



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



Trabalho de Conclusão de Curso

Controle do sistema de nível de uma planta piloto

Marphiza Magalhães F. Santos Silvério

João Monlevade, MG
2025

Marphiza Magalhães F. Santos Silvério

Controle do sistema de nível de uma planta piloto

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. Dr. Márcio Feliciano Braga

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S587c Silvério, Marphiza Magalhaes Fernandes dos Santos.
Controle do sistema de nível de uma planta piloto. [manuscrito] /
Marphiza Magalhaes Fernandes dos Santos Silvério. - 2025.
56 f.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Feliciano Braga.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

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

1. Automação industrial. 2. Controladores PI. 3. Controle automático. 4.
Controle de processo. 5. Modelos matemáticos. 6. Tanques - Indústria. I.
Braga, Marcio Feliciano. II. Tiago, Marcelo Moreira. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marphiza Magalhães Fernandes dos Santos Silvério

Controle do sistema de nível de uma planta piloto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 4 de setembro de 2025.

Membros da banca

Dr. Márcio Feliciano Braga — Orientador — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Marcelo Moreira Tiago — Coorientador — Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Rodrigo Augusto Ricco — Convidado — Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Wendy Yadira Eras Herrera — Convidada — Universidade Federal de Ouro Preto

Márcio Feliciano Braga, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/11/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Feliciano Braga, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/11/2025, às 10:55, 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, informando o código verificador **1016311** e o código CRC **D8A9DED5**.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor e sacrifício; ao meu marido, cujo apoio incondicional foi a âncora que sustentou minha determinação nos momentos difíceis; aos professores, pelo conhecimento compartilhado; aos amigos, pela jornada vivida; e à minha família, pelo constante apoio. Gratidão eterna.

Agradecimentos

Quero expressar minha profunda gratidão a todos que desempenharam papéis cruciais nesta jornada acadêmica, moldando não somente este trabalho, mas também meu crescimento pessoal.

Agradeço à minha família, cujo apoio constante e amor incondicional são os alicerces que sustentam meus sonhos. Vocês são a razão pela qual esta caminhada tem tanto significado.

Ao meu marido, Adeilson, meu parceiro incansável, agradeço por sua compreensão, paciência e apoio inabalável. Sua presença trouxe equilíbrio e motivação, transformando os desafios em oportunidades de crescimento conjunto.

Aos meus amigos e colegas, obrigado por estarem ao meu lado, celebrando cada vitória e oferecendo conselhos sábios nos momentos difíceis. Suas contribuições enriqueceram meu percurso acadêmico. A amizade de vocês é um tesouro que levo comigo para além desta conquista.

Aos meus professores e orientadores, sou grata por sua orientação perspicaz e pelo compartilhamento generoso de conhecimento. Vocês foram mentores essenciais nesta trajetória.

Encerro este agradecimento reconhecendo o valor de cada esforço empenhado ao longo desta jornada. Esta conquista reflete não somente o apoio que recebi, mas também a determinação em seguir adiante, mesmo diante dos desafios.

Com gratidão, Marphiza.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre modelagem matemática e controle aplicados a sistemas de nível em tanques industriais. Utilizou-se, para os experimentos, a planta piloto SMAR PD3-F, disponível no Laboratório de Automação e Controle do ICEA/UFOP. Inicialmente, abordou-se o problema de modelagem por meio de técnicas de identificação de sistemas em abordagem “caixa preta”, considerando a resposta da planta a diferentes entradas e ajustando os parâmetros de um modelo autorregressivo com entradas exógenas (ARX, do inglês *AutoRegressive with eXogenous inputs*) pelo método dos mínimos quadrados. Essa etapa possibilitou representar adequadamente o comportamento dinâmico do processo, fornecendo uma base para o projeto de controle. Em seguida, tratou-se o problema de controle, com o desenvolvimento de um controlador PI (Proporcional-Integral) cujos parâmetros foram determinados pelo método de sintonia de Ziegler-Nichols. Ensaios em malha fechada mostraram desempenho satisfatório, com estabilidade, tempo de assentamento compatível com os requisitos de projeto e máxima ultrapassagem nos limites especificados. Os resultados demonstram a importância de integrar as etapas de identificação e controle, pois o modelo bem ajustado foi essencial para a obtenção de controladores eficazes, garantindo a operação estável e o bom desempenho do sistema.

Palavras-chave: Controle de processos, Modelagem matemática; Identificação de sistemas; Controlador PI; Sintonia de Ziegler–Nichols; Tanques industriais; Modelo ARX.

Abstract

This work presents a study on mathematical modeling and control applied to level systems in industrial tanks. The experiments were carried out using the SMAR PD3-F pilot plant, available at the Automation and Control Laboratory of ICEA/UFOP. Initially, the modeling problem was addressed through system identification techniques using a “black-box” approach, considering the plant’s response to different inputs and adjusting the parameters of an AutoRegressive model with eXogenous inputs (ARX) using the least squares method. This stage made it possible to adequately represent the dynamic behavior of the process, providing a foundation for control design. Subsequently, the control problem was addressed with the development of a Proportional-Integral (PI) controller, whose parameters were determined using the Ziegler–Nichols tuning method. Closed-loop tests showed satisfactory performance, with stability, a settling time compatible with design requirements, and maximum overshoot within specified limits. The results demonstrate the importance of integrating the identification and control stages, as the well-fitted model was essential for obtaining effective controllers, ensuring stable operation and good system performance.

Keywords: Process control; Mathematical modeling; System identification; PI controller; Ziegler–Nichols tuning; Industrial tanks; ARX model.

Lista de figuras

Figura 1 – Planta didática SMAR-PD3.	20
Figura 2 – Diagrama P&ID da planta : Malha 31 e Malha 32.	20
Figura 3 – Diagrama P&I da malha 31 planta didática SMAR-PD3.	22
Figura 4 – Transmissor de pressão LD302.	23
Figura 5 – Inversor de frequência CFW08.	24
Figura 6 – Plataforma de controle e automação de processos DFI302.	25
Figura 7 – Representação da saída de um sistema hipotético a uma entrada em degrau unitário utilizando o Método de Ziegler-Nichols.	29
Figura 8 – Representação por diagrama de blocos de um sistema em malha aberta.	32
Figura 9 – Representação por diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.	32
Figura 10 – Representação da curva da variação do nível do tanque em função do tempo, obtida a partir das coletas realizadas para os sinais de entrada de 52,00%, 54,00%, 56,00% e 58,00%.	38
Figura 11 – Comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo, destacando o comportamento do erro ao longo do tempo.	40
Figura 12 – Representação da saída de um sistema a uma entrada em degrau unitário utilizando o Método de Ziegler-Nichols.	41
Figura 13 – Simulação da resposta do sistema em malha fechada para o controlador PI (3.2) considerando o modelo (3.1).	42
Figura 14 – Resposta real e simulada do sistema para diferentes valores de <i>setpoint</i> com o controlador PI (3.2) projetado pelo método de Ziegler-Nichols, considerando o modelo (3.1).	43
Figura 15 – Resposta simulados do controlador (3.3) via <i>PIDtool</i>	47
Figura 16 – Análise do sistema de nível com período de amostragem $T = 5$ s para o controlador PI (3.3) projetado via <i>PIDTool</i>	49

Lista de tabelas

Tabela 1	– Efeito do aumento dos ganhos do PID K_P , K_I e K_D na resposta ao degrau de um sistema em malha fechada.	32
Tabela 2	– Sintonia de PID por Ziegler-Nichols usando curva de reação.	33
Tabela 3	– Funções de transferência nos domínios contínuo e discreto.	38
Tabela 4	– Especificações de desempenho utilizadas como referência para o projeto e análise futuros dos controladores.	39
Tabela 5	– Métricas de avaliação do modelo (3.1).	40
Tabela 6	– Ganhos do controlador PI obtidos no projeto pela técnica de sintonia de Ziegler-Nichols.	42
Tabela 7	– Comparação dos resultados reais, na planta SMAR PD3-F, e simulados empregando o controlador (3.2).	44
Tabela 8	– Novas especificações de desempenho adotadas para os próximos testes.	45
Tabela 9	– Constantes do controlador PID para período de amostragem $T = 5$ s, sintonizadas via <i>PIDTool</i>	46
Tabela 10	– Resultados para o projeto do controlador (3.3) via <i>PIDTool</i> para o modelo (3.1) no período de amostragem de $T = 5$ s.	48
Tabela 11	– Comparação entre as especificações de desempenho desejadas e obtidas, na planta SMAR PD3-F, com o controlador (3.3) projetado via <i>PIDTool</i> para o período de amostragem de 5s.	50

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	14
1.2	Estado da arte	15
1.3	Justificativa	17
1.4	Objetivos	18
1.4.1	Objetivos específicos	18
1.5	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Planta didática SMAR PD3-F	19
2.2	Instrumentos da planta SMAR-PD3	21
2.2.1	Transmissor de pressão diferencial para medição de nível (LIT-31)	22
2.2.2	Bombas hidráulicas	22
2.2.3	Transmissor de pressão diferencial para medição de vazão (FIT-31)	23
2.3	Redes de comunicação	24
2.3.1	Conexão via <i>Matlab</i>	25
2.4	Modelagem e identificação de sistemas	26
2.4.1	Estratégias de modelagem	26
2.4.2	Identificação do sistema	27
2.5	Modelagem matemática pela resposta ao degrau	27
2.5.1	Método de Ziegler-Nichols em malha aberta a partir da curva de reação	28
2.6	Modelagem matemática por modelos paramétricos	28
2.6.1	Modelo ARX	28
2.6.2	Método dos mínimos quadrados	30
2.6.3	Validação do modelo	30
2.7	Controladores PID	31
2.7.1	Método de Sintonia via Ziegler-Nichols	32
2.7.2	Projeto via Programas Computacionais	33
2.7.3	Aspectos práticos da implementação dos controladores	34
2.8	Considerações parciais	34
3	RESULTADOS	36
3.1	Configurações iniciais	36
3.2	Obtenção de modelo a partir de uma entrada ao degrau	36
3.3	Validação do modelo a partir de uma entrada ao degrau	39

3.4	Projeto preliminar do controlador a partir da técnica de sintonia de Zielger-Nichols	41
3.4.1	Resultados obtidos do controlador PI (3.2) projetado	43
3.5	Sintonia dos controladores utilizando <i>PIDTool</i>	45
3.5.1	Resultados obtidos do controlador PI (3.3) projetado	48
3.6	Considerações parciais	50
4	CONCLUSÃO	52
4.1	Trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	54

1 Introdução

A engenharia de controle tem como um de seus principais objetivos o desenvolvimento de estratégias que permitam conceber controladores para sistemas que, operando em malha fechada, sejam estáveis, visando aprimorar o desempenho previamente estabelecido. Tais propriedades são necessárias devido à crescente demanda por melhorias na qualidade e padronização industrial.

