍVEL</b>	<b>5</b>
2.1	Classificação de instrumentos de medição e controle	5
2.2	Medição de nível	6
2.3	Atuadores hidráulicos	7
2.4	Planta didática SMAR PD3-F	9
2.5	Sistema de controle de nível	11
2.5.1	Indicador e transmissor de nível (LIT-31)	11
2.5.2	Posicionador inteligente de válvulas (FY-31)	13
2.5.3	Bombas hidráulicas	15
2.5.4	Plataforma de controle e automação de processos	15
2.6	Rede <i>FOUNDATION Fieldbus</i>	16
2.7	Plataforma OPC: <i>Open Platform Communication</i>	18
2.7.1	Arquitetura da Plataforma OPC	18
2.8	Topologia da Rede de Comunicação da Planta Didática SMAR PD3-F	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>21</b>
3.1	Acesso à planta via Matlab	22
3.2	Modelagem do sistema	23
3.2.1	Modelo Caixa Branca	24
3.2.2	Método Caixa Preta	26
3.3	Controladores PID	28
3.3.1	Sintonia PID por Ziegler-Nichols	29
3.4	Cálculo dos ganhos do controlador e projeto da malha de controle utilizando o MATLAB	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>32</b>
4.1	Cálculo da função de transferência: Método Caixa Branca	32
4.2	Cálculo da função de transferência: Método Caixa Preta	33
4.3	Obtenção dos ganhos do sistema e projeto do controlador	35
4.4	Resposta do sistema ao controlador projetado	36

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>CÓDIGO DE ACESSO AOS INSTRUMENTOS DA PLANTA ATRAVÉS DA PLATAFORMA OPC PELO MATLAB . . . . .</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>46</b>

# 1 Introdução

Desde os anos 50, ocorreram grandes evoluções nos setores industriais, resultantes de um mercado mais competitivo, para serem capazes de produzir mais, com mais qualidade e menos custo. Nessa época, foram desenvolvidos os primeiros dispositivos semiautomáticos com o objetivo de atender à crescente demanda de produtos e matéria-prima (FRANZINI et al., 2013).

Indústrias petrolíferas, têxteis, mineradoras, sucroalcooleiras, entre outras, têm grande necessidade de manter o padrão de qualidade de seus produtos. Isso pode ocorrer por meio do controle das variáveis de processo, como nível, temperatura, vazão etc., em algum ponto de operação. Devido a isso, a utilização de instrumentos em uma indústria visa dar segurança às pessoas envolvidas, criar um padrão de qualidade do produto e até mesmo reduzir os custos do processo (SILVA; ENDO; LISBÔA, 2011).

Com a evolução dos sensores e atuadores, vários fabricantes diferentes entraram no mercado, fornecendo equipamentos utilizados para automatizar processos industriais. Entretanto, por não haver uma padronização, cada fabricante definia seu próprio protocolo de comunicação, causando grandes dificuldades na indústria, principalmente, quando sistemas distintos precisavam ser interligados. Pensando em resolver este problema, foi desenvolvida nos anos 90, a plataforma OPC (*OLE for Process Control*), que, atualmente, é gerenciada pelo Fundação OPC. Essa plataforma foi desenvolvida para estabelecer um padrão de acesso a dados de campo em tempo real, assim como regras para o desenvolvimento de sistemas com interfaces padrões para comunicação com dispositivos de campo, como sensores, CLPs etc., com os sistemas de monitoração, supervisão e gerenciamento (SCADA, MES, ERP, etc.). A padronização ofereceu várias vantagens para todo o ramo industrial como a eliminação da necessidade de *drivers* proprietários, tornando possível a comunicação entre sistemas de diversos fabricantes, desempenho e otimização entre dispositivos melhorados, integração com sistemas de gerenciamento etc. (FONSECA, 2002).

Neste trabalho, a plataforma OPC é utilizada para permitir a comunicação entre o *software* MATLAB/Simulink e a Planta Didática SMAR PD3-F, possibilitando que o Matlab seja utilizado para monitorar e controlar o nível de um dos tanques presentes na planta.

## 1.1 Revisão Bibliográfica

Ao longo dos últimos anos, muitos autores têm se dedicado a desenvolver aplicações voltadas para o monitoramento e controle de instrumentos por meio da plataforma aberta OPC (Plataforma Aberta de Comunicação, do inglês *Open Platform Communications*).

No trabalho apresentado por Duarte, Figueiredo e Corrêa (2006), é realizado o controle de um processo por meio do *software* Matlab, que acessou os instrumentos de campo de uma planta didática pela plataforma OPC, sendo criados o servidor, grupos e itens. Após toda a comunicação realizada, foi desenvolvida uma interface no Matlab que permite a interação com o usuário por janelas gráficas. Por fim, realizou-se o controle de uma malha de vazão da planta didática, mostrando em tempo real o valor das variáveis.

No trabalho apresentado por Carvalho, Silva e Nascimento (2008), são apresentadas duas formas de comunicação entre o processo, no caso uma coluna de destilação piloto e o *software* MATLAB. A primeira baseia-se na integração entre os sistemas MATLAB (simulação e controle) e InTouch (supervisão do processo), realizada por meio da plataforma DDE, onde o MATLAB funciona como *software* cliente da comunicação e o InTouch como servidor. Já na segunda forma de comunicação, foi realizada a conexão do MATLAB (operando como cliente) com o Syscon (operando como servidor), através da plataforma OPC.

O trabalho apresentado por Neto et al. (2012) tem como enfoque principal apresentar uma metodologia de ensino e pesquisa de controle de processos por meio da plataforma OPC. Durante o trabalho, desenvolveu-se um módulo laboratorial para testes baseado em um controlador lógico programável (CLP). A plataforma OPC foi utilizada para permitir a comunicação entre o MATLAB (cliente) e o CLP (servidor).

Carmo (2017) realizou o projeto de um sistema supervisório criado utilizando o *software* MATLAB para o controle da Planta Didática SMAR PD3-F. Para o acesso aos instrumentos da planta, foi realizada a comunicação do MATLAB com o *software* do fabricante SYSTEM302 por meio da plataforma OPC. Além disso, foram avaliadas técnicas de identificação de sistemas para verificar o comportamento da planta e encontrar um modelo para representação matemática do sistema estudado. Por fim, foram realizados alguns ensaios envolvendo o controle de nível de um tanque para validar o funcionamento correto de toda a comunicação realizada.

Os trabalhos apresentados por Franzini et al. (2013) e Oliveira et al. (2012) falam sobre a utilização do *software* Matlab para o controle de uma planta didática que utiliza o protocolo de comunicação HART para realizar a comunicação entre os instrumentos e atuadores. Nesses trabalhos, a plataforma OPC também foi utilizada para permitir a comunicação do Matlab com os instrumentos. Como exemplo de aplicação, os autores implementaram um sistema de controle de nível para o tanque de aquecimento da planta.

Silveira (2006) utiliza em seu trabalho uma planta didática que opera com o protocolo *Foundation Fieldbus* para estabelecer a comunicação entre os instrumentos e atuadores. Além de descrever as funcionalidades da planta e apresentar um breve resumo sobre as principais características de um sistema *Fieldbus*, o autor descreve os passos utilizados para projetar e implementar um controlador para planta em questão utilizando o Matlab como ferramenta. Como exemplo de aplicação, foi projetado um sistema para

realizar o controle de temperatura da água de um tanque da planta.

A determinação de um modelo matemático para a representação de um tanque de aquecimento também foi objeto de estudo do trabalho apresentado por Moraes et al. (2017). Nesse trabalho, foram utilizados conceitos físicos para modelagem do sistema (método caixa branca) e, por fim, dados reais foram utilizados como parâmetros de entrada para simulações utilizando os modelos obtidos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é projetar um sistema de controle de nível para um tanque da Planta Didática SMAR PD3-F a partir do ajuste da abertura de uma válvula pneumática, responsável pelo controle do fluxo de líquido que entra no tanque.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Compreender o funcionamento dos instrumentos que compõem a planta;
- Controlar os instrumentos remotamente através do Matlab, utilizando a plataforma OPC;
- Encontrar um modelo matemático para o sistema e validar o resultado obtido;
- Projetar um controlador PID para ajuste do nível do tanque;
- Avaliar o desempenho do controlador projetado.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1, apresenta uma breve introdução sobre o tema, descreve um exemplo de processo de controle industrial e as principais atividades exercidas por intermédio deste no meio fabril, apresenta alguns trabalhos já desenvolvidos nesta área, citando os objetivos e resultados obtidos pelos autores.

O Capítulo 2 refere-se aos conceitos de instrumentação em que são retratados os dispositivos para medição e controle, focando no medidor de nível e na válvula de controle utilizados ao longo do trabalho. Além disso, o capítulo descreve a Planta Didática SMAR PD3-F, sua plataforma de controle e automação de processos, suas características, malhas e seu diagrama P&I, enfatizando a malha de controle utilizada no presente trabalho e as características de seus instrumentos. Por fim, são apresentados os protocolos de comunicação utilizados e a topologia final da rede.

No Capítulo 3, descreve-se a metodologia utilizada no trabalho, descrevendo os passos realizados para controlar os instrumentos e adquirir os dados utilizados para

---

encontrar o modelo caixa preta da planta. Além disso, também são descritos os passos utilizados no projeto do controlador utilizado.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados experimentais e uma discussão dos principais pontos observados ao longo do trabalho.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Sistema de medição e controle de nível

Neste capítulo, são descritos o sistema utilizado pela Planta Didática SMAR PD3-F, funcionalidades, estrutura e as características dos instrumentos pertencentes à malha de controle manipulada, denominada Malha 31. Também são descritos os protocolos de comunicação empregados, técnicas utilizadas para monitoramento e controle dos instrumentos.

### 2.1 Classificação de instrumentos de medição e controle

Em uma instalação industrial, é comum encontrar combinações complexas de instrumentos de medição e controle. Logo, faz-se necessário analisá-los utilizando a classificação adequada (BEGA, 2010). Os instrumentos podem ser classificados em:

- Instrumentos cegos: não possuem indicação visível do valor da variável medida. Pode-se citar um instrumento de alarme como exemplo, pois ele apenas faz o alerta de um problema, mas não mostra esse problema em algum *display* ou algo do tipo.
- Instrumentos indicadores: instrumentos utilizados para leitura do valor da variável medida/controlada.
- Instrumentos registradores: instrumentos que registram os valores obtidos pela variável medida/controlada.
- Elementos primários: elementos que estão em contato direto com a variável medida/controlada e fornecem ao sistema de medição uma resposta em função da variável medida/controlada.
- Transmissores: instrumentos que, por meio do elemento primário, detectam as variações na variável medida/controlada e produzem uma saída, geralmente, proporcional ao valor dessa variável.
- Conversores: recebem um sinal de entrada e convertem em um sinal de saída modificado. Pode-se citar a conversão de um sinal pneumático em um sinal de 4 a 20 mA.
- Controladores: instrumentos que comparam o valor medido com o valor desejado (*setpoint*) e enviam um sinal de correção para os elementos finais de controle.
- Elementos finais de controle: equipamentos que recebem o sinal de saída do controlador e atuam sobre a variável manipulada.

Com a utilização de todos esses instrumentos, é possível aperfeiçoar o controle do processo, ou aumentar a segurança dos equipamentos e pessoas.

## 2.2 Medição de nível

A medição de nível pode ser definida como a demarcação da posição de uma interface entre dois meios. É uma das variáveis mais comuns e mais utilizadas em aplicações industriais. A seleção do sistema de medição deve considerar vários fatores, como as características específicas da aplicação, tipo de produto cujo nível se quer medir, precisão, custos, entre outros. Por isso, existe grande variedade de sistemas de medição de nível, cada um com suas vantagens e limitações (BEGA, 2010).

Os instrumentos de medição de nível podem ser classificados pela forma como medem o nível, em instrumentos de medida direta e inferencial. Instrumentos de medida direta medem diretamente a distância onde se encontra o fluido a ser medido em relação a um referencial previamente definido. Instrumentos de medida inferencial determinam o nível do fluido pela medida de outra grandeza física a ela relacionada, podendo ser instrumentos que medem a pressão exercida por uma coluna de líquido ou ainda, os que medem por meio da variação de peso do equipamento que contém o fluido (BEGA, 2010).

Na indústria, os transmissores de pressão diferencial são frequentemente utilizados. Como mencionado anteriormente, eles medem a pressão da coluna líquida, ou seja, a diferença de pressão entre a parte superior e inferior do tanque onde se encontra o líquido. O peso da coluna do fluido medido por unidade de área é igual à pressão medida (BEGA, 2010).

A utilização de transmissores de pressão diferencial para fazer a medição de nível tem uma grande vantagem, pois esses instrumentos permitem que a medição seja feita independentemente do formato do tanque, seja ele aberto ou fechado. Além disso, é possível obter os dados medidos do transmissor para tratá-los posteriormente (SMAR, 2019). Quando se utiliza um tanque fechado, uma das desvantagens de se trabalhar com esse transmissor é que a pressão interna pode variar em função de vários fatores, logo, a pressão medida não dependerá apenas do nível. É muito importante subtrair as variações de pressão que não são exercidas pelo nível para se obter um valor correto de indicação (AGUIRRE, 2013).

Na Figura 1, pode-se observar a estrutura de medição de nível para tanques fechados. Neste tipo de arranjo, a parte de baixo do tanque é conectada à câmara de alta pressão do transmissor (2). A pressão em (2) é a soma da pressão exercida sob a superfície do líquido e a pressão exercida pela coluna de líquido no fundo do reservatório. A parte superior do tanque é conectada à câmara de baixa pressão do transmissor (1), onde mede-se somente a pressão exercida sob a superfície do líquido (SMAR, 2019). A relação entre a diferença de pressão e o nível pode ser calculada da seguinte forma

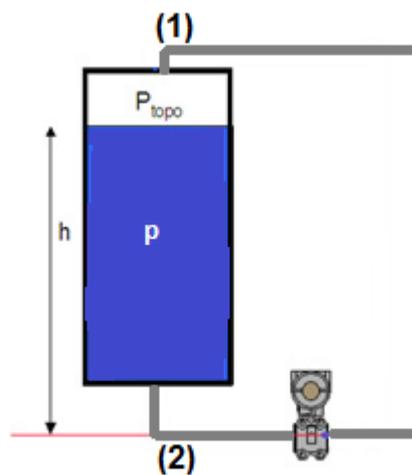
$$\Delta p = p_{high} - p_{low} = h \cdot \rho \cdot g, \quad (2.1)$$

em que  $p_{high}$  representa a pressão na parte inferior do tanque,  $p_{low}$  representa a pressão na parte superior do tanque,  $\Delta p$  é a diferença de pressão medida,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\rho$  a densidade do líquido, e  $h$  o nível.