A abordagem clássica de modelagem de plantas industriais tende a considerar, por exemplo, motores e correias transportadoras como sistemas lineares. Contudo, é fundamental reconhecer que as condições operacionais de qualquer processo industrial estão sujeitas a mudanças ao longo do tempo. Perturbações externas, como variações no nível de líquido em um tanque, pressão em uma tubulação, volume de reagentes ou composição, podem afetar significativamente o desempenho do sistema. Para avaliar esses efeitos, foram realizadas análises na planta, permitindo verificar a capacidade do sistema de rejeitar perturbações e manter o ponto de operação desejado. Essas avaliações consideraram observações diretas na planta, bem como referências de estudos anteriores. Portanto, em algumas abordagens, é fundamental primeiro desenvolver modelos precisos do sistema, pois, com uma representação adequada das dinâmicas e perturbações, é possível projetar estratégias de controle eficazes. Dessa forma, garante-se que o sistema lide com variações externas e atender aos requisitos mínimos de projeto. Neste trabalho, foram utilizadas diferentes técnicas de modelagem, incluindo métodos paramétricos, como o modelo AutorRegressivo com entradas eXógenas (ARX, do inglês *Auto-Regressive with eXogenous input*). Além disso, para a sintonia de controladores, aplicou-se o método de Ziegler-Nichols a partir da resposta ao degrau (ZIEGLER; NICHOLS, 1942).

Um exemplo real de aplicação industrial que requer controle eficiente é o sistema de armazenamento e abastecimento de caldeiras, no qual o nível de água nos tanques deve ser regulado com precisão para garantir a operação segura do processo térmico (SILVA; PEREIRA; ANDRADE, 2020). Nesses casos, o controle de nível é essencial para evitar tanto o transbordamento quanto a secagem da caldeira, que pode causar falhas graves no sistema. Diversas estratégias de controle podem ser aplicadas para resolver esse problema, desde que a modelagem da planta seja realizada com coerência, utilizando técnicas de identificação que minimizem a divergência entre o modelo e o comportamento real da planta. Apesar de uma modelagem bem ajustada, variações inesperadas nas condições operacionais — como oscilações na pressão, vazamentos ou alterações na carga — podem comprometer o desempenho do sistema de controle. Isso reforça a necessidade de estratégias eficientes de controle, capazes de manter a estabilidade mesmo diante de perturbações externas e incertezas do processo.

Diante desse cenário, o controle de nível é um tema de grande relevância para a

eficiência e segurança dos processos industriais. Pesquisas anteriores, como as de Lage (2019) e Silverio (2022), abordaram o desenvolvimento e aplicação de controladores em plantas-piloto, como a SMAR-PD3, utilizando a bomba monofásica e o controle da válvula pneumática. Diferentemente desses trabalhos, o objetivo do presente estudo é implementar o controle de nível utilizando a bomba trifásica. Assim, o objetivo não é somente aplicar controladores em modelos previamente identificados, mas validar experimentalmente as técnicas de controle em condições reais de operação. Para isso, as técnicas de controle foram aplicadas e testadas na planta-piloto SMAR PD3-F, localizada no Laboratório de Controle e Automação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (ICEA) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

1.1 Contextualização

O avanço tecnológico nas últimas décadas impulsionou o desenvolvimento de técnicas cada vez mais sofisticadas para a automação industrial (SMITH, 2018; JONES; BROWN, 2020). Esse progresso leva a uma maior adoção de sistemas automatizados em diversos setores, promovendo melhorias significativas na qualidade, eficiência e flexibilidade dos processos produtivos (MILLER, 2019; SILVA; SOUZA, 2021).

Entre as aplicações mais importantes da automação industrial, destaca-se o controle de nível em tanques e reservatórios, fundamental para garantir a operação segura e eficiente de processos que envolvem armazenamento e transporte de líquidos (JOHNSON, 2017). Sistemas de controle de nível são amplamente utilizados em indústrias químicas, alimentícias, de petróleo, entre outras, onde o ajuste preciso do volume de fluidos é essencial para evitar desperdícios, manter a qualidade do produto e garantir a continuidade da produção (RODRIGUES; LIMA, 2015; GARCIA; MORALES, 2019).

Nesse contexto, técnicas de modelagem e controle constituem ferramentas fundamentais para a identificação e o projeto de estratégias de controle em sistemas dinâmicos, buscando otimizar seu desempenho mesmo diante de variações operacionais e perturbações externas (OGATA, 2010; ÅSTRÖM; MURRAY, 2010).

Paralelamente, diversos trabalhos vêm utilizando a planta SMAR-PD3 em experimentos que simulam ambientes industriais em escala reduzida, visando desenvolver soluções eficazes para os processos de fabricação. Estudam-se, nesses casos, estratégias para monitoramento, identificação e controle de sistemas industriais, além dos desafios envolvidos na comunicação entre equipamentos no chão de fábrica. Trabalhos como os de Gomes, Nicacio e Tórres (2017), Riano, Rodriguez e Alvares (2017) e Oliveira et al. (2012), exemplificam abordagens práticas e aplicadas voltadas ao aprimoramento da automação industrial, contribuindo para ganhos em eficiência e redução de custos no setor produtivo. Destaca-se que a planta SMAR-PD3 foi desenvolvida com o propósito específico de reproduzir sistemas industriais que empregam o controle de vazão, nível ou

temperatura de líquidos (LIMA, 2018). Manter a quantidade de líquido em um tanque ou recipiente em níveis específicos é essencial para garantir a eficiência operacional, a qualidade do produto e a segurança do processo.

Na planta-piloto SMAR PD3-F, utilizada neste estudo, o controle de nível é realizado em tanques de água, nos quais variações no volume podem comprometer a resposta do sistema e a repetibilidade dos testes de controle. Por exemplo, mudanças inesperadas no nível podem afetar a pressão nas tubulações e a vazão através das válvulas, influenciando diretamente o desempenho dos controladores implementados. Essa situação é análoga a processos industriais reais, como observado na indústria de alimentos e bebidas, em que o controle preciso de tanques de fermentação é fundamental para manter a proporção correta de ingredientes e garantir a qualidade do produto final (PEREIRA; SANTOS, 2018). Esse tipo de controle também é crucial em sistemas de tratamento de água, nos quais a manutenção dos níveis em reservatórios assegura o abastecimento contínuo e evita transbordamentos ou falta d'água (SILVA; ALMEIDA, 2016).

1.2 Estado da arte

A modelagem e a identificação de sistemas são etapas fundamentais no desenvolvimento de estratégias de controle em engenharia e ciência da computação. A modelagem consiste em representar sistemas reais por meio de equações matemáticas, que podem ser obtidas por abordagens físicas, empíricas ou computacionais. Quando não se conhece completamente o processo a ser estudado, a identificação de sistemas torna-se essencial, permitindo estimar os parâmetros de um modelo com base em dados experimentais, utilizando técnicas estatísticas, métodos de otimização ou aprendizado de máquina (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002). Com base nesses modelos, são projetados os controladores, cuja função é regular o comportamento dinâmico do sistema para atingir objetivos específicos. O controle PID (Proporcional Integral Derivativo), por exemplo, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficácia em uma ampla gama de aplicações industriais. No entanto, quando se trata de sistemas não lineares, como os encontrados em processos de controle de nível, é comum aplicar técnicas de linearização em torno de pontos de operação para possibilitar o uso de controladores lineares como o PID (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010).

A planta SMAR-PD3 foi desenvolvida visando reproduzir, em escala reduzida, problemas típicos de sistemas industriais que envolvem o controle de variáveis como vazão, nível e temperatura de líquidos. Ela permite a experimentação prática e o desenvolvimento de estratégias de controle em um ambiente controlado, servindo como plataforma didática e de pesquisa aplicada. Em Callegari et al. (2019), por exemplo, propõe-se uma estratégia de modelagem caixa-preta do tanque de aquecimento da planta SMAR-PD3 efetuando a comparação com um modelo teórico baseado na física do processo. Essa análise envolve

a variação da temperatura da água no tanque em resposta a mudanças nas resistências e vazão de entrada.

No trabalho apresentado de Gomes, Nicacio e Tôres (2017), apresenta-se um sistema de controle de temperatura no tanque de mistura da planta SMAR-PD3. O processo envolveu tanto a modelagem teórica do sistema físico (o tanque) quanto a validação experimental. A partir dessa modelagem, foi possível ajustar e otimizar um controlador Proporcional e Integral (PI), buscando garantir um desempenho adequado do sistema em condições reais de operação. Os parâmetros da função de transferência do processo foram identificados experimentalmente, variando-se a vazão de entrada da água. A sintonia do controlador PI foi realizada considerando três diferentes volumes do tanque — representando pontos de operação distintos: níveis baixo, médio e alto. Para cada ponto, o sistema foi linearizado localmente, permitindo obter diferentes parâmetros do controlador ajustados às respectivas condições.

Riano, Rodriguez e Alvares (2017) apresentam um sistema de controle de temperatura para os processos de aquecimento e mistura de água em uma planta didática SMAR-PD3. Dada a natureza dinâmica e não linear desses processos, optou-se pela adoção de um controlador PID, embora a identificação dos parâmetros ideais represente um desafio. A metodologia utiliza um método de otimização fundamentado em algoritmos genéticos para a sintonia dos parâmetros do controlador PID, com base nas respostas transitórias de cada processo individual (aquecimento e mistura). A validação experimental na planta, por meio de aquisição de dados em tempo real via OPC (do inglês, *Open Platform Communications*), evidencia a eficácia do método na determinação dos parâmetros do controlador PID, assegurando uma resposta eficiente diante de variações no fluxo de entrada de água, mesmo quando novas referências são especificadas.