Isolando  $h$ , obtém-se

$$h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}. \quad (2.2)$$

Figura 1 – Medição de nível por pressão diferencial.



Fonte: elaborada pelo autor.

## 2.3 Atuadores hidráulicos

Os atuadores são dispositivos capazes de produzir um movimento a partir de um sinal de controle. Em geral, são dispositivos mecânicos, elétricos ou eletromecânicos, utilizados para manipular variáveis do processo industrial (FRANZINI et al., 2013).

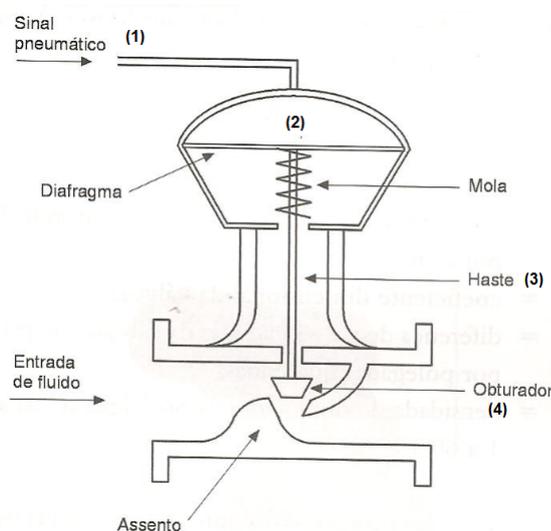
As bombas hidráulicas são atuadores utilizados para transportar líquidos de um ponto a outro em uma planta industrial. Para essas aplicações, geralmente utilizam-se bombas compostas por uma parte mecânica e um motor de indução, que pode ser monofásico ou trifásico. Os motores podem ser acionados no modo ON/OFF, não havendo controle de rotação/vazão, ou em conjunto com um inversor de frequência, que controla eletronicamente a frequência do sinal elétrico utilizado para alimentar os motores e, com isso, permite que a rotação/vazão da bomba seja ajustada.

Válvulas de controle costumam ser utilizadas em conjunto com bombas ON/OFF nas situações em que se deseja controlar a vazão de processos. As válvulas são elementos finais de controle que tem a função de conter o fluido por meio da inserção de uma restrição

mecânica na tubulação. São utilizadas em processos que têm a necessidade de executar tarefas de transferência de fluidos, controle de transferência de calor (energia), redução de pressão etc. (BEGA, 2010).

Uma válvula de controle divide-se, basicamente, em um corpo mecânico e um atuador. O atuador é a parte de um conjunto da válvula que responde ao sinal de saída do controlador de processo, fazendo com que ocorra um movimento de uma restrição mecânica que, por sua vez, resulte em modificação na vazão do fluido pela válvula (ALTMANN, 2005). Os atuadores pneumáticos respondem a um sinal de ar comprimido, movendo o diafragma da válvula para uma posição correspondente ao sinal de pressão aplicado (ALTMANN, 2005). A Figura 2 ilustra uma válvula do tipo globo com atuador pneumático.

Figura 2 – Válvula de controle tipo globo com atuador pneumático.



Fonte: Retirado de Alves (2010).

A válvula com atuador pneumático é constituída por uma entrada (1) e por um obturador (4) conectado a uma haste (3) que abre ou fecha a passagem de fluxo de um fluido. O atuador da válvula consiste em um diafragma (2) conectado à haste e a uma mola. A variação da pressão de ar no diafragma faz com que a haste suba ou desça, controlando a abertura do obturador da válvula. A maioria dos atuadores pneumáticos opera numa faixa de pressão que varia de 3 a 15 PSI, o que equivale a uma variação de 0,2 a 1,0 kgf/cm<sup>2</sup> (BEGA, 2010).

No mercado, podem-se encontrar diferentes tipos de válvulas classificadas de acordo com as características de suas restrições mecânicas. Dentre os modelos mais populares, podem-se destacar as válvulas de gaveta, válvulas borboleta e válvulas globo (BEGA, 2010). As válvulas globo merecem destaque por serem frequentemente utilizadas em aplicações industriais. Estas válvulas podem ser de sede simples ou dupla. São utilizadas para aplicação em casos envolvendo fluidos sem partículas em suspensão. As válvulas de

sede dupla são constituídas por um obturador balanceado e atuadores pequenos, mas têm a desvantagem de permitir um vazamento entre o obturador e a sede. Já as válvulas de sede simples apresentam menor vazamento, mas as forças necessárias para o seu acionamento são maiores.

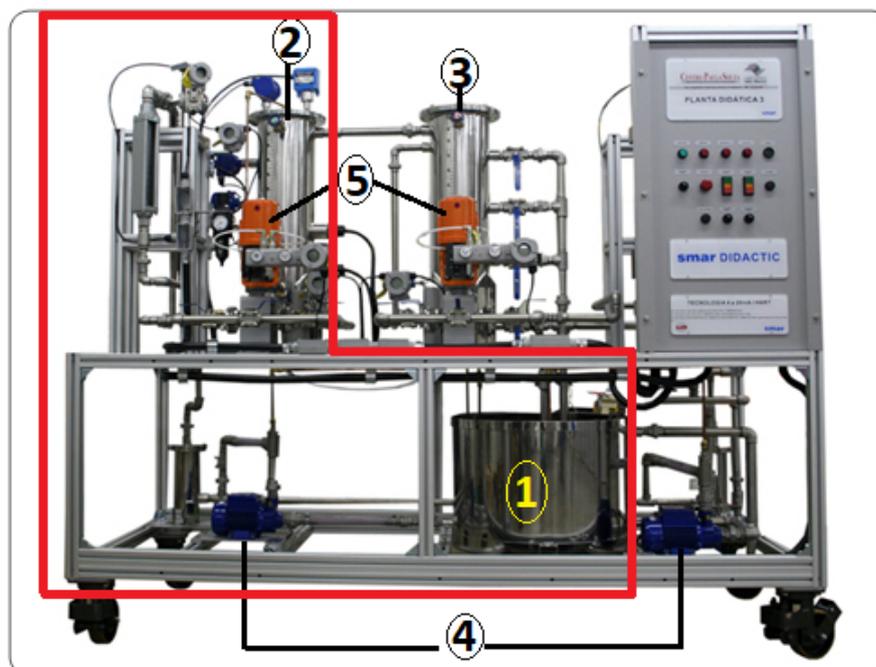
O sistema composto por bomba e inversor de frequência costuma ser utilizado em aplicações nas quais se deseja controlar a vazão ou nível de um fluido sem a necessidade de se inserir uma válvula adicional ao sistema. Para controle de fluxo, a tubulação é ligada em série com a bomba e, por meio do controle da velocidade do motor, é possível ajustar a vazão do líquido. Essa configuração vem sendo muito utilizada atualmente, principalmente pela redução dos preços dos inversores e pela reduzida necessidade de manutenção em comparação com os sistemas que utilizam válvulas (AGUIRRE, 2013).

## 2.4 Planta didática SMAR PD3-F

A planta didática SMAR PD3-F foi desenvolvida para simular sistemas industriais, utilizados para controlar vazão, nível e temperatura de líquidos. Com ela, é possível simular diversas malhas de controle que reproduzem características semelhantes às encontradas no mercado de trabalho. Além disso, por ser um sistema compacto, é possível alterar com facilidade a malha de controle por meio da manipulação de válvulas manuais, sem a necessidade de alterações na estrutura física da planta (SMAR, 2016a).

Os instrumentos de medição e atuadores presentes na planta estão conectados a um controlador através de uma rede Fieldbus, que pode ser acessada remotamente por um módulo de comunicação. Essas informações podem ser monitoradas por um computador utilizando um *software* supervisor, o System 302, que também permite um controle remoto dos atuadores. A Figura 3 mostra a Planta Didática Smar.

Figura 3 – Planta Didática Smar PD3-F. Em destaque, tem-se o reservatório de água (1), o tanque de aquecimento (2), o tanque de mistura (3), as duas bombas existentes na planta (4) e as válvulas pneumáticas utilizadas para controle de vazão e nível (5).

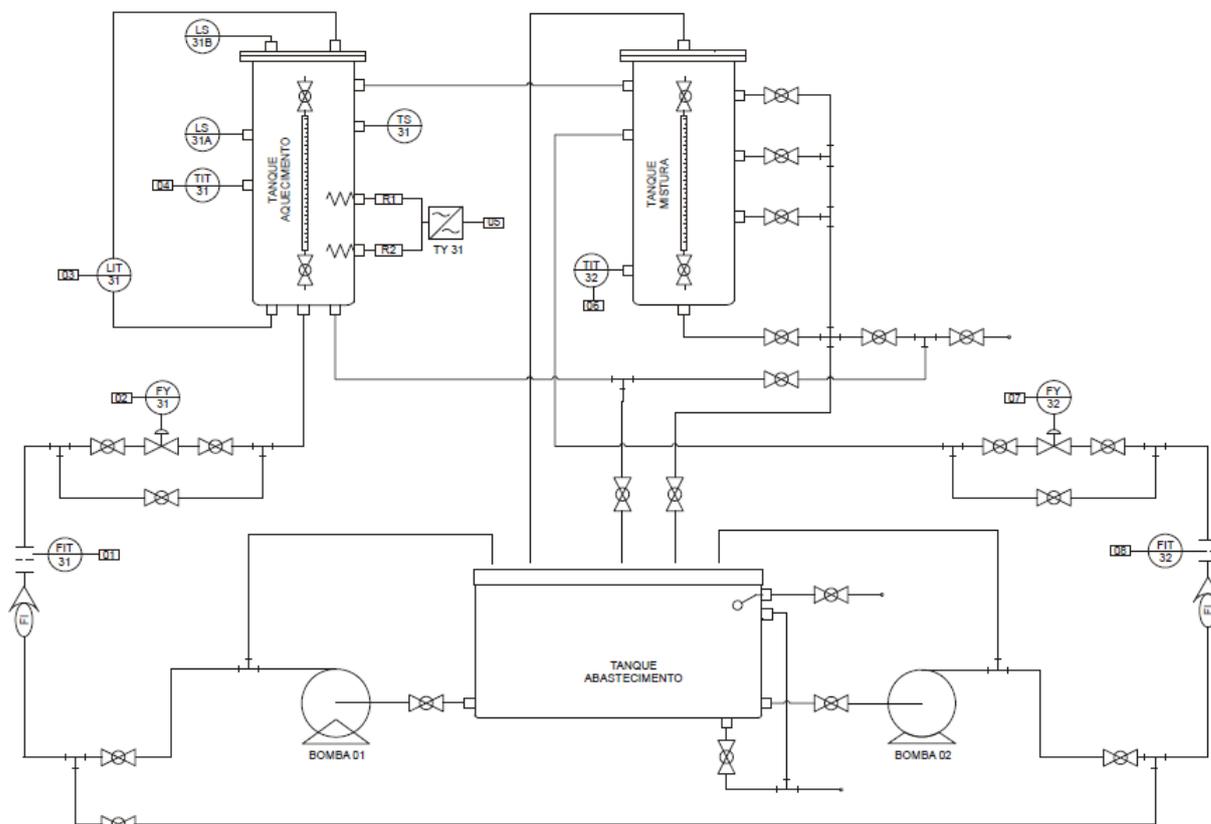


Fonte: Retirado de Smar (2016a).

A região destacada em vermelho na Figura 3, apresenta os equipamentos que são utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Por meio dessa malha, é possível fazer o controle de nível utilizando apenas uma das bombas e uma válvula pneumática, como será descrito na Seção 2.5.

A Figura 4 mostra o diagrama P&I da planta, com símbolos representados pela norma ISA 5.1. Cada instrumento é identificado por um conjunto de letras e números, sendo as letras responsáveis por identificar a variável medida pelo instrumento (temperatura, vazão, nível etc.), e a sua função (indicador, controlador, registrador etc.). Os números são utilizados para indicar o número da malha de controle em que está localizado o instrumento ou atuador. A Planta Didática SMAR PD3-F possui duas malhas de controle, a malha 31 (utilizada neste trabalho) e a malha 32.

Figura 4 – Diagrama P&amp;I da planta didática SMAR PD3-F



Fonte: Retirado de Smar (2016a).

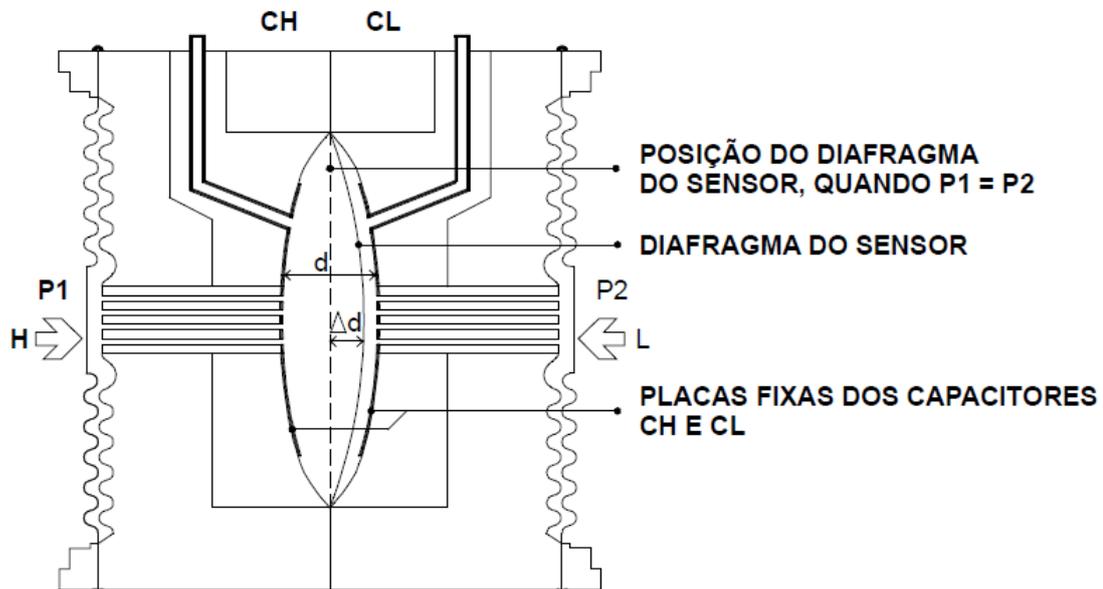
## 2.5 Sistema de controle de nível

Como mencionado anteriormente, a malha 31 é utilizada para simular um sistema de controle de nível. A malha é composta por sensores e atuadores que permitem a medição e o controle de várias grandezas de um sistema hidráulico tradicional, tais como vazão, nível e temperatura. A seguir, são apresentados alguns dos dispositivos presentes na malha 31.

### 2.5.1 Indicador e transmissor de nível (LIT-31)

Instrumento indicador e transmissor utilizado para medir o nível do tanque de aquecimento da planta. A medição do nível é feita de forma indireta, por meio da medição da diferença de pressão entre dois pontos do tanque. Para mensurar a pressão, utiliza-se um sensor capacitivo, que apresenta variações em sua capacitância à medida que a pressão aplicada nos diafragmas varie. Internamente, o instrumento monitora os valores de capacitância e os converte em valores percentuais de nível, que são mostrados no *display* do equipamento (SMAR, 2016b). A célula capacitiva é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 – Célula capacitiva do transmissor de pressão



Fonte: Retirado de Smar (2016b).

Onde:

- $P1$  e  $P2$  são as pressões aplicadas nas câmaras H e L;
- $CH$  é a capacitância medida entre a placa fixa do lado de  $P1$  e o diafragma do sensor;
- $CL$  é a capacitância medida entre a placa fixa do lado de  $P2$  e o diafragma do sensor;
- $d$  é a distância entre as placas fixas de CH e CL;
- $\Delta d$  é a deflexão sofrida pelo diafragma do sensor devido à aplicação de pressão diferencial  $\Delta P = P1 - P2$ .

Em função da área ( $A$ ) das placas, distância ( $d$ ) e constante dielétrica ( $\epsilon$ ), a fórmula de capacitância de um capacitor de placas planas e de mesma área é expressa por

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}, \quad (2.3)$$

logo, conhecendo-se os valores da capacitância, é possível utilizar a expressão 2.3 para calcular o valor percentual do nível do tanque (SMAR, 2016b). A Figura 6 ilustra o transmissor de pressão da planta.

Figura 6 – Transmissor de pressão LD302



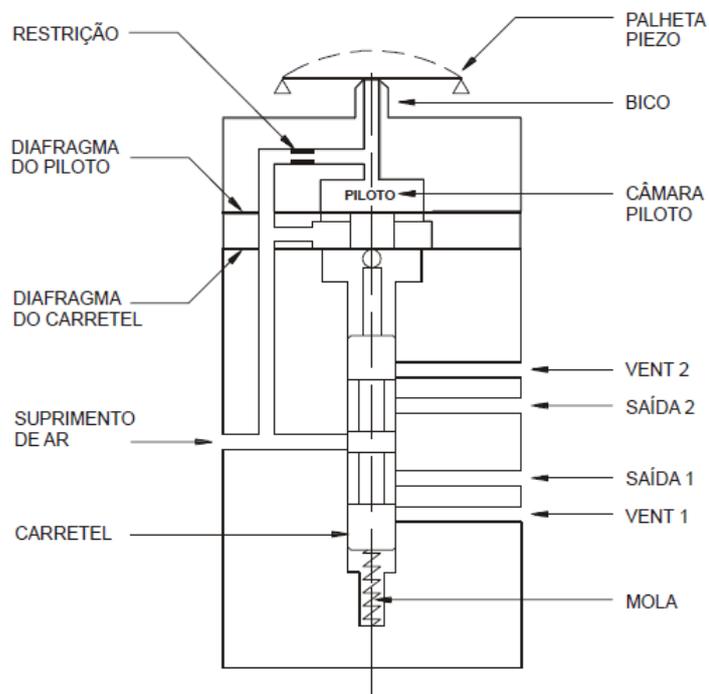
Fonte: Retirado de Smar (2011).

### 2.5.2 Posicionador inteligente de válvulas (FY-31)

Esse dispositivo é utilizado para fazer o posicionamento do atuador que controla a abertura da válvula de controle. O posicionador utiliza um controlador de posição que recebe a informação da porcentagem de abertura desejada para a válvula através da rede de comunicação Fieldbus, e atua para ajustar a posição de abertura da válvula de acordo com o valor definido de entrada.

A Figura 7 apresenta o diagrama esquemático do atuador pneumático FY-31. Inicialmente, um disco piezoelétrico (palleta disco) produz uma deflexão em resposta a uma tensão elétrica aplicada por um controlador em resposta a um valor de *setpoint* definido pelo usuário. Essa deflexão provoca uma obstrução no bico, alterando a pressão que atinge a câmara piloto (pressão piloto). A pressão da câmara piloto atinge o diafragma piloto, que também sofre deflexão e atinge o diafragma do carretel. Trata-se de um processo mecânico para multiplicar a força gerada pelo atuador piezoelétrico de forma a permitir o controle do carretel, que é a peça responsável por controlar a abertura da válvula globo utilizada pela planta (SMAR, 2015).

Figura 7 – Esquema do transdutor pneumático



Fonte: Retirado de Smar (2015).

Por meio desse instrumento, é possível fazer o controle de líquido que passa pela tubulação e entra no tanque de aquecimento. A Figura 8 apresenta uma foto do dispositivo em questão.

Figura 8 – Posicionador de válvula



Fonte: Retirado de Smar (2011).

### 2.5.3 Bombas hidráulicas

A Planta Didática SMAR PD3-F possui duas bombas hidráulicas responsáveis por controlar o processo de circulação de água por meio das malhas de controle: uma bomba monofásica (HYDRO-BLOC P500) e uma bomba trifásica (HYDROBLOC P500T). Realizando a abertura e o fechamento de algumas válvulas manuais, é possível definir qual bomba será utilizada por cada malha. Neste trabalho, optou-se por utilizar a bomba hidráulica monofásica para controlar o fluxo de água injetado no tanque de aquecimento da planta didática. Os dados de placa do motor utilizado por essa bomba podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 – Especificações da bomba monofásica HYDROBLOC P500



Fonte: elaborada pelo autor.

### 2.5.4 Plataforma de controle e automação de processos

Para realizar toda a comunicação dos instrumentos com a CPU, é necessário utilizar vários módulos em conjunto. Na planta SMAR PD3-F, a plataforma de controle e automação de processos (DFI302) possibilita a comunicação e aquisição de dados de processo com os equipamentos. Essa plataforma é composta basicamente por fontes de alimentação, controladores e módulos casadores de impedância para as linhas de comunicação (SMAR, 2016c). Uma imagem desta plataforma pode ser vista na Figura 10.

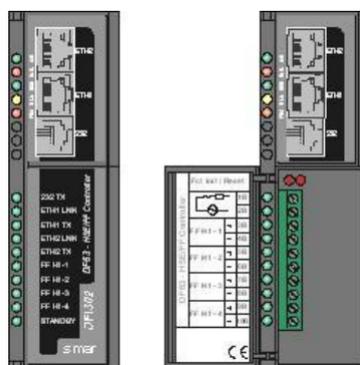
Figura 10 – Plataforma de controle e automação de processos - DFI302



Fonte: Retirado de Smar (2016a).

O módulo controlador utilizado é o DF63, que possui comunicação Modbus, funções de *gateway* entre redes H1 independentes e redes HSE, e pode ser programado utilizando a linguagem Ladder. Esse módulo recebe/envia dados para um computador através de uma rede FOUNDATION™ Fieldbus HSE, baseado em Ethernet (IEEE802.3-2000, ISO/IEC8802.3-2000), e recebe/envia dados para instrumentos de campos através de uma rede FOUNDATION™ Fieldbus H1 (SMAR, 2016a). Um diagrama do controlador pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Módulo controlador - DF63



Fonte: Retirado de Smar (2016c).

Vale ressaltar que o módulo DF63 pode ser utilizado através da plataforma OPC, o que torna esse equipamento flexível o bastante para se conectar a vários pacotes de supervisão compatíveis com a plataforma OPC Smar (2016c).

## 2.6 Rede *FOUNDATION Fieldbus*

*FOUNDATION Fieldbus* é uma rede de comunicação digital que opera em tempo real, projetada especificamente para aplicações de controle de processo.

Esse tipo de rede é capaz de operar com equipamentos de menor dimensão em comparação com outros tipos de tecnologia utilizados em processos de automação industrial, e fornece uma solução totalmente digital para monitoramento e controle de instrumentos e atuadores. Além disso, o protocolo *Foundation Fieldbus* surge com o intuito de substituir protocolos de comunicação proprietários usados anteriormente por outros fabricantes. A comunicação é sincronizada no tempo e programada para garantir o controle digital de *loop* fechado determinístico. Vários dispositivos, cada um com vários sinais de E/S, compartilham o mesmo barramento (FIELDCOMM GROUP, 2019).

Algumas vantagens da utilização dessa tecnologia são:

- *Control-in-the-field* (comunicação dispositivo a dispositivo);
- Controle de malha fechada (*feedback* do sensor);
- Cabeamento reduzido (vários dispositivos por cabo);
- Tamanho reduzido do sistema (menos placas de E/S, dispositivos, bandeja de cabos, etc.);
- Comissionamento mais rápido (comparado às abordagens tradicionais);
- Restrições de controle mais rigorosas (via controle no campo).

As primeiras versões da tecnologia especificam duas opções para a camada física: H1 e H2.

A camada H1 é voltada para equipamentos de campo, como transmissores, posicionadores de válvula etc., com uma taxa transferência de dados de 31.25 Kbits/s. Sua alimentação e comunicação dão-se pelo mesmo meio físico, um par traçado blindado, que utiliza uma tensão de, no mínimo, 9 volts para funcionar. O comprimento dos cabos pode chegar a 1900 metros, sendo possível utilizar até quatro repetidores, algo que permite um alcance de 7600 metros (SMAR, 2008).

A primeira versão da camada física H2, com taxa de transferência de dados variando entre 1 a 2,5 Mbps, foi utilizada para integrar controladores e equipamentos mais complexos. Com a rápida evolução das aplicações, a camada H2 foi substituída pela camada HSE, que permite a utilização de rede Ethernet a 100 Mbps e é recomendada para conexão entre Controladores Lógicos Programáveis, *Linking Devices*, *Gateways* e PC. A distância recomendada para sua utilização é de 100 metros, mas a possibilidade de se enviar dados através de uma rede de internet industrial torna esse sistema de comunicação mais flexível do que seu anterior (SMAR, 2008).

## 2.7 Plataforma OPC: *Open Platform Communication*

O termo OPC, inicialmente definido como *OLE for Process Control* e atualmente definido como *Open Platform Communication*, refere-se ao padrão de interoperabilidade desenvolvido pela *OPC Foundation* para a troca segura e confiável de dados no espaço de automação industrial. Ele é independente de plataforma e garante o fluxo contínuo de informações entre dispositivos de vários fornecedores (OPC FOUNDATION, 2019b).

O padrão OPC é composto por uma série de especificações desenvolvidas por fornecedores do setor, usuários finais e desenvolvedores de *software*. Essas especificações definem uma interface para comunicação entre clientes e servidores, e entre servidores e servidores, incluindo acesso a dados em tempo real, monitoramento de alarmes e eventos, acesso a dados históricos e outros aplicativos (OPC FOUNDATION, 2019b).

Quando o padrão foi lançado em 1996, seu propósito era abstrair protocolos específicos de um PLC (como Modbus, Profibus etc.) em uma interface padronizada, permitindo que os sistemas IHM/SCADA operassem utilizando uma interface intermediária, responsável por converter as informações de leitura/gravação do OPC para solicitações específicas do dispositivo PLC e vice-versa. A utilização desse protocolo permitiu que os usuários finais pudessem desenvolver sistemas complexos usando produtos de diferentes fabricantes (OPC FOUNDATION, 2019b).

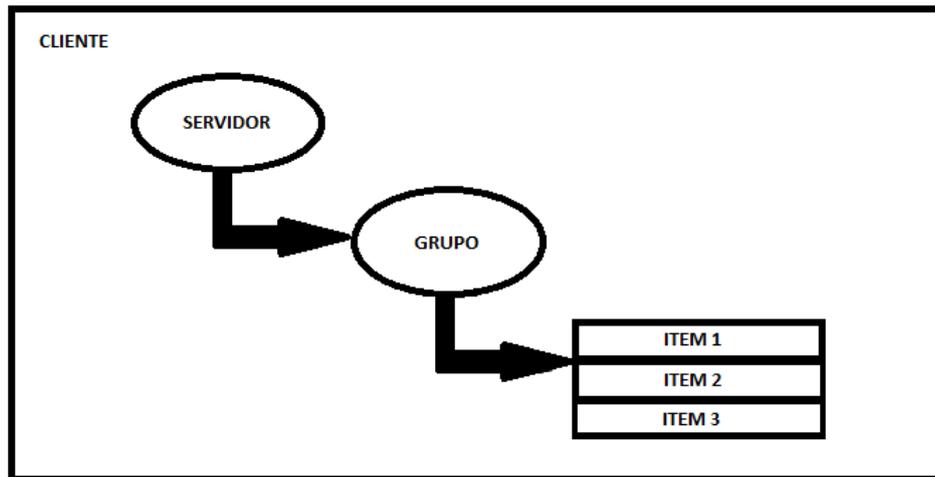
Inicialmente, o padrão OPC era restrito ao sistema operacional *Windows*. Devido a isso, o acrônimo OPC faz referência à OLE, *Object Linking and Embedding* (vinculação e incorporação de objetos) para o controle de processos. Essas especificações, atualmente conhecidas como OPC Classic, tiveram ampla adoção em vários setores, incluindo automação predial e industrial (OPC FOUNDATION, 2019b).