Em síntese, os trabalhos analisados com a planta didática SMAR-PD3 concentram-se, em sua maioria, no desenvolvimento de estratégias de controle, com destaque para aplicações envolvendo variáveis de processo como temperatura. Esses processos apresentam comportamentos não lineares, principalmente devido às trocas térmicas, além de apresentarem efeitos dinâmicos relacionados à inércia dos sensores; exigindo cuidados na modelagem e na sintonia dos controladores (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010). Embora existam estudos que fornecem uma base relevante, o controle de nível em plantas-piloto como a SMAR PD3-F ainda é pouco explorado, especialmente em condições que reproduzam cenários reais de operação. Neste trabalho, o foco se volta para o controle de nível, considerando sua ampla aplicação em sistemas de armazenamento e transporte de fluidos, e a necessidade de respostas precisas em cenários reais de operação.

1.3 Justificativa

A necessidade de controlar o nível de líquidos em tanques está presente em diversas aplicações industriais, como no setor de saneamento básico, em que é essencial regular os níveis em reservatórios de água para garantir o abastecimento contínuo da população (SILVA; ALMEIDA, 2016). Na indústria de alimentos e bebidas, por exemplo, o controle de nível é fundamental em processos como a fermentação e a mistura de ingredientes, em que variações indesejadas podem comprometer a qualidade e a padronização do produto final (PEREIRA; SANTOS, 2018). Nesses sistemas, falhas no controle de nível podem provocar consequências significativas, como transbordamento de tanques, interrupções no fluxo de processo, desperdício de matéria-prima e aumento nos custos operacionais (OGATA, 2010). Além disso, quando envolvem líquidos tóxicos ou inflamáveis, essas falhas também oferecem riscos ambientais e à segurança dos operadores (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010).

Apesar da importância do controle de nível na indústria em geral, na planta SMAR PD3-F surgem desafios específicos que justificam este estudo. Primeiramente, a modelagem matemática do sistema enfrenta dificuldades devido a variações nos sensores de pressão e vazão, que podem gerar dados imprecisos e comprometer a identificação do modelo do tanque. Em segundo lugar, o controle do nível precisa lidar com falhas ou ruídos nos sensores, bem como perturbações na vazão ou na operação da bomba, evitando transbordamentos, interrupções no fluxo ou sobrecarga dos equipamentos. Assim, o estudo visa implementar e analisar técnicas de controle, a fim de validar soluções aplicáveis a cenários reais de operação da planta SMAR PD3-F.

Localizada no Laboratório de Controle e Automação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (ICEA) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), a planta SMAR-PD3 atua no ajuste da vazão da bomba trifásica de forma independente dos parâmetros do sistema. Essa escolha justifica-se pela dificuldade de ajuste preciso da válvula pneumática nos pontos de operação necessários para a repetição dos testes — uma limitação observada em trabalhos anteriores que utilizaram a bomba monofásica (LAGE, 2019; SILVERIO, 2022). Dessa forma, a utilização da bomba trifásica permite uma implementação prática mais confiável das técnicas de controle, garantindo a repetibilidade e a robustez dos experimentos. Neste trabalho, o foco é a modelagem matemática e o controle de sistemas de nível em tanques industriais. Para isso, foram realizados experimentos na planta piloto SMAR PD3-F, utilizando técnicas de identificação de sistemas em abordagem “caixa preta” e ajustando modelos Autorregressivo com Entrada Exógenas (ARX, do inglês *Autoregressive with Exogenous Input*) pelo método dos mínimos quadrados. Com o modelo ajustado, projetaram-se controladores PI com parâmetros definidos pelo método de Ziegler-Nichols, avaliando o desempenho em malha fechada. O estudo demonstra a importância da integração entre modelagem e controle, garantindo operação estável, repetibilidade dos ensaios e desempenho satisfatório do sistema em condições práticas de

laboratório.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e avaliar técnicas de identificação e controle para o sistema de nível de tanques industriais, visando garantir a estabilidade, precisão e eficiência operacional do processo.

1.4.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são listados:

1. Modelar o sistema de nível composto pelo tanque e bomba trifásica;
2. Projetar e testar controladores para o nível do tanque na planta SMAR PD3, atuando no ajuste da vazão da bomba trifásica de forma independente dos parâmetros do sistema;
3. Avaliar a qualidade da estratégia de controle, com relação à aplicabilidade e à qualidade dos resultados obtidos em comparação com as especificações desejadas e estratégias clássicas de controle de processos industriais.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em quatro capítulos principais.

No Capítulo 1, é apresentada a introdução, que contextualiza o tema, descreve a justificativa, os objetivos gerais e específicos, além da estrutura geral do estudo.

No Capítulo 2, desenvolve-se a revisão bibliográfica, abordando os fundamentos teóricos relacionados à planta didática SMAR PD3-F, aos instrumentos utilizados na medição e controle de nível, bem como aos conceitos de modelagem, identificação de sistemas e métodos de sintonia de controladores, com ênfase na metodologia de Ziegler–Nichols.

O Capítulo 3 apresenta os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho, englobando desde a obtenção do modelo da planta até o projeto, implementação e validação experimental dos controladores PI.

Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões, nas quais são discutidos os principais achados, as contribuições do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo, serão descritas a planta piloto utilizada (SMAR-PD3), suas funcionalidades, estrutura e toda a sua instrumentação para a implementação do projeto. Além disso, serão apresentadas as técnicas de modelagem e identificação do sistema, e as técnicas utilizadas para o projeto dos controladores utilizados neste trabalho.

2.1 Planta didática SMAR PD3-F

A planta didática SMAR PD3-F, apresentada na Figura 1, foi desenvolvida para reproduzir em pequena escala sistemas industriais que envolvem o controle de variáveis como vazão, nível e temperatura de líquidos. Sua estrutura modular permite a implementação de diferentes estratégias de controle, permitindo a simulação de cenários encontrados em setores como saneamento, indústria química, alimentos e bebidas, nos quais o controle eficiente dessas variáveis é fundamental para garantir a qualidade, segurança e desempenho dos processos. A planta é monitorada e operada por uma estação de trabalho, constituída de um microcomputador e um programa de supervisão, que efetua a aquisição de dados dos equipamentos e o apresenta por meio de animações de telas no *System 302* (SMAR, 2008). Os instrumentos de medição presentes na planta estão conectados a um controlador (Smar, modelo DF63) via uma rede *Fieldbus*. Essas informações são monitoradas a partir de um computador, que permite controlar remotamente os instrumentos (SEBORG et al., 2011). Conforme pode ser observado nas Figuras 1 e 2, a planta SMAR é formada por duas malhas distintas, a 31 e a 32. Contudo, todo o desenvolvimento deste trabalho foi conduzido exclusivamente na malha 31, a qual é composta por um arranjo que inclui um tanque principal, de maior capacidade, localizado na base. Essa configuração está ilustrada na Figura 3.

O sistema é composto por dois tanques principais: o primeiro, localizado no canto superior esquerdo, é destinado ao aquecimento de líquidos por meio de resistências de imersão; o segundo, situado no canto superior direito, funciona como tanque de mistura. Durante a operação, a vazão do fluido é controlada por válvulas pneumáticas identificadas como FY-31 e FY-32, que recebem comandos dos transmissores de vazão, permitindo o ajuste preciso do nível de líquido nos tanques superiores. Essa estratégia caracteriza uma aplicação de controle em cascata, na qual uma malha primária (nível) utiliza como variável manipulada a saída de uma malha secundária (vazão), proporcionando maior precisão e estabilidade ao processo.

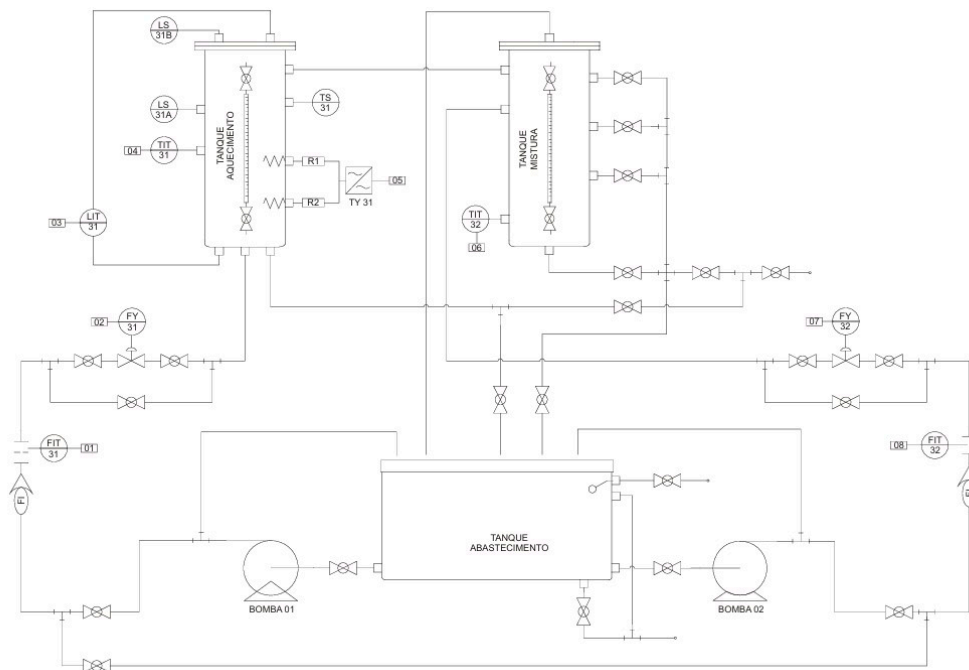
Além das válvulas pneumáticas, uma alternativa amplamente empregada para o controle de nível em sistemas industriais é o uso de bombas trifásicas acionadas por inversores de frequência. Embora a planta disponha também de uma bomba monofásica,

Figura 1 – Planta didática SMAR-PD3.



Fonte: Retirado de SMAR (2011).

Figura 2 – Diagrama P&ID da planta : Malha 31 e Malha 32.