Com a introdução de arquiteturas orientadas a serviços em sistemas de manufatura, surgiram novos desafios em segurança e tratamento de dados. Para atender essa necessidade, a *OPC Foundation* desenvolveu, então, as especificações OPC UA e, ao mesmo tempo, forneceu uma arquitetura de plataforma aberta com tecnologia rica em recursos que foi preparada para o futuro, de forma escalável e extensível. Após essas modificações, a plataforma OPC passou a ser chamada de plataforma aberta de comunicação (*Open Platform Communications*) (OPC FOUNDATION, 2019b).

### 2.7.1 Arquitetura da Plataforma OPC

Um cliente OPC é composto de três objetos: o servidor, o grupo e o item. Essa estrutura pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 – Arquitetura do protocolo OPC.



Fonte: elaborada pelo autor.

O servidor armazena informações de configuração e dados referentes aos objetos do grupo. Os grupos armazenam parâmetros de configuração e fornecem mecanismos para conter e organizar cada um dos itens (OPC FOUNDATION, 2019a). Dessa forma, os grupos fornecem uma maneira para os clientes organizarem os dados. Como exemplo, o grupo pode representar itens em uma exibição ou relatório de operador específico, cujos dados podem ser lidos e/ou escritos. Existem dois tipos de grupos, públicos e locais (ou privados). Os grupos públicos são utilizados para compartilhar dados entre vários clientes, enquanto os locais são utilizados para armazenamento de dados para apenas um cliente (OPC FOUNDATION, 2019a).

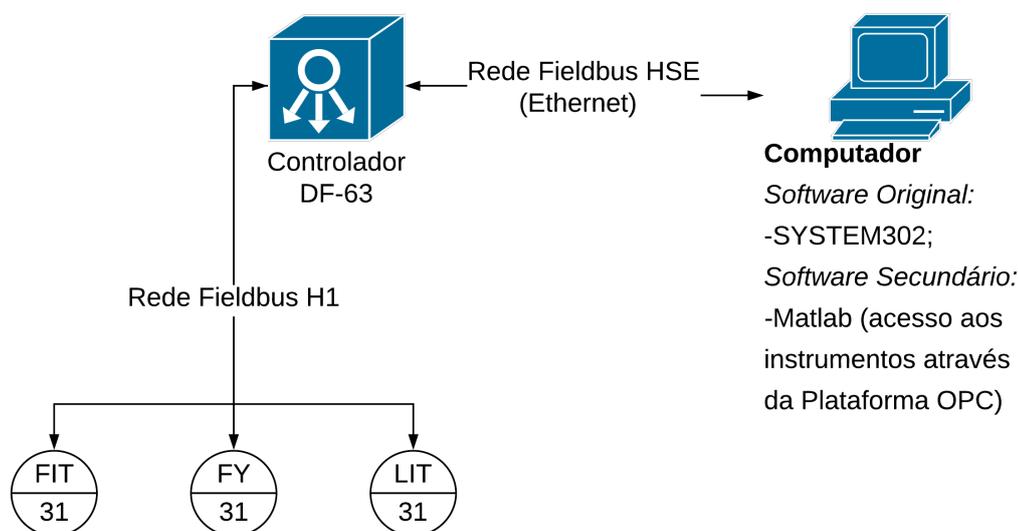
Dentro de cada grupo, o cliente pode definir um ou mais itens. Os itens representam conexões com fontes de dados no servidor. Um item, da perspectiva da interface personalizada, não é acessível como um objeto por um cliente. Portanto, não há interface externa definida para um item. Todo o acesso aos itens é feito por meio de um objeto do grupo que contém o item, ou simplesmente onde o item está definido. Cada item possui um valor, um indicador de qualidade e um selo de tempo associado (OPC FOUNDATION, 2019a).

Note que os itens não são as fontes de dados, são apenas conexões. Dessa forma, as definições das tags utilizadas para endereçar cada item de um sistema existem independentemente de um cliente estar acessando-as ou não (OPC FOUNDATION, 2019a).

## 2.8 Topologia da Rede de Comunicação da Planta Didática SMAR PD3-F

A Figura 13 apresenta um diagrama que ilustra as redes de comunicação utilizadas pela planta didática PD3-F, indicando como acontece a comunicação entre instrumentos/atuadores com o controlador, e também entre o controlador e o computador utilizado para supervisão do processo.

Figura 13 – Topologia da rede de comunicação.



Fonte: elaborada pelo autor.

Conforme já mencionado, a rede de comunicação utilizada para conectar instrumentos/atuadores e controlador é baseada no protocolo *FOUNDATION Fieldbus*, com uma camada física H1, ao passo que a comunicação entre o computador e o controlador DF-63 é realizada pela Rede Fieldbus HSE (Ethernet).

Dessa forma, o controlador DF-63 recebe as informações da CPU via Fieldbus HSE e envia aos instrumentos via Fieldbus H1. De maneira análoga, os instrumentos enviam informações para o controlador via Fieldbus H1, e o controlador repassa essa informação ao computador via Fieldbus HSE.

O acesso aos dados do controlador é feito através de um *software* proprietário desenvolvido pela SMAR, chamado System 302, que também possui um servidor de configuração e supervisão OPC. O servidor OPC pode ser acessado por *softwares* desenvolvidos por outros fabricantes, possibilitando a integração de sistemas desenvolvidos por diferentes empresas. Neste trabalho, esse recurso foi utilizado para integrar os instrumentos ao *software* MATLAB através do OPC Toolbox, permitindo que fossem realizadas operações de leitura e escrita nos sensores e atuadores que compõe a planta.

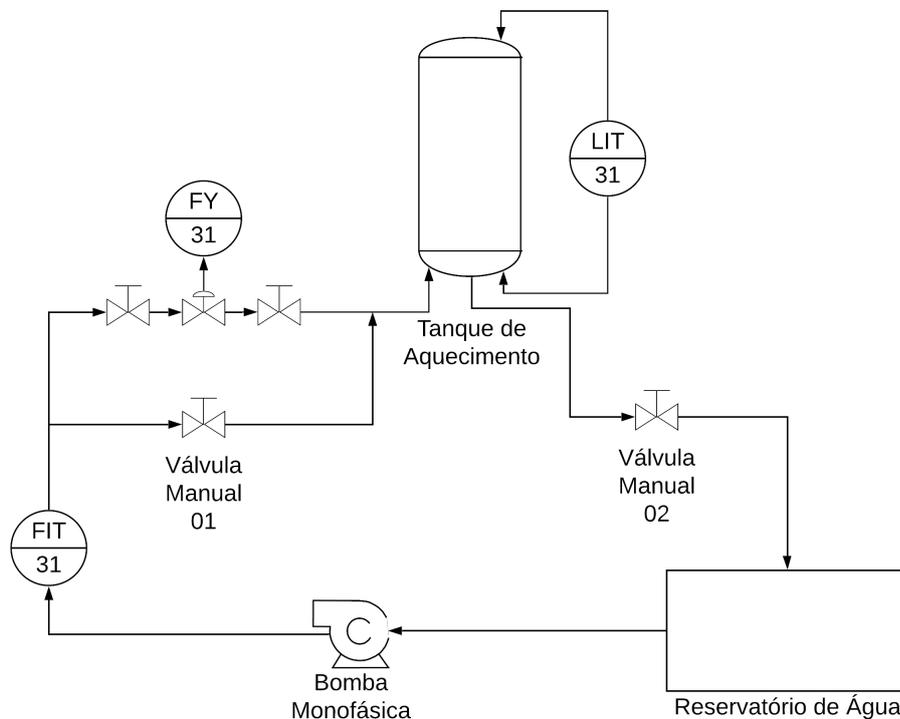
### 3 Materiais e Métodos

Inicialmente, foram realizados testes preliminares na planta didática, a fim de verificar se os equipamentos estavam funcionando corretamente. Para isso, utilizou-se o *software* System 302 e um template fornecido pelo fabricante com um exemplo de aplicação envolvendo a leitura/escrita de dados nos sensores e atuadores presentes na planta.

Como já mencionado, a planta contém duas malhas distintas: a 31 e a 32. Como o objetivo do trabalho é controlar o nível do tanque presente na malha 31, foi necessário isolar a malha 32 por meio da manipulação de algumas válvulas manuais.

Na Figura 14, é possível observar a parte da planta que foi utilizada, representada através de um diagrama simplificado. Neste trabalho, os equipamentos utilizados foram a bomba monofásica, o medidor de vazão FIT-31, a válvula de controle FY-31, a válvula manual 01 (que se encontra em paralelo com a válvula de controle), o medidor de nível LIT-31 e a válvula manual 02 (conectada na saída do tanque de aquecimento, responsável por restringir a quantidade de água que retorna para o reservatório).

Figura 14 – Ilustração para o sistema de controle de nível do tanque de aquecimento.



Fonte: elaborada pelo autor.

Após verificar que a planta estava funcionando corretamente, foram realizados ajustes nas válvulas manuais 01 e 02 a fim de garantir que o nível do tanque de aquecimento variasse entre 0 e 100%. Para isso, a válvula de controle FY-31 e a válvula manual 01 foram abertas em 100%, a bomba monofásica foi ligada. Em seguida, a válvula manual 02 foi ajustada de modo a garantir que o nível do tanque de aquecimento não ultrapassasse o valor de 100% indicado por uma régua de medição posicionada ao lado do tanque. Esse ajuste garante que o nível do tanque não irá ultrapassar o valor máximo, independentemente do percentual de abertura da válvula de controle FY-31.

Devido à válvula manual 02 não possuir um *display* ou indicador para mostrar qual era o valor de abertura da mesma, foi feita uma marca com pincel para identificar a posição em que a válvula foi colocada. Essa abertura foi mantida ao longo de todo o trabalho, pois qualquer variação na abertura influencia a vazão de saída do tanque e, conseqüentemente, o nível.

Por questões construtivas, o sensor de nível LIT-31 foi instalado numa posição abaixo do fundo do tanque de aquecimento e como já mencionado, esse instrumento mede o nível percentual da coluna de líquido por meio da relação entre a diferença de pressão medida em dois pontos distintos. Isso faz com que o valor informado pelo sensor indique um percentual negativo nas situações em que o tanque está vazio.

Para resolver o problema, após ajustar a válvula manual 02, foi necessário ajustar a válvula manual 01 para que um nível mínimo de água permanecesse no tanque. O ajuste foi realizado de modo a garantir uma indicação de 0% no sensor LIT-31. Durante o ajuste da válvula manual 01, a válvula de controle FY-31 permaneceu fechada. Com isso, garante-se que quando a válvula FY-31 está fechada, o nível do tanque de aquecimento permanece em 0%, e quando a válvula FY-31 está aberta, o nível do tanque de aquecimento é ajustado em 100%.

### 3.1 Acesso à planta via Matlab

Todo o processo de configuração, operação e supervisão da planta é realizado a partir do *software* System 302. O programa desenvolvido é armazenado no controlador DF63, responsável por gerenciar os sensores e atuadores presentes na planta (SMAR, 2016a). O System 302 também gerencia um servidor OPC, que armazena todas as informações de entrada e saída relacionadas aos instrumentos envolvidos nas operações de monitoramento e controle da planta.

O Matlab foi utilizado justamente para acessar os dados armazenados no servidor OPC. Para isso, o OPC Toolbox foi utilizado para permitir que os dados de entrada/saída dos sensores e atuadores fossem lidos/escritos pelo Matlab. A principal vantagem de se utilizar essa técnica é que os equipamentos passam a ser manipulados por variáveis em ambiente Matlab. Utilizando essa técnica, é possível modelar o sistema por diferentes

técnicas de identificação, uma vez que é possível controlar o sinal aplicado na entrada da válvula de controle FY-31 da maneira desejada. Além disso, é possível validar o modelo obtido e/ou o controlador proposto de maneira análoga.

Para iniciar o processo de comunicação entre Matlab e servidor OPC, primeiramente, foi necessária a definição do servidor ou objeto e por meio da função ‘opcda’. A função utilizada tem a seguinte sintaxe:

$$\text{Obj} = \text{opcda}(\text{'Host'}, \text{'ServerID'}).$$

Essa função constrói um objeto OPC data access (opcda), de nome Obj, para o host (máquina ou computador conectado a uma rede) especificado por Host, e o ID do servidor OPC especificado por ServerID. Ao construir um Obj, seu valor inicial da propriedade Status é ‘desconectado’. Para se comunicar com o servidor, deve-se conectar o Obj ao servidor utilizando a função ‘connect (Obj)’.

Após criar e conectar o objeto, é necessário adicionar um grupo para os instrumentos da rede por meio da função ‘addgroup’. A sintaxe da função utilizada é definida por:

$$\text{GrpObj} = \text{addgroup}(\text{Obj}).$$

Essa função adiciona um grupo ao objeto Obj do opcda. Um grupo é uma unidade de armazenamento para um cliente organizar e manipular itens de dados. Normalmente, são criados grupos diferentes para suportar diferentes taxas de atualização, *status* de ativação, retornos de chamada, etc.

Por fim, devem-se adicionar os instrumentos que fazem parte do grupo criado. A função ‘additem’ faz a adição dos instrumentos no grupo, e sua sintaxe é definida por:

$$\text{ItemObj} = \text{additem}(\text{GrpObj}, \text{'TAG'}).$$

Essa função adiciona itens ao grupo GrpObj por meio dos TAGs (identificadores) de itens fornecidos pelos fabricante dos instrumentos. É possível especificar TAGs para identificar um item único ou como uma matriz de células de identificadores de itens. Vale lembrar que cada instrumento pode ter mais de uma TAG, conforme sua característica, e pode existir TAGs para saída, entrada, valor, etc.

Por meio das três funções citadas, é possível acessar os instrumentos da planta. Em anexo, é possível verificar todo o código utilizado para acesso aos equipamentos.