Fonte: Retirado de SMAR (2011).

esta não foi considerada nos ensaios, visto que o presente estudo concentra-se na bomba trifásica. A escolha justifica-se pela necessidade de implementar o controle de nível com

maior precisão, uma vez que o ajuste das válvulas nos pontos de operação requeridos para a repetição dos testes apresenta dificuldade. Nessa configuração, a vazão do fluido é ajustada indiretamente por meio do controle da frequência da corrente elétrica fornecida ao motor. O uso de inversores de frequência proporciona uma resposta mais suave e contínua às alterações nas condições do sistema, favorecendo a estabilidade operacional. Essa abordagem se destaca especialmente quando associada a controladores automáticos, como os PID, que ajustam a velocidade da bomba de forma precisa, conforme a demanda do processo (SILVA; ALMEIDA, 2016).

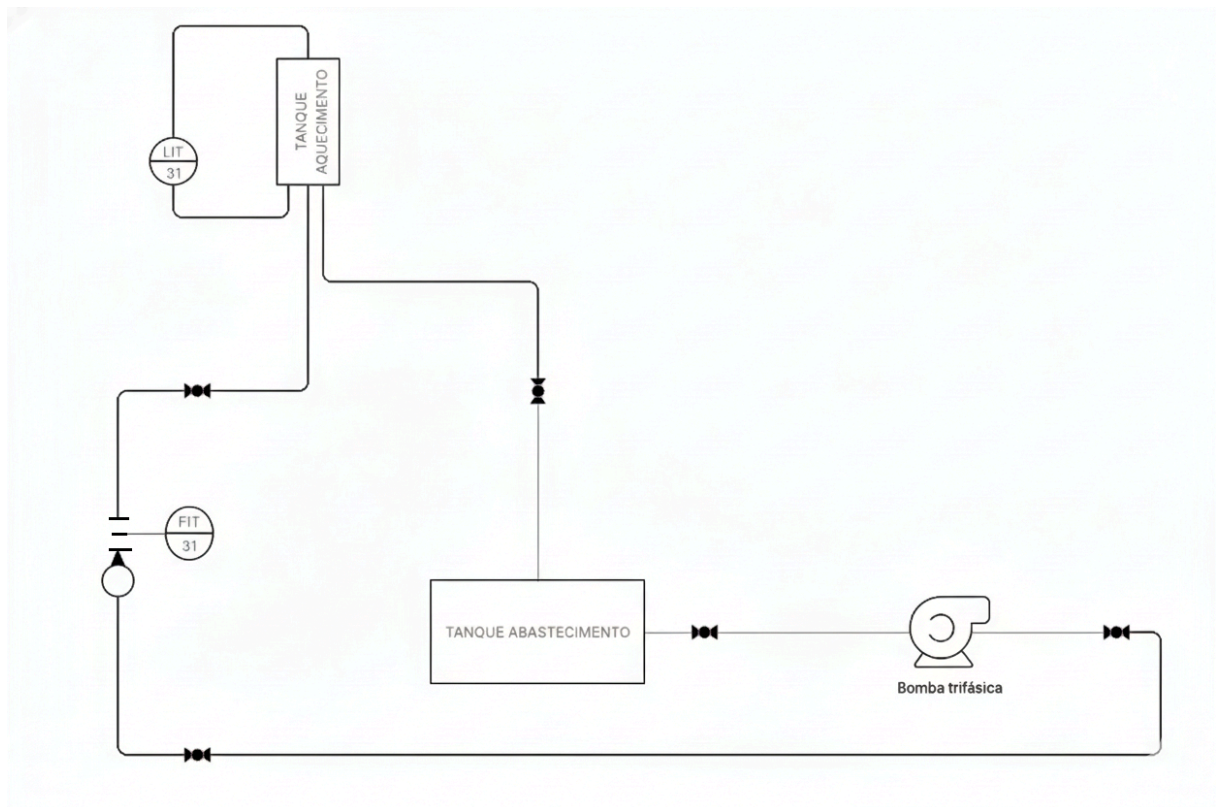
Comparando-se o uso de válvulas pneumáticas com o controle por bomba trifásica associada a inversores de frequência, percebe-se que cada abordagem apresenta características distintas. As válvulas de controle são amplamente utilizadas na indústria devido ao menor custo inicial e à facilidade de integração em sistemas existentes, como relatado por (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010). No entanto, estão sujeitas a desgaste mecânico e podem ter desempenho limitado em processos com variações rápidas. Por outro lado, o uso de inversores de frequência permite ajustar a vazão de forma mais precisa e eficiente, com menor desgaste dos componentes e maior economia de energia (SILVA; ALMEIDA, 2016). Essa solução, entretanto, demanda um investimento inicial mais elevado e maior atenção à configuração e proteção do motor. A escolha entre essas estratégias deve considerar o tipo de processo, o nível de exigência do controle, os custos envolvidos e os requisitos de manutenção. Em geral, o controle por inversor é mais indicado quando se busca maior desempenho e flexibilidade operacional (FRANCO; SILVA, 2015).

O diagrama P&ID referente à malha 31 é apresentado na Figura 3. Nele, estão representados os principais componentes do processo — tanques, válvulas, sensores e atuadores — bem como suas interconexões. O diagrama foi construído conforme a norma ISA 5.1 (International Society of Automation (ISA) (2024)), que padroniza os símbolos gráficos e a nomenclatura dos TAGs. Os TAGs consistem em códigos alfanuméricos que identificam de forma única cada instrumento, elemento de campo ou dispositivo de controle presente no sistema. Tal padronização visa facilitar a interpretação, o projeto e a comunicação técnica entre os profissionais da área. Além da identificação dos instrumentos, a norma também define as siglas e convenções utilizadas para representar os diferentes tipos de instrumentos e sistemas de controle. Ao longo deste trabalho, os significados das principais siglas e símbolos serão apresentados conforme sua aplicação.

2.2 Instrumentos da planta SMAR-PD3

Nesta seção, apresentam-se alguns dos instrumentos utilizados diretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 3 – Diagrama P&I da malha 31 planta didática SMAR-PD3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.1 Transmissor de pressão diferencial para medição de nível (LIT-31)

Conforme especificado no datasheet do transmissor de pressão Fieldbus (SMAR, modelo LD302), o equipamento identificado pela TAG LIT-31, foi utilizado para medir o nível do fluido no tanque (SMAR, 2020). Esse equipamento, apresentado na Figura 4, foi projetado para monitorar o nível do tanque de aquecimento. Para realizar a medição, o dispositivo utiliza um método baseado na diferença de pressão entre dois pontos do tanque. Esse processo é viabilizado por um sensor capacitivo, cuja capacitância é alterada em resposta às variações de pressão nos diafragmas. Internamente, o instrumento analisa os dados de capacitância e os converte em valores percentuais de nível, os quais são apresentados no *display* do equipamento (SMAR, 2011).

2.2.2 Bombas hidráulicas

Na Planta Didática SMAR-PD3, duas bombas hidráulicas desempenham um papel crucial no controle do processo de circulação de água por intermédio das malhas de controle: uma bomba monofásica (*Hydrobloc P500*) e uma bomba trifásica (*Hydrobloc P500T*). A definição sobre qual bomba será utilizada em cada malha é determinada pelo processo de abertura e fechamento de algumas válvulas manuais. Para este estudo específico, a escolha foi direcionada à utilização da bomba hidráulica trifásica para regular o

Figura 4 – Transmissor de pressão LD302.



Fonte: Retirado de SMAR (2011).

fluxo de água injetado no tanque de aquecimento da planta didática, efetuando o controle da vazão.

A bomba utilizada é a Hydrobloc P500T NG 1/2CV Trifásica 220/380V, que possui potência de 0,5 CV, tensão trifásica de 220/380 V, rotação de 3500 rpm e vazão nominal máxima de 2,4 m³/h a uma altura manométrica de 4 metros. Essa bomba é adequada para o bombeamento de água em sistemas industriais e apresenta boa eficiência e confiabilidade para o controle de vazão exigido neste processo.

A Planta Didática SMAR-PD3 utiliza o inversor de frequência CFW08 (WEG, 2021), cuja foto é apresentada na Figura 5, para controlar a velocidade de rotação da bomba trifásica, regulando a vazão do líquido bombeado. O controle da velocidade é realizado por meio de um sinal de referência analógico na faixa de 4 a 20 mA, gerado e ajustado pelo sistema *System 302*. Esse sinal representa a referência desejada para a velocidade do inversor e permite variar a taxa de fluxo.

2.2.3 Transmissor de pressão diferencial para medição de vazão (FIT-31)

Conforme especificado no *datasheet*, o transmissor de pressão diferencial (SMAR, modelo LD302), identificado pela TAG FIT-31, foi instalado para realizar a medição da vazão do fluido no tanque. O princípio de funcionamento baseia-se na diferença de pressão gerada por um elemento primário de vazão (como uma placa de orifício), a qual é proporcional à vazão do fluido. O transmissor converte a pressão diferencial entre dois pontos do sistema em um sinal elétrico, utilizado para o controle e o monitoramento do processo.

Figura 5 – Inversor de frequência CFW08.



Fonte: Retirado de WEG (2021)

2.3 Redes de comunicação

Na Planta SMAR-PD3, são empregadas duas redes de comunicação distintas. A rede Foundation Fieldbus H1 opera com uma taxa de 31,25 Kbits/s e utiliza uma camada física conforme as normas ISA S50.02-1992 ou IEC 61158-2:2000. Essas normas especificam o uso de cabo par trançado blindado para a comunicação entre os equipamentos de campo. Além disso, cada equipamento recebe um endereço lógico de 1 *byte* na rede (SMAR, 2011). Entre os dispositivos conectados a essa rede estão transmissores de nível, transmissores de pressão, válvulas de controle e controladores de campo, que permitem a medição, o ajuste e a automação dos processos realizados na planta.