## 3.2 Modelagem do sistema

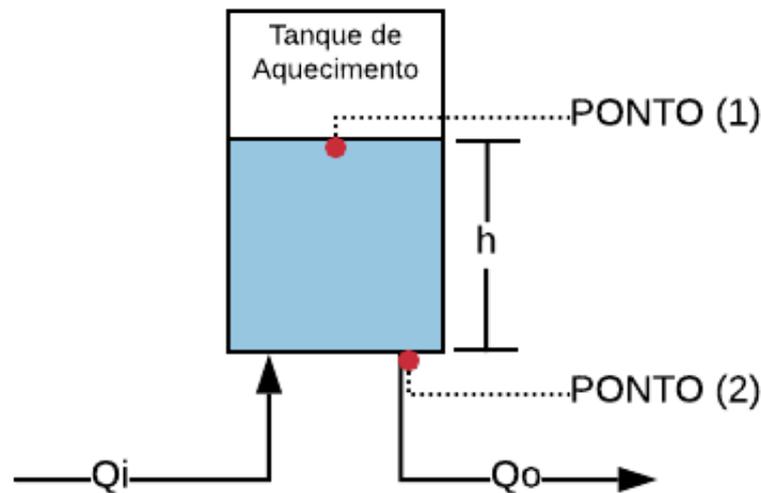
Nessa seção serão apresentadas as técnicas de modelagem utilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

### 3.2.1 Modelo Caixa Branca

Na modelagem caixa branca, é necessário conhecer a fundo o sistema a ser modelado, bem como as leis físicas que o descrevem. Para poder encontrar um modelo, teoricamente, é necessário conhecer certos parâmetros do processo descritos a partir de princípios físicos e químicos (AGUIRRE, 2004).

Para o estudo do tanque de aquecimento, foram utilizados conceitos relacionados à mecânica dos fluidos. A Figura 15 apresenta uma representação esquemática do sistema do tanque da planta.

Figura 15 – Representação das leis que atuam no sistema. Na Figura,  $Q_i$  representa a vazão de entrada,  $Q_o$  a vazão de saída e  $h$  a altura da coluna d'água.



Fonte: elaborada pelo autor.

Definindo inicialmente  $h_1$ ,  $v_1$  e  $p_1$  como altura, velocidade e pressão do fluido no ponto 1, e  $h_2$ ,  $v_2$  e  $p_2$  como altura, velocidade e pressão do fluido no ponto 2, pode-se relacionar o ponto 1 e o ponto 2 pela lei de conservação de energia ao fluido descrita pela equação de Bernoulli (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009):

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2. \quad (3.1)$$

Pela lei da conservação de massa, sabe-se que a variação de volume em um tanque é igual à diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída, ou seja

$$q_i - q_o = \frac{dV}{dt}, \quad (3.2)$$

em que  $V$  é o volume do tanque.

Assumindo que o tanque é fechado, no ponto 1 considera-se:

- $v_1 = 0$ , pois  $v_2$  é muito maior que  $v_1$ ;
- $h_1 =$  valor existente;
- $p_1 = p_2$ , pois é considerado que dentro do tanque não existe nenhuma perda de pressão, apenas conversão de pressão estática em pressão dinâmica.

Enquanto que no ponto 2, têm-se:

- $v_2 =$  valor existente;
- $h_2 = 0$ , pois é o valor de referência;
- $p_2 = p_1$ , pois é considerado que dentro do tanque não existe nenhuma perda de pressão, apenas conversão de pressão estática em pressão dinâmica.

Logo, simplificando a 3.1 e isolando  $v_2$ , tem-se

$$v_2 = \sqrt{2gh_1}. \quad (3.3)$$

Sendo  $q_o = v_2.A_2$ , em que  $A_2$  é a área da seção transversal da tubulação de saída, pode-se escrever a 3.3 em função de  $q_o$

$$q_o = A_2 \cdot \sqrt{2gh_1}. \quad (3.4)$$

Utilizando a fórmula de volume de um tanque cilíndrico ( $V = A_1 \cdot h_1$ ) e realizando a junção da fórmula com as Equações 3.2 e 3.4, tem-se o resultado uma equação diferencial que possa relacionar a vazão de entrada com o nível do tanque

$$A_1 * \frac{dh_1}{dt} = q_i - A_2 * \sqrt{2gh_1}. \quad (3.5)$$

Observando a Equação 3.5, percebe-se que a fórmula se tornou muito complexa para se deixar em função de  $q_i$  e  $h_1$ , até mesmo para realizar a transformada de Laplace, por ser uma equação diferencial não linear. Em vista disso, a solução foi a linearização da equação em torno de um ponto de operação por meio da série de Taylor.

Organizando a equação, a função  $f$  é

$$f(q_i, h_1) = \dot{h}_1 = \frac{q_i}{A_1} - \frac{A_2}{A_1} \sqrt{2g} \sqrt{h_1}, \quad (3.6)$$

Expandindo em série de Taylor, realizando a linearização em torno de um ponto de operação ( $q_{io}$  e  $h_{1o}$ ), tem-se

$$\dot{h}_1 \approx \dot{h}_{1o} + \left. \frac{\partial f}{\partial h_1} \right|_{\substack{h_1=h_{1o} \\ q_i=q_{io}}} (h_1 - h_{1o}) + \left. \frac{\partial f}{\partial q_i} \right|_{\substack{h_1=h_{1o} \\ q_i=q_{io}}} (q_i - q_{io}), \quad (3.7)$$

em que  $\Delta \dot{h}_1 = \dot{h}_1 - \dot{h}_{1o}$ ,  $\Delta h_1 = h_1 - h_{1o}$  e  $\Delta q_i = q_i - q_{io}$ .

Efetuada as derivadas e substituições, obtêm-se

$$\Delta \dot{h}_1 \approx -\frac{1}{2} \frac{A2}{A1} \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{h_{1o}}} \Delta h_1 + \frac{1}{A1} \Delta q_i, \quad (3.8)$$

$$\Delta \dot{h}_1 \approx -a \Delta h_1 + b \Delta q_i, \quad (3.9)$$

em que  $a = \frac{1}{2} \frac{A2}{A1} \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{h_{1o}}}$ ;  $b = \frac{1}{A1}$ .

Por meio da Equação 3.9, percebe-se que a equação foi linearizada e agora é possível fazer a transformada de Laplace para encontrar uma função de transferência correspondente. A dedução final para a modelagem caixa branca do sistema de nível do tanque de aquecimento da planta e a função de transferência resultante são

$$s \Delta H_1 = -a \Delta H_1 + b \Delta Q_i, \quad (3.10)$$

$$\frac{\Delta H_1}{\Delta Q_i} = \frac{b}{s + a} = \frac{b/a}{\frac{1}{a}s + 1}. \quad (3.11)$$

### 3.2.2 Método Caixa Preta

O método caixa preta permite que a função de transferência (FT) de um sistema possa ser obtida, experimentalmente, através da relação entre os dados de entrada e saída do sistema que se deseja representar. Para isso, podem-se utilizar métodos determinísticos, que não levam em consideração os ruídos existentes nos dados (AGUIRRE, 2004).

Após a excitação do sistema utilizando um sinal de entrada conhecido e aquisição dos dados de saída, pode-se observar se a relação entre dados de entrada e saída é linear ou não. Alguns sistemas lineares podem ser representados por meio de equações diferenciais de primeira ordem e representados no domínio da frequência por uma expressão do tipo:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}, \quad (3.12)$$

em que  $K$  representa o ganho do sistema e  $\tau$  representa a constante de tempo.

Num sistema de primeira ordem, os valores do ganho e da constante de tempo podem ser obtidos aplicando um sinal do tipo degrau na entrada e analisando a curva de saída obtida. Para isso, devem-se utilizar as expressões:

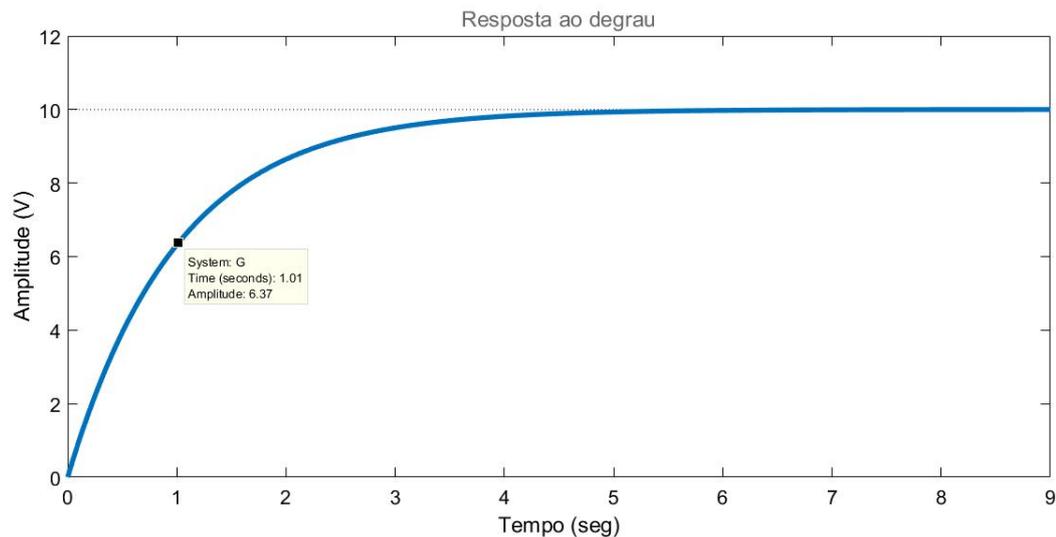
$$K = (y(\infty) - y(0^+))/A, \quad (3.13)$$

$$y(\tau) = 0.632(y(\infty) - y(0^+)) + y(0^+), \quad (3.14)$$

em que  $y(\infty)$  representa o valor em regime permanente de  $y(t)$ ,  $y(0^+)$  representa valor de  $y$  no instante inicial e  $A$  representa a amplitude do degrau (AGUIRRE, 2004).

A Figura 16 ilustra a análise do gráfico utilizando o método citado. O formato de curva é característico de uma função de transferência de primeira ordem e, por meio dela, pode-se obter os valores de ganho ( $K$ ) e constante de tempo ( $\tau$ ) citados anteriormente. A FT utilizada para esse exemplo continha os valores de  $K = 10$  e  $\tau = 1$ .

Figura 16 – Resposta ao degrau unitário de uma função de transferência de primeira ordem.



Fonte: elaborada pelo autor.

Como já mencionado, o objetivo deste trabalho é controlar o nível de um dos tanques presentes na planta. Para isso, utilizando a malha de controle 31, ajustou-se a bomba monofásica em modo ON, definiu-se um valor percentual para abertura da válvula de controle FY-31 e monitorou-se o nível do tanque de aquecimento com o sensor LIT-31. Ao longo desse processo, foram utilizados 4 valores percentuais de abertura para a válvula FY-31 distintos: 25%, 50%, 75% e 100%. Para validar os resultados obtidos, as medições foram feitas três vezes para os mesmos *setpoints*.

Além dos valores de nível do tanque, também foram coletados os dados do controlador que ajusta a abertura da válvula de controle FY-31, com o objetivo de analisar sua precisão. Cada curva de nível obtida a partir dos ensaios foi utilizada para gerar uma função de transferência diferente.

Como já citado na seção anterior, a função de transferência de um sistema de controle de nível é não linear. Uma estratégia bastante utilizada para simplificar esse tipo de problema é linearizar o modelo obtido em torno de um ponto de operação. Para encontrar esse ponto, foram utilizadas as quatro funções de transferência obtidas nos ensaios descritos anteriormente. Com isso, foi possível encontrar uma função de transferência de

primeira ordem capaz de representar o comportamento do nível do tanque a partir de uma variação percentual da abertura da válvula FY-31 em torno de um ponto de operação predeterminado.

### 3.3 Controladores PID

Um sistema de controle é definido como uma interconexão de componentes que produzirá uma resposta do sistema, e pode ser implementado em malha aberta ou fechada (DORF; BISHOP, 2014).

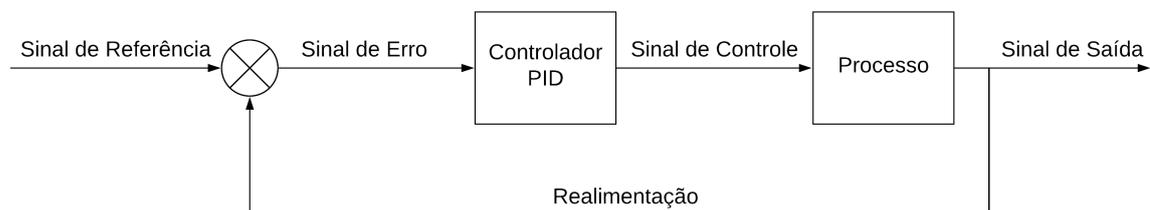
O controlador PID, também chamado de controlador de três modos, tem esse nome devido a conter um termo proporcional, um termo integral e um termo derivativo representados por  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  (DORF; BISHOP, 2014), o qual é representado por

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (3.15)$$

Grande parte dos processos industriais atuais utilizam os controladores PID devido ao seu bom desempenho em muitas das condições de operações existentes em uma indústria e devido à sua facilidade de operação, que permite que engenheiros e técnicos possam implementá-los de forma simples e direta (DORF; BISHOP, 2014).

Diferentemente de um sistema em malha aberta, que gera diretamente a saída em resposta a um sinal de entrada, o sistema em malha fechada usa a medida do sinal de saída e uma comparação com a saída desejada para estimar um sinal de erro, que é usado pelo controlador para ajustar o atuador (DORF; BISHOP, 2014). A Figura 17 mostra um exemplo de um sistema de malha fechada.

Figura 17 – Exemplo de sistema em malha fechada



Fonte: elaborada pelo autor.

As vantagens da utilização do controle com realimentação em malha fechada são a menor sensibilidade do sistema a variações nos parâmetros do processo, o aumento da rejeição de perturbações, a melhor atenuação do ruído de medida, a redução do erro em regime permanente do sistema e o fácil controle e ajuste da resposta transitória do sistema (DORF; BISHOP, 2014).

Atualmente, existem uma gama de métodos para a determinação dos valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . Uma das mais comuns abordagens para a sintonia desses parâmetros é o uso do método de sintonia manual de PID, em que os ganhos do controlador PID são obtidos por tentativa e erro, ou seja, é colocado o valor aleatório e se observa a resposta. A seguir, os valores dos parâmetros são modificados para a obtenção de uma resposta aceitável.