Por outro lado, a rede Foundation Fieldbus HSE funciona na camada física Ethernet, com uma taxa de comunicação de 100 Mbps, seguindo as normas IEEE 802.3-2000 e ISO/IEC 8802.3-2000. Essa configuração permite a construção de uma rede de controle industrial composta por componentes de diferentes fabricantes. Ademais, ela desempenha o papel de conexão entre os sistemas supervisórios e os Controladores Lógicos Programáveis (CLP ou PLC, do inglês *Programmable Logic Controllers*) (SMAR, 2011). Nesse contexto, cabe destacar que os controladores de campo atuam diretamente no processo, realizando medições e executando estratégias de controle local de forma autônoma, enquanto os CLPs têm papel centralizado, processando a lógica de controle, integrando diferentes malhas e estabelecendo a interface com os sistemas supervisórios.

A integração entre os instrumentos e a unidade central de processamento (CPU,

do inglês *Central Processing Unit*) requer a utilização coordenada de vários módulos. Na configuração da planta SMAR-PD3, destaca-se a presença da plataforma de controle e automação de processos (veja a Figura 6). Essa plataforma é constituída, por fontes de alimentação, controladores e módulos adaptadores de impedância para otimização das linhas de comunicação.

Figura 6 – Plataforma de controle e automação de processos DFI302.



Fonte: Retirado de SMAR (2011).

O módulo controlador utilizado neste estudo é o DF-63, o qual integra as funções de *gateway* entre as redes Foundation Fieldbus H1 e HSE. Esse módulo permite a comunicação com os instrumentos de campo por meio da rede H1, ao mesmo tempo, em que se conecta ao sistema supervisor via rede HSE, que opera sobre a estrutura Ethernet.

Sua compatibilidade com a plataforma OPC (do inglês, *Open Platform Communication*) adiciona um importante nível de flexibilidade, permitindo a integração com várias plataformas de supervisão disponíveis. Destaca-se que a plataforma OPC constitui um padrão de interoperabilidade voltado à troca segura de dados na automação industrial. Inicialmente, o termo OPC significava *OLE for Process Control*, em que OLE (do inglês, *Object Linking and Embedding*) refere-se a uma tecnologia desenvolvida pela Microsoft para permitir a integração e o compartilhamento de informações entre diferentes aplicativos. Neste trabalho, esse recurso foi utilizado para integrar os instrumentos ao *software Matlab* por intermédio do *OPC Toolbox*, permitindo que fossem realizadas operações de leitura e escrita nos sensores e atuadores que compõe a planta.

2.3.1 Conexão via *Matlab*

O gerenciamento completo da configuração, operação e supervisão da planta é utilizando o *software System 302*. 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.

O *software Matlab* foi empregado para acessar os dados armazenados no OPC. O *OPC Toolbox* foi utilizado para possibilitar a leitura e escrita dos dados de entrada/saída

provenientes dos sensores e atuadores por meio do *Matlab*. Essa abordagem permite utilizar o *Matlab* para controlar remotamente a vazão de saída da bomba trifásica. Essa comunicação é estabelecida criando-se uma conexão com o servidor OPC, configurando grupos e adicionando dispositivos utilizando os *TAGs* fornecidos pelos fabricantes, permitindo a troca de dados em tempo real entre o *Matlab* e os equipamentos da planta (LAGE, 2019).

2.4 Modelagem e identificação de sistemas

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

2.4.1 Estratégias de modelagem

A modelagem caixa branca é uma abordagem focada na compreensão e representação de sistemas, baseada no conhecimento de sua estrutura e dinâmica internas. Essa metodologia se baseia na criação de modelos matemáticos que representam o comportamento do sistema por meio das relações causais entre seus componentes internos. Segundo Ljung (1999) e Åström e Murray (2010), a modelagem caixa branca utiliza leis fundamentais da física, equações diferenciais e princípios específicos da área para construir modelos. Os modelos obtidos devem ser capazes de descrever o funcionamento do sistema e suas respostas a diferentes estímulos (ISERMANN, 2011). A construção desses modelos pode ser desafiadora, exigindo um conhecimento profundo do sistema e uma coleta precisa de dados para validar e ajustar o modelo (GOODWIN; GRAEBE; SALGADO, 2000). Assim, a modelagem caixa branca é especialmente valiosa em situações em que o conhecimento detalhado do sistema está disponível.

A modelagem caixa preta, também conhecida como modelagem empírica, desempenha um papel fundamental na compreensão e previsão do comportamento de sistemas complexos, sem exigir um conhecimento detalhado de sua estrutura interna. Essa abordagem permite obter experimentalmente um modelo matemático que relaciona os dados de entrada e saída do sistema. Uma variedade de métodos está disponível para essa finalidade, incluindo abordagens estatísticas, matemáticas e de aprendizado de máquina. Esses métodos são utilizados para analisar os dados coletados e identificar padrões, relações ou características importantes que podem ser úteis na modelagem e previsão de sistemas dinâmicos (LJUNG, 1999).

As técnicas estatísticas, por exemplo, podem ser utilizadas para identificar tendências ou distribuições nos dados (MONTGOMERY, 2012), enquanto métodos matemáticos baseados em princípios físicos ou teóricos podem ser aplicados para desenvolver modelos precisos do sistema (OGATA, 2010). Por outro lado, técnicas de aprendizado de máquina podem ser utilizadas para identificar padrões complexos nos dados, algo que dificilmente

poderia ser identificado por métodos tradicionais (BISHOP, 2006). Como resultado desse processo, um modelo é desenvolvido para prever o comportamento futuro do sistema ou para realizar simulações em diversas condições. Essa abordagem se destaca em cenários nos quais a complexidade do sistema dificulta ou torna inviável a compreensão detalhada de todos os seus componentes internos.

Neste trabalho, optou-se por desenvolver um modelo do tipo caixa preta, utilizando testes experimentais, coleta de dados de entrada e saída do sistema e estimação dos parâmetros de um modelo polinomial. Na próxima seção, serão apresentados os passos necessários para a realização do processo de identificação de sistemas, abordando as etapas que viabilizam a obtenção do modelo a partir das informações experimentais.

2.4.2 Identificação do sistema

Os principais passos para solucionar os problemas de identificação de sistemas são (AGUIRRE, 2023):

1. Testes dinâmicos e coleta de dados: executam-se ensaios no sistema a fim de efetuar a aquisição dos dados de excitação de entrada e a resposta exercida pelo sistema;
2. Escolha da representação matemática a ser usada: dependendo do tipo do sistema a ser modelado, representações matemáticas específicas são utilizadas para obter um melhor modelo para o sistema;
3. Determinação da estrutura do modelo: define-se a ordem do modelo a ser projetado para representar o sistema da forma mais fiel possível;
4. Estimação de parâmetros: métodos clássicos, como o de mínimos quadrados, são utilizados para encontrar os parâmetros da estrutura do modelo escolhida no passo anterior;
5. Validação do modelo: verifica-se se o modelo encontrado, de fato, descreve adequadamente o comportamento do sistema.

Diversas estratégias de identificação podem ser utilizadas para obter um modelo matemático que represente o sistema. A seguir, serão apresentadas as técnicas de identificação utilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2.5 Modelagem matemática pela resposta ao degrau

Nesta seção, serão apresentadas as etapas adotadas para a modelagem matemática do sistema, utilizando a resposta ao degrau como metodologia de identificação. A escolha por esse método se justifica por sua simplicidade e eficácia em revelar o comportamento

dinâmico de sistemas lineares, especialmente em malhas de controle com uma única entrada e uma única saída (SISO). A partir dessa resposta, é possível estimar os parâmetros da função de transferência do sistema, que servirá de base para o projeto dos respectivos controladores.

Em processos industriais, comumente, escolhe-se descrever os sistemas dinâmicos por sistemas de primeira ordem com atraso puro de transporte (SEBORG et al., 2011). Matematicamente, esses sistemas são descritos pela seguinte função de transferência

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s}, \quad (2.1)$$

em que K é o ganho estático, τ é a constante de tempo e θ é o atraso de transporte. Nota-se que o ganho K é definido como a razão entre a amplitude do sinal de saída e o sinal de entrada.

2.5.1 Método de Ziegler-Nichols em malha aberta a partir da curva de reação

O método de Ziegler-Nichols em malha aberta é utilizado sempre que o sistema não apresenta integradores (polos na origem), tampouco comportamento oscilatório devido à presença de polos complexos conjugados. Sendo assim, a curva de saída, ao ser aplicado um sinal de entrada do tipo degrau, possui o formato padrão em “S”, similar ao mostrado na Figura 7(b). A partir da resposta ao degrau, é possível estimar os parâmetros do modelo — ganho estático (K), constante de tempo (τ) e tempo morto (θ) — presente em (2.1). Para isso, traça-se a reta tangente ao ponto de maior inclinação da curva da resposta e determinam-se: o tempo morto θ , como a interseção da reta com o eixo do tempo; e a constante de tempo τ , como a distância entre a interseção da reta tangente com o valor final da saída e o ponto θ . O ganho K é calculado como a razão entre a variação da saída e a variação da entrada.

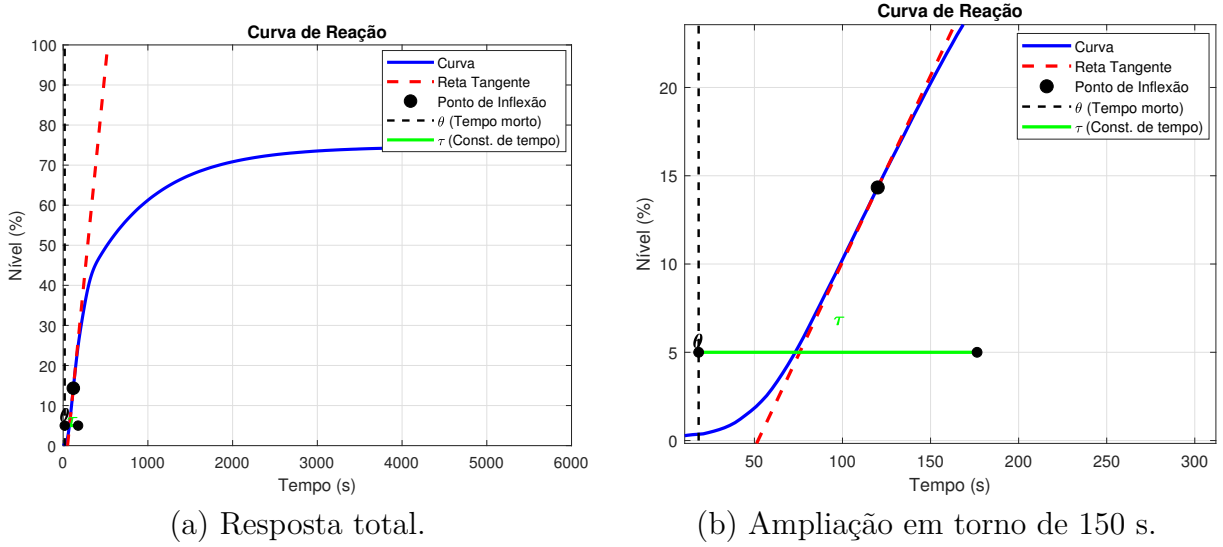
2.6 Modelagem matemática por modelos paramétricos

A modelagem matemática por modelos paramétricos desempenha um papel fundamental no controle de processos industriais. Por meio dessa abordagem, equações com parâmetros constantes são empregadas para descrever o comportamento dinâmico de sistemas físicos, como plantas industriais e processos químicos.

2.6.1 Modelo ARX

A determinação do modelo é feita por meio da descrição do sistema como uma equação a diferenças, que relaciona a entrada $u(k)$ com a saída $y(k)$ da planta (AGUIRRE,

Figura 7 – Representação da saída de um sistema hipotético a uma entrada em degrau unitário utilizando o Método de Ziegler-Nichols.



Fonte: Elaborada pela autora.

2023). Um modelo genérico de sistema pode ser representado por

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + v(k), \quad (2.2)$$

na qual os polinômios $A(q)$ e $B(q)$ são da forma

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}, \quad (2.3)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}, \quad (2.4)$$

q^{-1} é o operador de atraso unitário, de forma que $y(k)q^{-n} = y(k - n)$, $v(k)$ é um ruído branco com média nula e variância σ^2 , não correlacionado com a entrada e n_a e n_b são, respectivamente, as ordens dos polinômios associados à saída e à entrada.

O modelo em questão é conhecido como AutorRegressivo com entrada eXógena (ARX, do inglês *AutoRegressive with eXogenous input*) (LJUNG, 1999). Em notação matricial, mais compacta, (2.2) pode ser reescrita como

$$y(k) = \varphi^T(k) \theta + v(k), \quad (2.5)$$

em que

$$\theta^T = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_1, b_2, \dots, b_{n_b}],$$

e

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b)],$$

com θ sendo o vetor de parâmetros a estimar, enquanto o vetor φ contém os dados (entradas e saídas) do sistema.

Por fim, a estimação do vetor de parâmetros θ pode ser feita empregando o método dos mínimos quadrados, descrito na seção seguinte.

2.6.2 Método dos mínimos quadrados

Conforme mencionado anteriormente, uma das técnicas que pode ser usada na estimação dos parâmetros de um modelo é o método dos mínimos quadrados (MMQ). No método, para a função calculada ser a que melhor se ajusta aos dados, deve-se minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores estimados. Entretanto, para o resultado encontrado ser válido, é necessário que as diferenças, denominadas erros ou resíduos, satisfaçam determinadas condições, entre as quais se destaca a normalidade dos resíduos, isto é, que estes apresentem distribuição aproximadamente normal, média nula e ausência de correlação, caracterizando-se como ruído branco (LJUNG, 1999).

Em sistemas de controle, a abordagem dos mínimos quadrados é frequentemente aplicada para identificação e modelagem de sistemas dinâmicos. No contexto da identificação de sistemas lineares por meio de modelos ARX, a técnica de mínimos quadrados é amplamente utilizada para estimar os parâmetros do modelo (2.2).

Partindo de (2.5) e agrupando as observações para N instantes de tempo, obtém-se

$$Y = \Phi\theta + E, \quad (2.6)$$

em que Y é o vetor de saídas observado, dado por

$$Y = [y(n+1) \quad y(n+2) \quad \cdots \quad y(N)]^T, \quad (2.7)$$

Φ é a matriz de regressores construída pelas linhas $\varphi^T(k)$ para $k = n+1, \dots, N$, e E é o vetor dos erros de predição.

A solução de mínimos quadrados consiste em minimizar a soma dos quadrados dos erros E , equivalendo a minimizar a função de custo

$$J(\theta) = \|Y - \Phi\theta\|^2. \quad (2.8)$$

A minimização dessa função leva à seguinte expressão fechada para o vetor de parâmetros estimados

$$\hat{\theta} = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY, \quad (2.9)$$

desde que a matriz $\Phi^T\Phi$ seja invertível. Essa abordagem permite estimar os coeficientes do modelo ARX, a partir de dados experimentais de entrada e saída do sistema, assumindo que os erros $e(k)$ sejam um ruído branco com média nula.

2.6.3 Validação do modelo

Após a etapa de identificação, torna-se essencial avaliar se o modelo obtido descreve de maneira satisfatória a dinâmica do processo estudado. Essa etapa, denominada

validação, garante que o modelo não somente se ajuste aos dados utilizados na estimação, mas também seja capaz de reproduzir, com precisão aceitável, o comportamento do sistema em diferentes condições operacionais. A validação é indispensável na construção de modelos, pois um modelo deve ser avaliado não apenas pela sua habilidade de reproduzir os dados, mas principalmente pela sua capacidade de generalizar para novas situações (LJUNG, 1999). Adicionalmente, a validação permite verificar se as hipóteses assumidas durante a modelagem são coerentes com a realidade, evitando que o modelo se torne um mero ajustador de dados sem significado (AGUIRRE, 2023).

A prática usual consiste em aplicar ao modelo um conjunto de dados independente do usado na identificação e comparar suas respostas com as saídas reais do sistema. A comparação pode ser realizada por meio de métricas quantitativas, como o Erro Quadrático Médio (EQM), o Índice de Ajuste (FIT) ou o coeficiente de determinação. Além disso, análises qualitativas, como a inspeção gráfica dos resíduos e a verificação de sua correlação com as entradas, são fundamentais para assegurar que os erros se comportem como ruído. Assim, a validação é um passo para confirmar a qualidade do modelo antes de sua aplicação em simulações, previsão de variáveis ou no projeto de controladores. A confiabilidade obtida nessa fase sustenta todas as etapas posteriores do estudo.

2.7 Controladores PID

Enquanto os sistemas em malha aberta operam com base em entradas predeterminadas, os sistemas em malha fechada utilizam um processo contínuo de realimentação para ajustar e otimizar o desempenho do sistema em tempo real. Essa configuração torna-se particularmente crucial em aplicações nas quais a precisão e a estabilidade são essenciais.

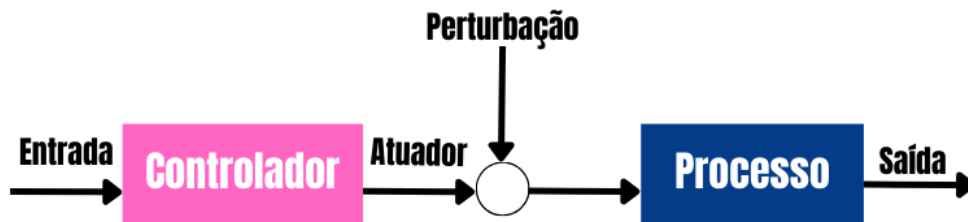
A Figura 8 ilustra o esquema típico de um sistema em malha aberta, no qual a saída não influencia diretamente a entrada. Em contraste, a Figura 9 mostra o sistema em malha fechada, no qual a saída é continuamente comparada com um valor de referência desejado. O controlador utiliza essa comparação para calcular um sinal de erro e , então, utiliza-o para ajustar o sistema, garantindo que a saída permaneça o mais próxima possível do valor desejado. Um dos controladores mais comuns e eficazes utilizados nessa configuração é o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo), que será discutido em detalhes nesta seção.

O controlador PID também é conhecido como controlador de três modos, recebendo esse nome por incluir três componentes essenciais: o termo proporcional (K_P), o termo integral (K_I) e o termo derivativo (K_D) (DORF; BISHOP, 2014). A função de transferência do controlador é dada por

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s. \quad (2.10)$$

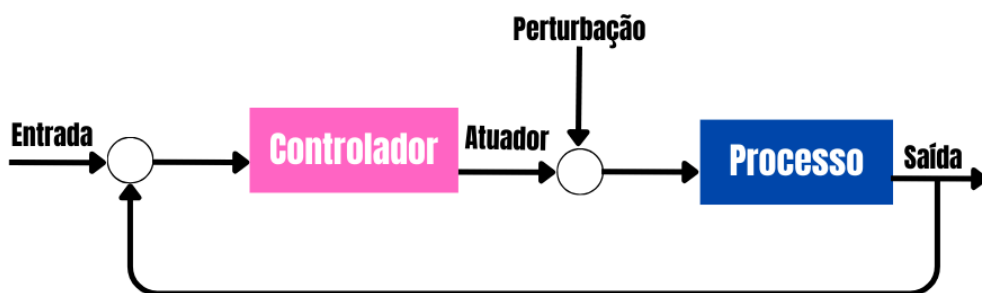
Existem várias abordagens para determinar os valores de K_P , K_I e K_D . A Tabela 1

Figura 8 – Representação por diagrama de blocos de um sistema em malha aberta.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 9 – Representação por diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.



Fonte: Elaborada pela autora.

apresenta, de forma geral, os efeitos da variação dos parâmetros do controlador PID sobre a resposta do sistema, sendo a máxima ultrapassagem percentual (MUP) e o tempo de assentamento algumas das grandezas observadas. Essa compreensão é fundamental para orientar os métodos formais de projeto dos coeficientes do controlador, que serão abordados nos capítulos seguintes.

Tabela 1 – Efeito do aumento dos ganhos do PID K_P , K_I e K_D na resposta ao degrau de um sistema em malha fechada.

Ganho PID	MUP	Tempo de assentamento	Erro em regime permanente
Aumento de K_P	Aumenta	Impacto mínimo	Diminui
Aumento de K_I	Aumenta	Aumenta	Erro nulo
Aumento de K_D	Diminui	Diminui	Nenhum impacto

Fonte: Adaptado de Dorf e Bishop (2014).