Uma opção para sintonia manual é fazer o  $K_i = 0$  e  $K_d = 0$ . Logo após, o ganho  $K_p$  é lentamente incrementado até que a saída do sistema em malha fechada se aproxime ao máximo da instabilidade (DORF; BISHOP, 2014). A Tabela 1 descreve os termos gerais o efeito da modificação de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ .

Tabela 1 – Efeito do Aumento dos Ganhos do PID  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  na Resposta ao Degrau

Ganho PID	Máxima ultrapassagem percentual	Tempo de acomodação	Erro em regime permanente
Aumentando $K_p$	Aumenta	Impacto mínimo	Diminui
Aumentando $K_i$	Aumenta	Aumenta	Erro em regime permanente nulo
Aumentando $K_d$	Diminui	Diminui	Nenhum impacto

Fonte: Retirado de Dorf e Bishop (2014).

### 3.3.1 Sintonia PID por Ziegler-Nichols

O método de sintonia de Ziegler-Nichols é baseado em dois métodos de sintonia de ganhos de controlador PID, publicados por John G. Ziegler e Nathaniel B. Nichols. Esses métodos eram utilizados para se obter uma resposta ao degrau em malha fechada rápida, sem oscilações excessivas. A abordagem de Ziegler é baseada em conceitos em malha fechada, pela obtenção do ganho crítico e do período crítico. Já a abordagem de Nichols é feita pelo conceito em malha aberta, a partir de curvas de reação.

A vantagem de se utilizar os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols é que eles podem ser utilizados de maneira experimental, simplificando o processo de sintonia do controlador. Nessa abordagem, o ganho limiar de instabilidade  $K_c$  é chamado de ganho crítico, e o período de oscilações  $T_c$  é chamado de período crítico (DORF; BISHOP, 2014). Quando o ganho crítico e período de oscilações são obtidos, os ganhos do PID são calculados usando-se a Tabela 2.

Outra abordagem do método de sintonia Ziegler-Nichols pode ser feita para sistemas de malha aberta. Nesse caso, utiliza-se uma curva de reação, que é obtida pelo desligamento do controlador e, logo em seguida, se aplica uma entrada em degrau ao sistema. A saída do sistema medida é chamada de curva de reação, e através dela é possível obter o retardo no tempo  $T_d$  e a taxa de reação  $R$  (DORF; BISHOP, 2014).

A Tabela 3 mostra como calcular os parâmetros do controlar PID a partir dos valores obtidos de  $T_d$  e  $R$ .

Tabela 2 – Sintonia de PID por Ziegler-Nichols usando ganho crítico  $K_c$  e período de oscilação  $T_c$ .

Tipo de controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Proporcional (P)	$0,5K_c$	-	-
Proporcional e integral (PI)	$0,45K_c$	$\frac{0,54K_c}{T_c}$	-
Proporcional, integral e derivativo (PID)	$0,6K_c$	$\frac{1,2K_c}{T_c}$	$\frac{0,6K_cT_c}{8}$

Fonte: Retirado de Dorf e Bishop (2014).

Tabela 3 – Sintonia de PID por Ziegler-Nichols usando curva de reação caracterizada por retardo no tempo,  $T_d$ , e taxa de reação  $R$ .

Tipo de controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Proporcional (P)	$\frac{1}{RT_d}$	-	-
Proporcional e integral (PI)	$\frac{0,9}{RT_d}$	$\frac{0,27}{RT_d^2}$	-
Proporcional, integral e derivativo (PID)	$\frac{1,2}{RT_d}$	$\frac{0,6}{RT_d^2}$	$\frac{0,6}{R}$

Fonte: Retirado de Dorf e Bishop (2014).

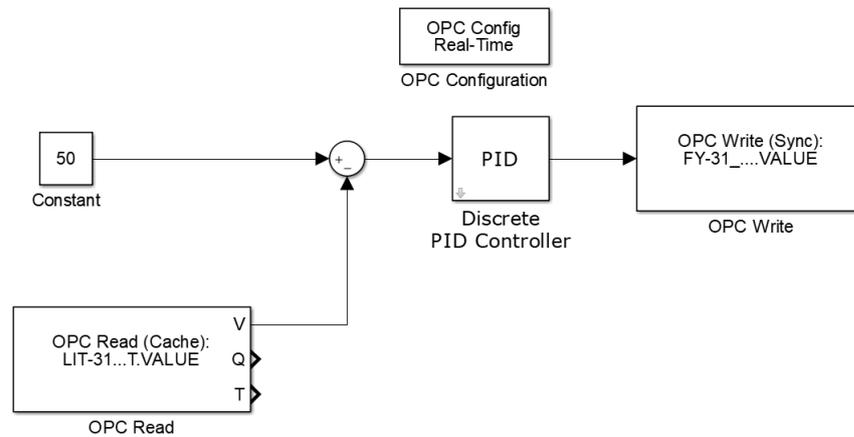
### 3.4 Cálculo dos ganhos do controlador e projeto da malha de controle utilizando o MATLAB

O *software* MATLAB possui uma *toolbox* chamada 'sisotool', que realiza o cálculo dos ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  da função de transferência utilizando diversas técnicas. Para o presente trabalho, utilizou-se o cálculo pelo método de Ziegler-Nichols.

Para realizar o projeto da malha de controle da planta, utilizou-se o *Matlab/Simulink*. Essa plataforma utiliza uma interface gráfica em que os projetos são criados em forma de diagrama de blocos, facilitando a interação com o usuário. A Figura 18 mostra o projeto da malha de controle do presente trabalho.

Analisando a Figura 18, pode-se visualizar vários blocos interligados, descritos a seguir:

1. PID: bloco para implementar um controlador no modelo do Simulink. Ganhos do controlador PID são ajustáveis, manual ou automaticamente;
2. OPC Write: o bloco OPC Write grava dados em um ou mais itens em um servidor

Figura 18 – Interface gráfica do *simulink* - Malha de controle PID

Fonte: Elaborado pelo autor.

- OPC. Basta informar ao bloco a TAG do instrumento que se deseja gravar os dados;
3. OPC Read: o bloco OPC Read lê dados de um ou mais itens em um servidor OPC. Basta informar ao bloco a TAG do instrumento em que se deseja ler os dados;
  4. Constant: indica o *setpoint* (em %) desejado para estabilizar o nível do tanque de aquecimento.

Após esse processo, foram realizados testes de validação, que serão apresentados na próxima seção.

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos durante o processo de identificação e controle do sistema de nível do tanque de aquecimento da planta didática SMAR PD3-F.

### 4.1 Cálculo da função de transferência: Método Caixa Branca

Por meio da dedução realizada na Seção 3.2.1 é possível encontrar uma função de transferência que ilustra o comportamento do sistema de nível da Planta Didática SMAR PDF-3. Os valores medidos e utilizados foram considerando o nível em 50% do tanque.

A Equação 3.11 tem como variáveis  $a$  e  $b$ , onde  $a = \frac{1}{2} \frac{A_2}{A_1} \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{h_{1o}}}$ ;  $b = \frac{1}{A_1}$ . Logo, foi realizado as medições com o auxílio de uma trena métrica e os valores obtidos foram:

- $h$  = altura total do tanque = 63 cm;
- $h_{1o}$  = altura em 50% do tanque = 31,5 cm;
- $r_1$  = raio do tanque = 11 cm;
- $r_2$  = raio da tubulação = 2,5 cm;
- $A_1$  = área da seção transversal do tanque =  $\pi r_1^2$ ;
- $A_2$  = área da seção transversal da tubulação =  $\pi r_2^2$ .

Realizando o cálculo das áreas do tanque e da tubulação e substituindo as medições obtidas nas equações de  $a$  e  $b$  tem-se

$$A_1 = 3,14 * 11^2 = 379,94cm^2;$$

$$A_2 = 3,14 * 2,5^2 = 5,10cm^2;$$

$$a = 0,5 * \frac{5,10}{379,94} * \frac{\sqrt{2 * 9,81}}{\sqrt{31,5}} = 0,005260; \quad (4.1)$$

$$b = \frac{1}{379,94} = 0,00263199. \quad (4.2)$$

Com a obtenção das variáveis  $a$  e  $b$  é possível encontrar a função de transferência do sistema de nível da planta. Abaixo segue a função encontrada:

$$\frac{\Delta H_1(s)}{\Delta Q_i(s)} = \frac{0,00263199/0,005260}{\frac{1}{0,005260}s + 1} = \frac{0,5}{190s + 1}. \quad (4.3)$$

A partir da função de transferência encontrada é possível encontrar os ganhos do sistema e realizar o projeto do controlador de nível do sistema. O valor obtido deve ser

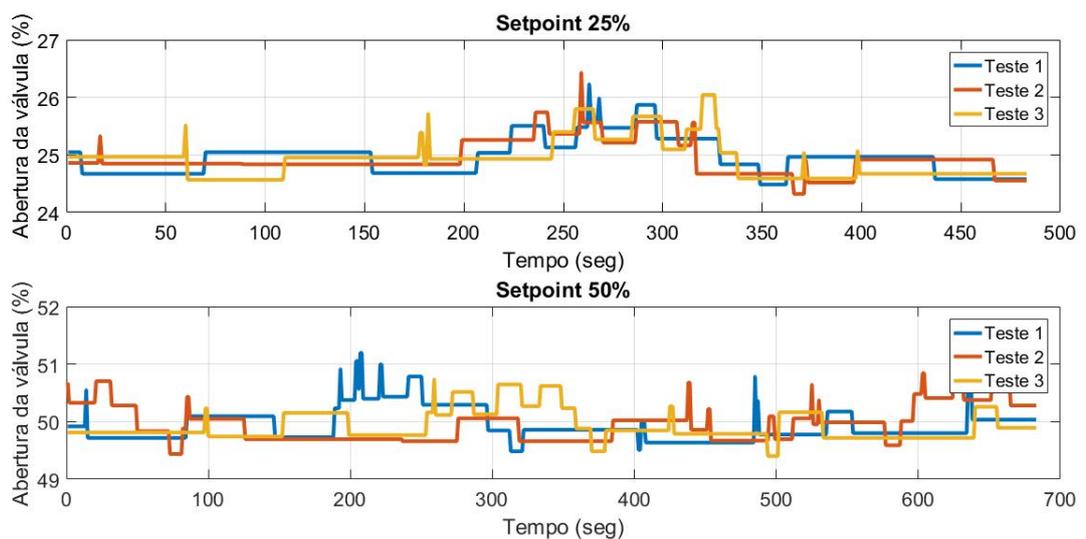
comparado a função obtida empregando a modelagem caixa preta para comparação e verificar se pelas duas maneiras os valores são parecidos e se o controlador se comporta de uma maneira semelhante.

## 4.2 Cálculo da função de transferência: Método Caixa Preta

Conforme descrito anteriormente, foram realizados quatro ensaios distintos, ajustando o percentual de abertura da válvula de controle FY-31 em 25%, 50%, 75% e 100%. Para avaliar as influências de erros experimentais, os testes foram reproduzidos três vezes para cada *setpoint*.

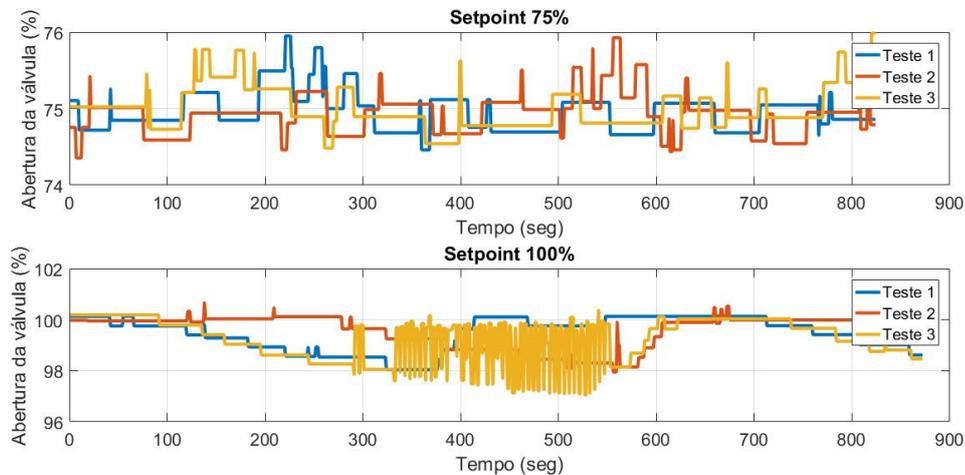
As Figuras 19 e 20 mostram o comportamento do valor percentual da abertura da válvula em função do tempo para os testes realizados. Esses dados foram coletados com o objetivo de analisar o erro do sistema de controle do posicionador da válvula controladora, que durante este ensaio, não foi maior do que 3%.

Figura 19 – Abertura da válvula para setpoint de 25% e 50%.



Fonte: elaborada pelo autor.

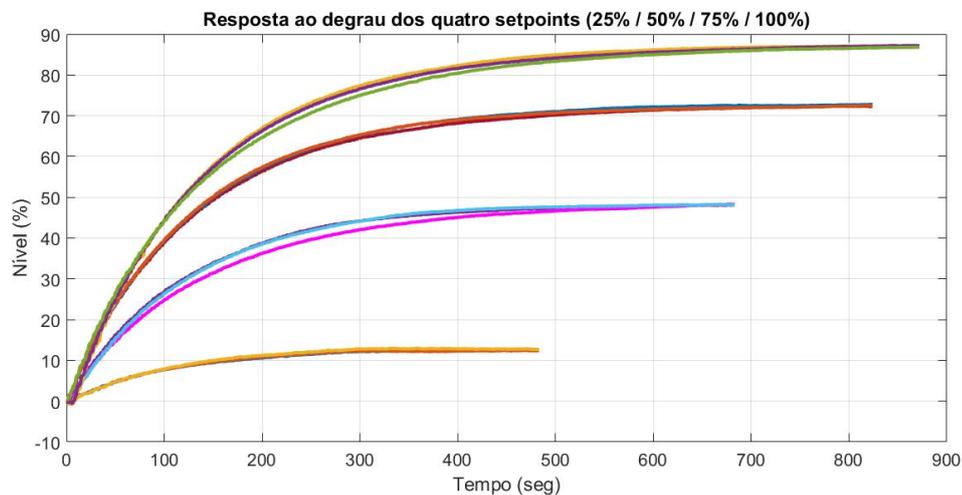
Figura 20 – Abertura da válvula para setpoint de 75% e 100%.



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 21 mostra a resposta do sistema aos quatro sinais do tipo degrau aplicados na válvula controladora. Esses dados foram obtidos a partir do resultado da medição realizada pelo sensor LIT-31.

Figura 21 – Resposta do sistema para degrau de 25%, 50%, 75% e 100%.



Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 21 verifica-se que nível do tanque não aumentou na mesma proporção que o percentual de abertura da válvula de controle, algo que já era esperado devido a característica não linear do sistema.

Em seguida, para verificar a repetibilidade do sistema, calculou-se o erro médio quadrático obtido durante a obtenção das curvas apresentadas na Figura 21. Para isso, foram considerados 200 pontos finais de cada curva. O cálculo foi feito para os 4 valores de *setpoint* utilizados, e o resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Erro médio quadrático para as curvas obtidas.

<b>Setpoint (%)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>
RMSE	0,27	0,16	0,15	0,74

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Tabela 4, pode-se verificar que o valor máximo de erro obtido foi de 0,74%, indicando que o processo utilizado apresenta boa repetibilidade.

As curvas da Figura 21 também foram utilizadas para se obter os ganhos ( $K$ ) e as constantes de tempo ( $\tau$ ) para cada *setpoint*. Essas informações foram utilizadas para a determinação das respectivas funções de transferências. Tendo em vista que as três curvas obtidas de uma mesma abertura da válvula de controle ficaram muito próxima umas das outras, obteve-se uma variação muito pequena dos valores dos ganhos e das constantes de tempo. Logo, fez-se uma média desses valores, gerando apenas um valor de cada variável para ser usado na função de transferência, como pode ser observada pela Tabela 5.

Tabela 5 – Funções de transferências obtidas.

Setpoint 25%	Setpoint 50%	Setpoint 75%	Setpoint 100%
$G_{25}(s) = \frac{0.85}{102s+1}$	$G_{50}(s) = \frac{0.96}{130s+1}$	$G_{75}(s) = \frac{0.96}{129s+1}$	$G_{100}(s) = \frac{0.87}{140s+1}$

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Tabela 5 observa-se que as funções  $G_{50}(s)$  e  $G_{75}(s)$  são semelhantes, indicando que é possível linearizar o comportamento desse sistema em torno desse ponto de operação. Devido a isso, foi projetado um controlador para trabalhar numa faixa de valores que varia entre 50% e 75%.

### 4.3 Obtenção dos ganhos do sistema e projeto do controlador

Para o cálculo dos ganhos do controlador, utilizou-se o método de Ziegler–Nichols a partir da ferramenta SISOTOOL do MATLAB. Optou-se por utilizar um controlador PI, com percentual de sobressinal máximo de 5%, erro de regime permanente menor do que 2% e tempo de estabilização menor do que 600 segundos. Para essas condições, os valores de ganhos obtidos foram:

CAIXA BRANCA

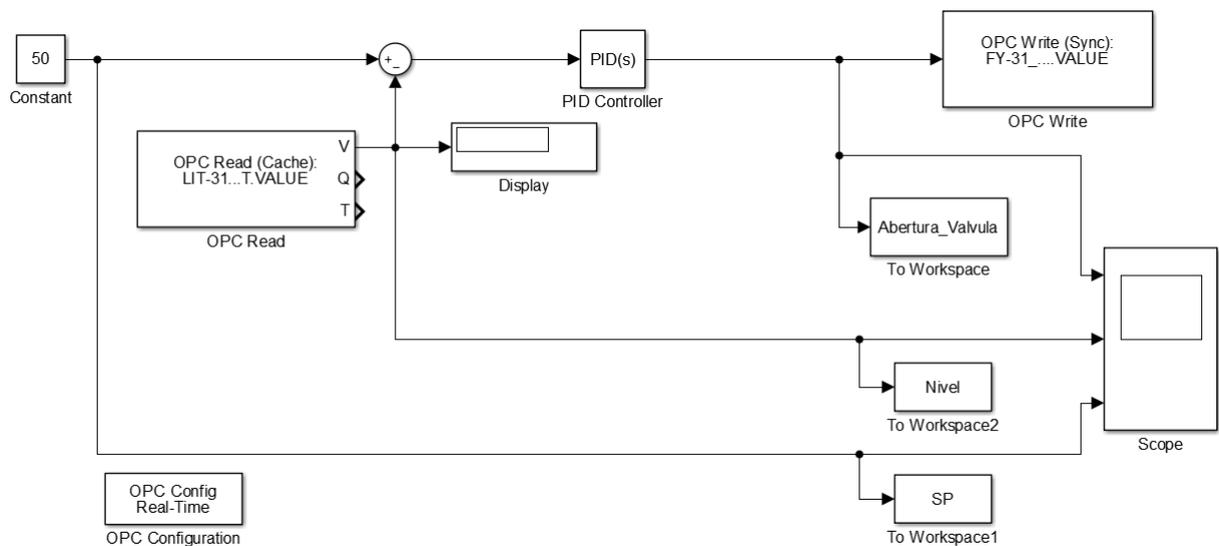
- $K_p = 18,05$ ;
- $K_i = 0,531$ .

## CAIXA PRETA

- $K_p = 9,38$ ;
- $K_i = 0,407$ .

Já com os ganhos do sistema calculados, realizou-se a implementação do controlador da planta utilizando o *Simulink*. A Figura 22 apresenta o esquemático do projeto desenvolvido para o controle de nível do tanque de aquecimento da planta.

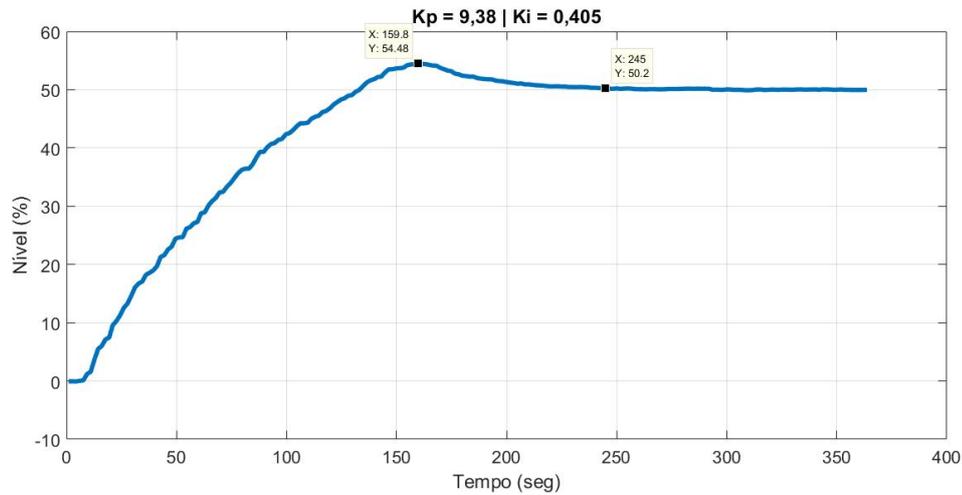
Figura 22 – Projeto do controle de nível desenvolvido no *Simulink*.



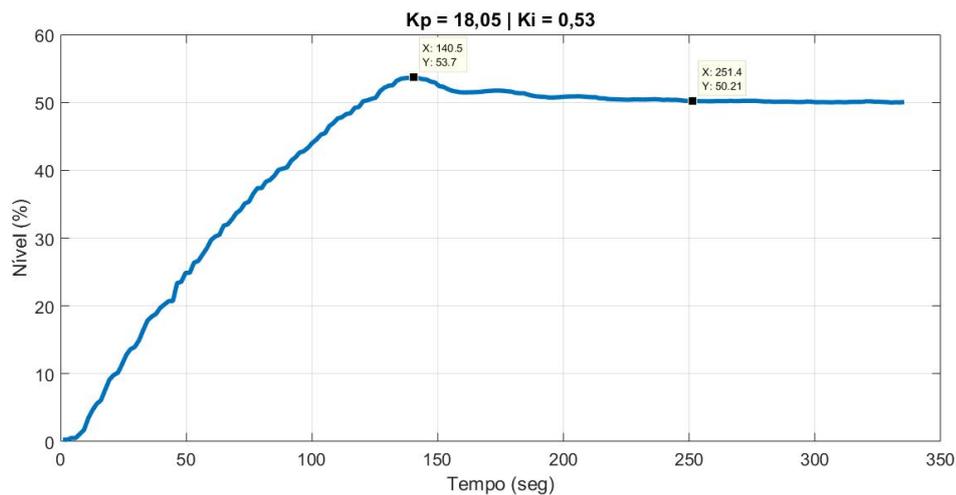
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Resposta do sistema ao controlador projetado

Após realizar o projeto do sistema de controle de nível no *Simulink* foi feito alguns testes para observar a resposta do sistema para o controlador projetado. O resultado esperado seria o controle do nível no *setpoint* desejado e com o menor tempo possível. As Figuras 23 e 24 mostram as respostas do sistema para o modelo caixa preta e branca respectivamente, utilizando os valores dos ganhos calculados via *sisotool*.

Figura 23 – Resposta do sistema para  $K_p = 9,38$  e  $K_i = 0,407$  - Modelagem Caixa Preta

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 24 – Resposta do sistema para  $K_p = 18,05$  e  $K_i = 0,531$  - Modelagem Caixa Branca

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando as respostas do sistema, é possível verificar alguns parâmetros e realizar conclusões das respostas.

- Tempo de estabelecimento: esse valor é o tempo que o sistema leva para se estabilizar no *setpoint* desejado.
- *Overshoot*: nomeado também de máximo sobressinal, é a diferença entre o valor máximo de pico atingido do sistema e o valor final.
- Erro em regime permanente: é simplesmente a diferença entre o valor final e o valor esperado (*setpoint*).

Tabela 6 – Parâmetros obtidos das respostas do sistema.

Parâmetros	Tempo de estabelecimento (seg)	<i>Overshoot</i> (%)	Erro em regime permanente (%)
Modelo Caixa Preta	245	4,48%	0,20%
Modelo Caixa Branca	251	3,70%	0,21%

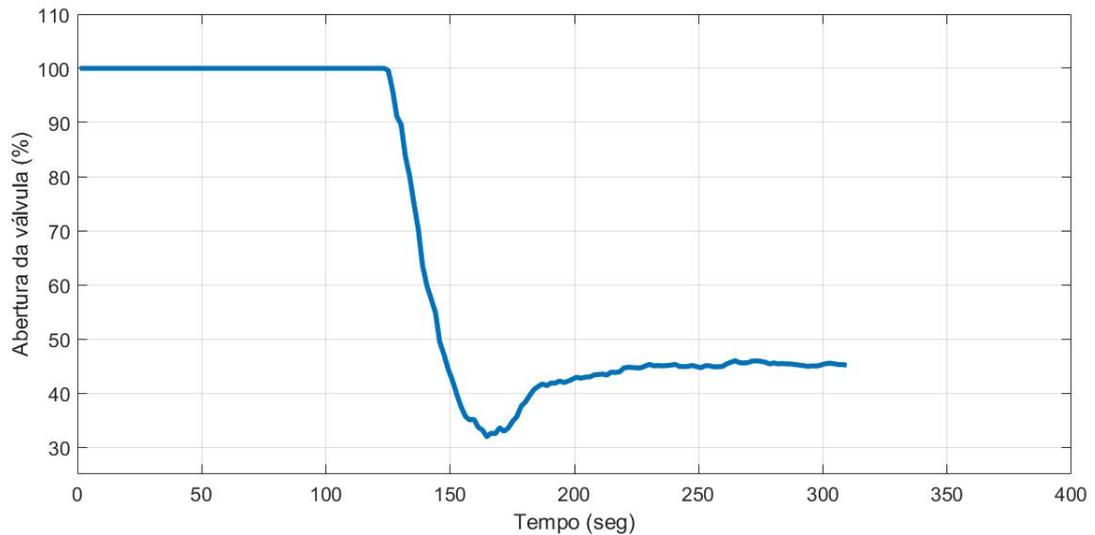
A Tabela 6 mostra os valores dos parâmetros obtidos através da análise das respostas do sistema para o modelo caixa preta e branca.

Através da comparação das curvas obtidas dos ganhos do modelo caixa branca e modelo caixa preta pode-se concluir que o tempo de estabelecimento do modelo caixa preta foi menor do que o modelo caixa branca, em contrapartida, o *overshoot* do modelo caixa branca foi menor do que o modelo caixa preta, por fim, o erro em regime permanente de ambos foram iguais. Nota-se que, ambos os valores dos três parâmetros analisados são bem próximos, concluindo que os modelos são análogos e que ambos realizaram o controle de nível notável.

Pode-se julgar que toda a comunicação feita para o acesso aos instrumentos por um *software* diferente do fabricante, por meio da plataforma OPC, foi realizada com sucesso, e o controlador atendeu as especificações do projeto.

Também foram coletados os valores percentuais da abertura da válvula FY-31, conforme pode ser visto na Figura 25. Essa informação foi utilizada para verificar o comportamento do controlador durante o funcionamento do sistema. Nota-se que inicialmente, o controlador trabalha saturado, devido à limitação do valor máximo da vazão de entrada. A partir do instante  $t = 120s$ , o controlador começa a atuar e quando  $t$  se aproxima de 180 s, o nível do tanque começa a entrar em regime.

É importante observar o percentual de abertura da válvula não varia muito quando o sistema entra em regime permanente. Esse comportamento é importante, sobretudo em sistemas mecânicos que costumam sofrer desgastes quando submetidos a variações constantes.