2.7.1 Método de Sintonia via Ziegler-Nichols

A sintonia de controladores PID é uma etapa crucial para otimizar o desempenho de sistemas de controle. O método de Ziegler-Nichols é amplamente adotado como ponto

de partida nesse processo, oferecendo uma abordagem sistemática para determinar valores iniciais dos parâmetros do controlador com base na resposta dinâmica do sistema controlado (ZIEGLER; NICHOLS, 1942).

Os métodos de sintonia automática do PID, como o Ziegler-Nichols, utilizam algoritmos específicos baseados em análise matemática ou técnicas de otimização para determinar os valores ideais dos parâmetros do controlador. Essas técnicas oferecem uma solução rápida, contribuindo para a obtenção de um desempenho do sistema de controle aceitável e eficaz. Destaca-se, no entanto, que usualmente exige-se uma etapa posterior de ajuste da sintonia inicial (*detuning*).

No método de Ziegler-Nichols, a curva apresentada na Figura 7 é utilizada para identificar os parâmetros θ (atraso) e τ (constante de tempo). A partir deles, obtêm-se as constantes proporcional, integradora e derivativa para controladores do tipo P, PI e PID, cujos valores são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Sintonia de PID por Ziegler-Nichols usando curva de reação.

Tipo de Controlador	K_P	K_I	K_D
P	$\frac{\tau}{\theta}$	0	0
PI	$\frac{0,9\tau}{\theta}$	$\frac{0,27}{\theta^2}$	0
PID	$\frac{1,2\tau}{\theta}$	$\frac{0,6}{\theta^2}$	$0,6\theta$

Fonte: Retirado de Ogata (2010).

Para o desenvolvimento do projeto empregando a técnica de Ziegler-Nichols, neste trabalho, seguiu-se o seguinte procedimento:

1. O sistema foi colocado em malha aberta, garantindo a estabilidade do processo;
2. Uma entrada em degrau foi aplicada ao sistema;
3. A resposta da variável de processo foi registrada;
4. A partir da curva de reação do sistema, foram determinados os parâmetros θ (atraso) e τ (constante de tempo);
5. Utilizando as expressões propostas por Ziegler-Nichols (Tabela 2), foram calculados os parâmetros do controlador PID.

2.7.2 Projeto via Programas Computacionais

Uma segunda técnica de projeto foi adotada com o intuito de comparar os resultados obtidos. Foram projetados controladores PI, utilizando o ambiente computacional

Matlab. As ferramentas e funções disponíveis na plataforma permitiram realizar a sintonia automática com base no modelo da planta, conferindo maior rapidez, precisão e reprodutibilidade ao processo de projeto. A integração entre métodos clássicos, como Ziegler-Nichols, e abordagens computacionais modernas possibilitou uma análise comparativa abrangente entre técnicas manuais e automatizadas. Essa comparação foi essencial para avaliar o desempenho dos diferentes controladores desenvolvidos e fundamentar a escolha da estratégia de controle mais adequada ao sistema em estudo.

2.7.3 Aspectos práticos da implementação dos controladores

Destaca-se que, neste estudo, o sistema de controle de nível foi linearizado em torno de um ponto de operação, o qual será detalhado posteriormente. Assim, optou-se pelo desenvolvimento de um controlador PI devido à sua eficácia comprovada em sistemas industriais de controle de nível (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002). O controlador PI elimina o erro em regime permanente e proporciona desempenho satisfatório em muitas aplicações práticas, mesmo quando a dinâmica real do sistema é mais elaborada do que a do modelo simplificado. De modo que a função de transferência do controlador PID, pode ser especializada para tratar o caso do PI. Para isso, basta considerar $K_d = 0$, de modo que (2.10) pode ser reescrita como

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s}. \quad (2.11)$$

Finalmente, para aplicações digitais, como no caso deste estudo, torna-se necessário utilizar uma versão discretizada do controlador, cuja estrutura discreta, obtida pelo emprego da técnica de discretização Euler para frente, apresentada em (PHILLIPS; NAGLE, 1995), é dada por

$$G_c(z) = K_P + K_I \frac{T}{z - 1}, \quad (2.12)$$

sendo T o período de amostragem utilizado.

2.8 Considerações parciais

Neste capítulo, foram abordadas estratégias de modelagem e identificação de sistemas, essenciais para a compreensão e o controle de processos dinâmicos. Inicialmente, discutiram-se diferentes abordagens para a obtenção de modelos, destacando-se a importância da escolha adequada da técnica de identificação em função do tipo de sistema e dos objetivos do estudo.

O modelo ARX e o método de mínimos quadrados foram explicados, os quais são empregados para estimar modelos lineares discretos a partir de dados experimentais, possibilitando a representação matemática da dinâmica do processo. Essas técnicas

forneceram uma base consistente para análises posteriores, mostrando-se adequadas na determinação de parâmetros relevantes.

A partir dos modelos identificados, é possível projetar controladores PID visando melhorar o desempenho do sistema. Observa-se ainda que, quando ajustados apropriadamente, tais controladores garantem respostas mais rápidas e estáveis, desde que fundamentados em modelos confiáveis obtidos na etapa de identificação.

3 Resultados

Este capítulo apresenta os testes realizados no decorrer do desenvolvimento do trabalho, destacando as primeiras análises de desempenho do sistema e a aplicação dos controladores, bem como as melhorias observadas ao longo do projeto.

3.1 Configurações iniciais

Foram realizados testes preliminares na planta didática, a fim de verificar o funcionamento correto dos equipamentos. Para isso, utilizou-se o *software* System 302 em conjunto com o Matlab, além das informações fornecidas pelo fabricante (SMAR, 2008). Conforme apresentado na Seção 2.1, utilizou-se a malha 31 da planta para o controle do nível do tanque, conforme mostrado na Figura 3. A malha 32 permaneceu isolada por meio do ajuste de válvulas manuais para não interferir no experimento.

Por questões construtivas, o sensor de nível LIT-31 — um transmissor de pressão diferencial do tipo Fieldbus —, foi instalado em um ponto localizado abaixo do fundo do tanque de aquecimento. Este sensor opera por meio da medição de diferença de pressão entre dois pontos, convertendo a diferença em um valor percentual correspondente ao nível do líquido no tanque. No entanto, devido ao desnível entre o ponto de medição e o fundo do tanque, ocorre uma pressão adicional gerada pela coluna de líquido existente no trecho de tubulação entre o tanque e o sensor. Essa condição fazia com que o instrumento indicasse um valor diferente do real. Para contornar esse problema, foi necessário realizar um ajuste no *software* System 302, modificando o valor de referência do sensor. Esse ajuste se tornou necessário porque o sensor apresentava uma leitura inconsistente; por exemplo, embora o nível inicial fosse 0, o sensor indicava -20 . Na sequência foram realizados ajustes nas válvulas manuais a fim de garantir que o nível do tanque variasse entre 0 e 100%. Para isso, a válvula de controle FY-31 e a válvula manual 1 foram abertas em 100%. Em seguida, a válvula manual 2 foi ajustada de modo a garantir que o nível do tanque não ultrapassasse o valor de 100% indicado por uma régua de medição posicionada ao lado do tanque. Tal ajuste garante que o nível do tanque não ultrapasse o valor máximo.

3.2 Obtenção de modelo a partir de uma entrada ao degrau

Visando determinar a função de transferência em tempo discreto da planta, foram realizadas coletas de dados a partir da aplicação de sinais na forma de degraus na referência de nível do sistema. O controle do motor que aciona a bomba de recirculação é realizado por meio de um inversor de frequência, cuja referência de velocidade é ajus-

tada por um sinal analógico de corrente de 4,00 mA a 20,00 mA. O sinal é gerado por um conversor que recebe, a partir do *software* de controle Matlab, um valor percentual de referência entre 0% e 100%. A relação entre a corrente de controle e a frequência de operação do inversor é linear, em que 0% corresponde a 4,00 mA (0 Hz — motor parado) e 100% corresponde a 20,00 (60 Hz — velocidade máxima do motor). Durante os testes, foram aplicadas variações no *setpoint* de referência do nível da planta, correspondendo aos valores de 52,00%, 54,00%, 56,00% e 58,00%, escolhidas visando manter o sistema operando numa faixa linear, próxima ao ponto de operação de 75,00%. Ressalta-se que o valor de 75,00% como região de linearidade, foi definido com base em estudos anteriores, como o de Lage (2019). Esses valores foram selecionados com base em uma análise preliminar do comportamento estático da planta, buscando evitar saturações ou regiões de não linearidade. Ao mesmo tempo, procurou-se garantir variações de amplitude suficientemente perceptíveis na saída do sistema para permitir uma boa caracterização da resposta ao degrau.

Durante os testes, os dados foram registrados diretamente no *software* Matlab, que registra tanto os valores da variável manipulada (sinal enviado ao inversor) quanto da variável controlada (nível do tanque). A Figura 10 apresenta a resposta do nível em função do tempo, resultante da aplicação de um degrau de aproximadamente 56,00% no sinal enviado ao inversor. A curva exibida corresponde aos resultados obtidos a partir das medições coletadas durante os experimentos visando reduzir os efeitos de ruídos e obter uma resposta mais representativa do comportamento da planta. Observa-se que o sinal enviado ao inversor foi suficiente para conduzir o sistema a um nível próximo de 75,00%, evidenciando a relação entre a velocidade da bomba e a variação do nível no tanque.

De posse dos dados experimentais, foi possível obter uma função de transferência de primeira ordem utilizando técnicas de identificação de sistemas no Matlab. Inicialmente, os sinais de nível coletados para diferentes valores de referência foram importados e combinados para gerar uma média representativa da resposta da planta. Para estimar os parâmetros do modelo, foi utilizada a abordagem de *mínimos quadrados*, montando-se uma matriz de regressão com os valores de saída e entrada deslocados em uma amostra, e calculando-se os coeficientes por $\theta = \psi \backslash y$, resultando em uma função de transferência discreta de primeira ordem. Além disso, também foi aplicado o método *ARX*, por meio do comando `arx([ymean umean], [1 1 0])`, que estima os coeficientes do modelo considerando as ordens da saída e da entrada igual a 1 e sem atraso. Logo, a função para o sistema de nível tanto nos domínios contínuo e discreto estão apresentadas na Tabela 3.