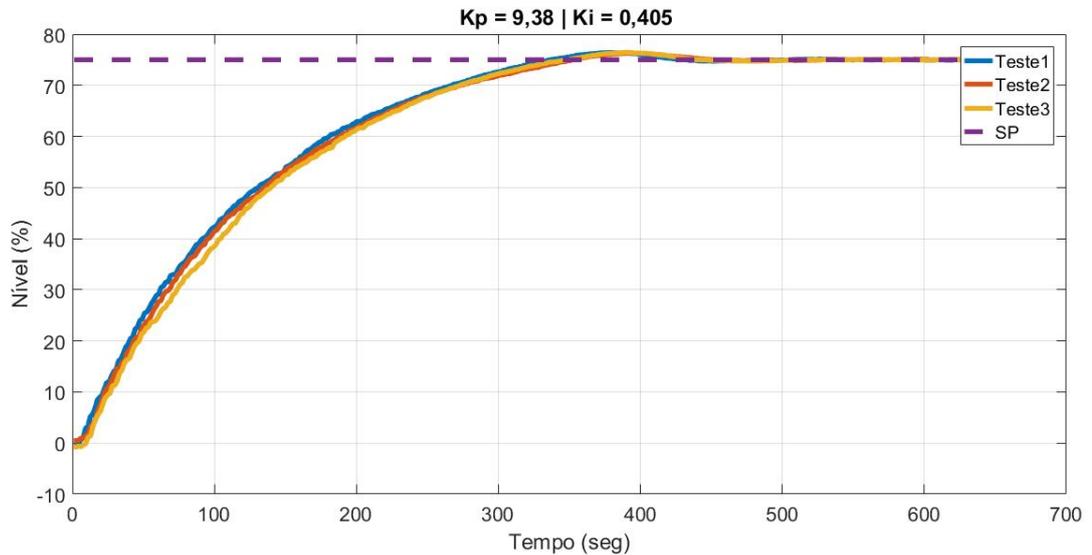
Figura 25 – Abertura da válvula de controle para  $K_p = 9,38$  e  $K_i = 0,407$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

A título de comparação e procura de um resultado melhor, utilizou-se a técnica de sintonia manual cujos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  foram modificados para tentar achar um melhor resultado. Essa técnica consiste em mudar os valores, pouco a pouco, manualmente, para tentar achar um valor do controle em tempo mais rápido. Várias tentativas foram realizadas, mas os resultados obtidos foram sempre piores do que os obtidos pelo método de sintonia proposto.

Como já mencionado, neste trabalho se utilizou uma função de transferência de primeira ordem em torno de um ponto de operação compreendido dentro da faixa entre 50% e 75% do nível do tanque. A Figura 26 apresenta a resposta obtida quando o *setpoint* do controlador foi ajustado para o valor máximo de 75%.

Figura 26 – Resposta do sistema para controle de nível de 75%.

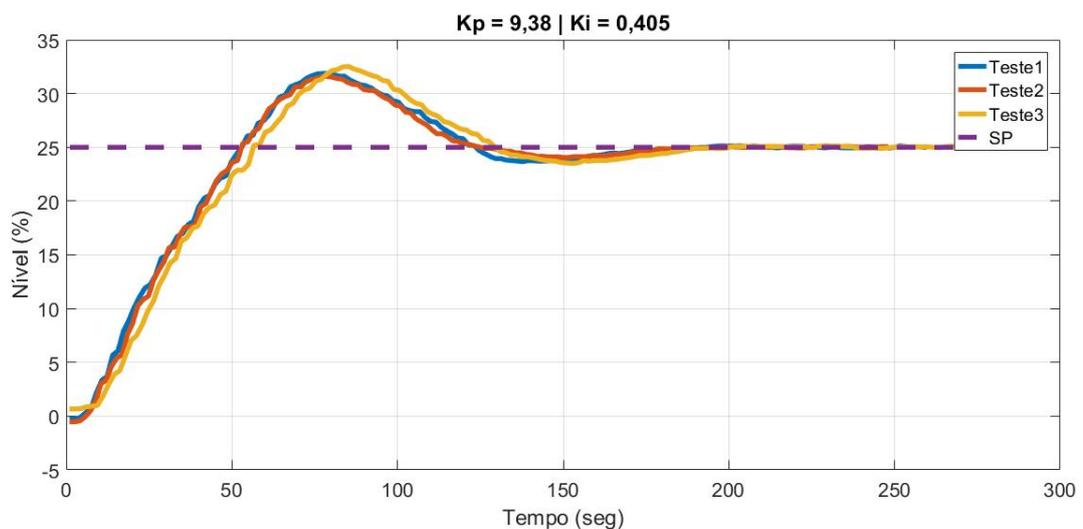


Fonte: elaborada pelo autor.

Nota-se que para esse caso, o tempo de estabelecimento é maior devido à limitação da vazão de entrada do sistema. Entretanto, apesar de mais lento, o sistema apresenta um valor percentual de *overshoot* menor do que quando o *setpoint* foi ajustado em 50%, pelo mesmo motivo da limitação de vazão de entrada.

A fim de avaliar o comportamento do controlador para um valor fora da faixa, realizou-se um teste de controle de nível do tanque para um setpoint de 25%. O resultado obtido pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Resposta do sistema para controle de nível de 25%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o controle de nível em 25% do tanque, observa-se que o sistema tem um tempo de estabelecimento mais rápido, até por utilizar uma quantidade menor de líquido do que nos casos anteriores. Entretanto, é nítido que o valor de *overshoot* é maior em comparação com os casos analisados anteriormente. Após o período de estabilização, o erro de regime permanente permaneceu aproximadamente o mesmo.

## 5 Considerações finais

Neste trabalho, foram abordados conceitos relacionados à utilização da plataforma OPC, bem como suas vantagens e desvantagens em relação a sistemas de comunicação comerciais utilizados em aplicações industriais. Ao longo do trabalho, utilizando a planta didática SMAR PD3-F, foi possível controlar sensores e atuadores remotamente através do Matlab utilizando um servidor OPC que gerencia as informações referentes à planta.

Com exemplo de aplicação, realizou-se o controle do nível de um dos tanques presentes na planta. Para isso, foram utilizados uma bomba ON/OFF e uma válvula pneumática controlada remotamente. Observou-se que o controlador do posicionador da válvula apresenta um erro de regime de aproximadamente 3%. Esse erro influencia diretamente a vazão de líquido que circula pela tubulação e, conseqüentemente, o controle do nível do tanque.

Por se tratar de um sistema não linear, optou-se por linearizar o sistema em torno de um ponto de operação, simplificando assim a tarefa do controlador. Verificou-se que essa linearização funciona para uma faixa de nível compreendida entre 50% e 75% do tanque. Nessas condições, o tempo de estabelecimento foi de 251 segundos e o erro de regime permanente foi de 0,21% para o modelo caixa branca. Já o modelo caixa preta, obteve-se 245 segundos de tempo de estabelecimento e 0,20% de erro.

Por fim, o controlador foi testado para um valor de nível fora da faixa utilizada para linearização do sistema. O resultado obtido mostra que o controlador funciona, mas apresenta um *overshoot* maior do que o valor máximo predeterminado durante o projeto do controlador.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Comunicação da planta com SCILAB, um *software* livre com funcionalidades semelhantes às do MATLAB;
- Comunicação com a planta através de rede *Wireless*, retirando a necessidade de cabos físicos;
- Testes envolvendo controle de nível em cascata, utilizando os dois tanques;
- Criação de um sistema supervisorio para acompanhamento em tempo real das grandezas medidas e manipuladas;
- Utilização de outras técnicas de controle diferentes do método PID;

- Utilização dos outros instrumentos e atuadores que compõe a planta didática.

# A Código de acesso aos instrumentos da planta através da plataforma OPC pelo MATLAB

```

% Controle da planta via Matlab

%% Conexão OPC com o controlador Foundation Fieldbus
da=opcda('localhost', 'Smar.HseOleServer.0'); %Referência ao controlador HSE
connect(da); % Conecta ao controlador

grp=addgroup(da); % Adição de um grupo para os instrumentos da rede

%MALHA 31
% adição da tag OUT do TIT da malha 31 ao grupo
tit31_out=additem(grp,'TIT-31_AI1.OUT.VALUE');
% adição da tag OUT de FY da malha 31 ao grupo
fy31_out=additem(grp,'FY-31_A01.OUT.VALUE');
% adição da tag PV de FY da malha 31 ao grupo
fy31_pv=additem(grp,'FY-31_A01.PV.VALUE');
% modo de operação da valvula 31
fy_31_target=additem(grp,'FY-31_A01.MODE_BLK.TARGET');

% adicao da tag OUT de TY da malha 31 ao grupo
ty31_out=additem(grp,'TY-31_A01.OUT.VALUE');
% modo de operação do conversor
ty31_target=additem(grp,'TY-31_A01.MODE_BLK.TARGET');
% adição da tag PV de FY da malha 31 ao grupo
ty31_pv=additem(grp,'TY-31_A01.PV.VALUE');
% adicao da tag OUT do LIT da malha 31 ao grupo
lit31_out=additem(grp,'LIT-31_AI1.OUT.VALUE');
% adicao da tag OUT do FIT da malha 31 ao grupo
fit31_out=additem(grp,'FIT-31_AI1.OUT.VALUE');

lit_31_target=additem(grp,'LIT-31_AI1.MODE_BLK.TARGET');
fy_31_pid_target=additem(grp,'FY-31_PID.MODE_BLK.TARGET');

```

```
%Tag dos parametros do controlador

fy31_pid_gain=additem(grp,'FY-31_PID.GAIN');
fy31_pid_reset=additem(grp,'FY-31_PID.RESET');
fy31_pid_rate=additem(grp,'FY-31_PID.RATE');
fy31_pid_sp=additem(grp,'FY-31_PID.SP.VALUE');

% Abertura valvula tanque 1
write(fy31_out,45);

% Leitura do sensor de abertura da valvula tanque 1
abertura = read(fy31_pv);

% Leitura do sensor de nível tanque 1
read(lit31_out)
```

# Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004. 24, 26, 27
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de instrumentação*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. 6, 9
- ALTMANN, W. *Practical process control for engineers and technicians*. Oxford: Elsevier, 2005. 8
- ALVES, J. L. L. *Instrumentação, Controle e Automação de Processos*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 8
- BEGA, E. A. *Instrumentação industrial*. 3. ed. [S.l.]: Editora Interciência, 2010. 5, 6, 8
- CARMO, F. H. P. d. *Implementação de um sistema supervisorio via MATLAB para a planta SMAR PD3-F*. 95 p. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017. Engenharia Elétrica. 2
- CARVALHO, A. S.; SILVA, R. C. da; NASCIMENTO, D. B. do. Sistema de comunicação OPC para uma coluna de destilação piloto. In: *SEGeT-Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. Resende: [s.n.], 2008. p. 1–18. 2
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 28, 29, 30
- DUARTE, C. R. M.; FIGUEIREDO, L. C.; CORRÊA, M. V. Utilização do matlab® no ensino da tecnologia OPC aplicada a controle de processos. In: *Congresso Brasileiro de Automática*. Salvador: [s.n.], 2006. p. 1–6. 2
- FIELDCOMM GROUP. *FOUNDATION TECHNOLOGY OVERVIEW*. 2019. Acessado em: 11/06/2019. Disponível em: <<https://fieldcommgroup.org/technologies/foundation-fieldbus/foundation-technology-overview>>. 17
- FONSECA, M. d. O. Comunicação OPC - uma abordagem prática. In: *VI Seminário de Automação de Processos, Associação brasileira de metalurgia e materiais*. Vitória: [s.n.], 2002. p. 1–12. 1
- FRANZINI, J. et al. Aplicações de técnicas de controle no matlab/simulink® com comunicação via OPC em uma planta didática hart. In: *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. Gramado: [s.n.], 2013. p. 1–12. 1, 2, 7
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física Vol. 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 24
- MORAIS, C. R. R. de et al. Planta didática SMAR pd3: Modelagem e simulação do tanque de aquecimento—parte a. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, Viçosa, v. 3, n. 3, p. 454–475, 2017. 3

- NETO, A. F. dos S. et al. Tornando a educação em controle de processos mais realista: a utilização do protocolo OPC. In: *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. Belém: [s.n.], 2012. p. 1–12. 2
- OLIVEIRA, L. et al. Utilização de uma planta didática SMAR para complementação do ensino de engenharia de controle e automação. In: *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. Belém: [s.n.], 2012. p. 1–11. 2
- OPC FOUNDATION. *OPC Data Access Custom Interface Specification*. 2019. Acessado em: 22/02/2019. Disponível em: <[https://www.advosol.com/OpcSpecs/opcda205\\_cust.pdf](https://www.advosol.com/OpcSpecs/opcda205_cust.pdf)>. 19
- OPC FOUNDATION. *What is OPC?* 2019. Acessado em: 19/06/2019. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>>. 18
- SILVA, L. R.; ENDO, W.; LISBÔA, A. R. Expectativas da utilização de uma planta didática industrial como objeto de aprendizagem em um curso de graduação em engenharia. In: *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. Blumenau: [s.n.], 2011. p. 1–10. 1
- SILVEIRA, C. F. M. Controlador pid em planta SMAR pd-3. In: *GRACO - Grupo de Automação e Controle*. Brasília: [s.n.], 2006. p. 1–4. 2
- SMAR. *Manual dos procedimentos de instalação, operação e manutenção: Foundation fieldbus*. 3. ed. Sertãozinho, 2008. 66 p. 17
- SMAR. *Planta Didática PD3 Series 301-302-303*. 2011. 13, 14
- SMAR. *Manual de Instrução, Manutenção e Operação: Posicionador de válvulas fieldbus*. 3. ed. Sertãozinho, 2015. 104 p. 13, 14
- SMAR. *Manual de Instrução, Manutenção e Operação: Plantas didáticas*. 3. ed. Sertãozinho, 2016. 54 p. 9, 10, 11, 16, 22
- SMAR. *Manual de Instrução, Manutenção e Operação: Transmissor de pressão fieldbus*. 3. ed. Sertãozinho, 2016. 92 p. 11, 12
- SMAR. *Manual do Usuário: Fieldbus universal bridge*. 1. ed. Sertãozinho, 2016. 646 p. 15, 16
- SMAR. *Medição de Nível*. 2019. Acessado em: 19/02/2019. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index39.html>>. 6



## ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL PARA TANQUES INDUSTRIAIS" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 17 de DEZEMBRO de 2019 .

*Rodolfo Lima Lage*

Nome completo do(a) aluno(a)