O objetivo dos testes com diferentes valores de referência de nível — entre 52,00% e 58,00% — foi analisar o comportamento da planta em uma faixa próxima ao ponto de operação. Essa abordagem visou verificar se pequenas variações nas condições de operação provocariam alterações significativas na resposta do sistema, assegurando que os ensaios permanecessem na região linear do processo. Com isso, buscou-se avaliar a consistência

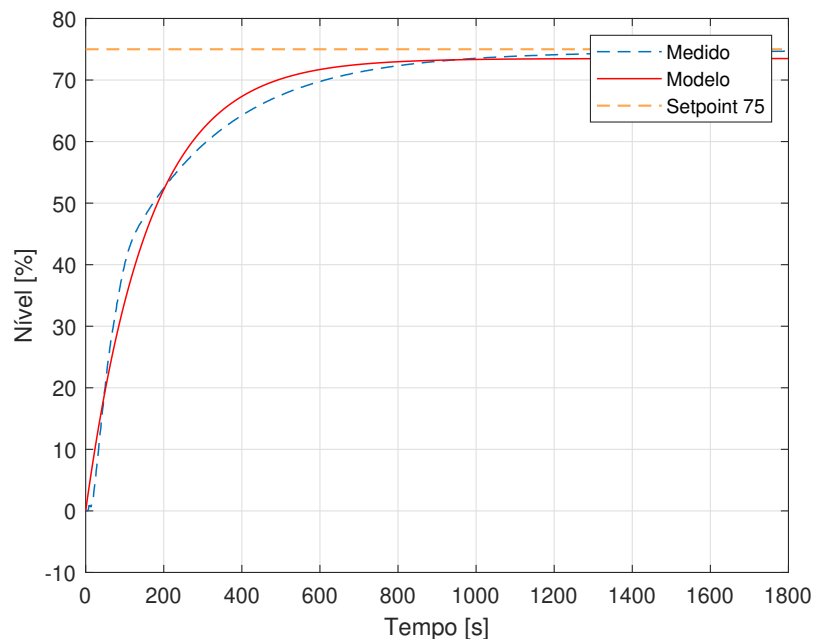
Tabela 3 – Funções de transferência nos domínios contínuo e discreto.

Domínio	Função de Transferência
Contínuo	$G(s) = \frac{0,008133}{s + 0,006198}$
Discreto	$G(z) = \frac{0,02417}{z - 0,9816}$

Fonte: Elaborada pela autora.

e a capacidade de generalização do modelo dentro dessa faixa de operação. A resposta desse modelo também é apresentada na Figura 10, permitindo comparar o comportamento simulado com os dados reais coletados da planta.

Figura 10 – Representação da curva da variação do nível do tanque em função do tempo, obtida a partir das coletas realizadas para os sinais de entrada de 52,00%, 54,00%, 56,00% e 58,00%.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante destacar alguns parâmetros essenciais para a análise do desempenho do sistema. O tempo de assentamento (T_{ss}) por exemplo, corresponde ao intervalo necessário para que a resposta do sistema se estabilize em uma faixa predefinida em torno do valor de referência, enquanto a Máxima Ultrapassagem Percentual (MUP) indica o percentual pelo qual a resposta ultrapassa temporariamente o valor de regime permanente, calculado com base na diferença entre o pico máximo da resposta e o valor final desejado; e, por fim, o erro em regime permanente (E_{ss}) representa a diferença entre a saída do sistema em estado estacionário e o valor de referência, servindo como medida da precisão do

controlador (OGATA, 2010). Nesse contexto, as especificações de desempenho do sistema para projeto dos controladores estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações de desempenho utilizadas como referência para o projeto e análise futuros dos controladores.

Parâmetro	Especificação
MUP (%)	42,2
T_{ss} (s)	507
E_{ss}	0

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 Validação do modelo a partir de uma entrada ao degrau

A validação do modelo constitui uma etapa fundamental para conferir credibilidade à representação matemática obtida, assegurando que o modelo identificado, não somente representa o conjunto de dados utilizado na identificação, mas é genérico o suficiente para representar o demais dados oriundos do mesmo sistema. Além disso, a validação do modelo garante que o modelo possa ser utilizado de forma confiável no projeto do controlador (OGATA, 2010).

Portanto, optou-se por analisar a resposta do sistema a partir do modelo discreto identificado, cuja função de transferência é dada por

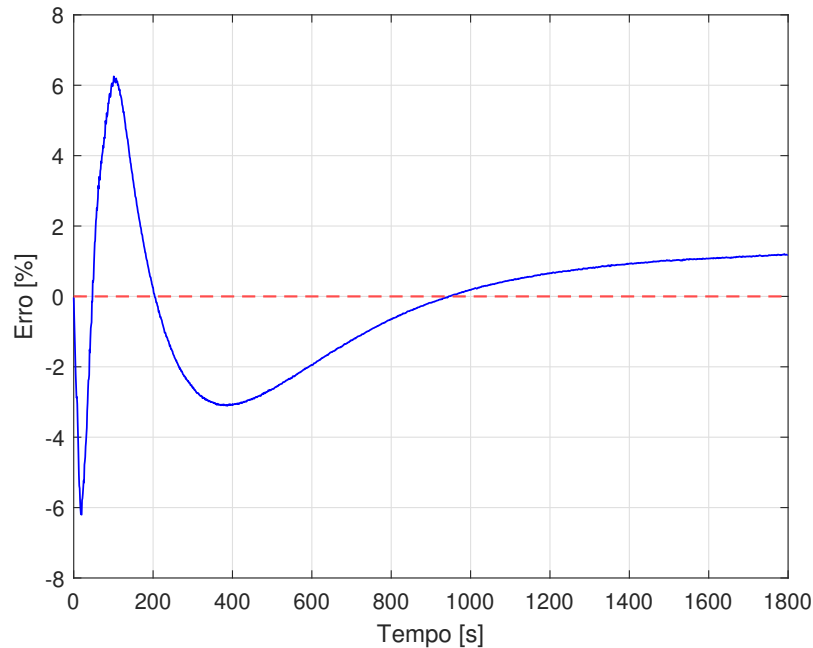
$$G(z) = \frac{0,02417}{z - 0,9816}. \quad (3.1)$$

Com base nesse modelo, comparou-se a saída simulada com a resposta média medida do sistema, utilizando um conjunto de dados distinto daquele empregado na etapa de identificação. A Figura 11 apresenta o Erro Médio Quadrático (MSE), ferramenta útil para a avaliação qualitativa e quantitativa da qualidade do modelo. Idealmente, o erro se comportaria como ruído branco, indicando que toda a dinâmica essencial do sistema foi capturada e que as diferenças restantes correspondem somente ao ruído de medição.

No entanto, observa-se que, na fase inicial do ensaio (aproximadamente até 400 s), o erro apresenta oscilações significativas, atingindo um desvio máximo de cerca de $\pm 6\%$. Essa variação é típica da fase transitória do sistema, sugerindo que o modelo ARX de primeira ordem não captura totalmente a dinâmica mais rápida da planta real. Após a fase transitória, o erro gradualmente se aproxima de zero, estabilizando-se em um valor residual próximo de $+1,2\%$ durante o regime permanente. Esse comportamento indica que, embora pequenas discrepâncias ainda existam, o modelo representa com precisão a tendência geral e a dinâmica essencial do sistema.

Apesar das limitações na fase transitória, a aceitação do modelo (3.1) é justificada pelos indicadores quantitativos. O MSE calculado foi de 3,7352, enquanto a Raiz do Erro

Figura 11 – Comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo, destacando o comportamento do erro ao longo do tempo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadrático Médio (RMSE) resultou em 1,9327. Como o RMSE expressa a magnitude média do erro na mesma unidade da variável de saída (nível), ele constitui o critério final de validação. O valor obtido, inferior a 2 unidades de nível, indica que, em média, a discrepância entre o modelo e os dados medidos é baixa. Os valores obtidos para as métricas são apresentados na Tabela 5.

Conclui-se, portanto, que o modelo testado (3.1), captura a tendência dominante e a dinâmica essencial do sistema com alta fidelidade. Ele é considerado suficientemente preciso e confiável para fundamentar o projeto de controle, embora as limitações observadas na fase transitória indiquem que, em estudos futuros, a precisão possa ser aprimorada com a utilização de estruturas ARX de ordem superior ou modelos não lineares.

Tabela 5 – Métricas de avaliação do modelo (3.1).

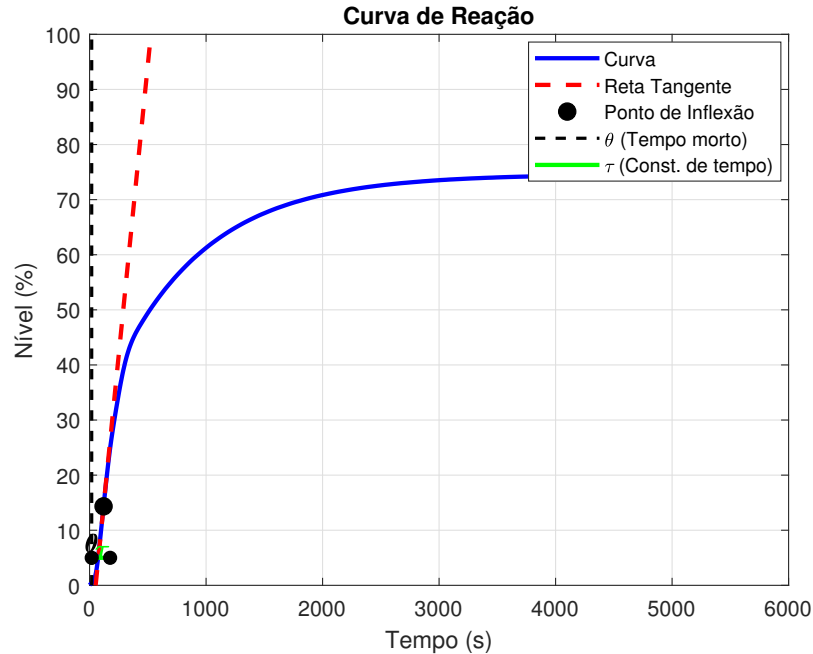
Métrica	Valor
Erro Médio Quadrático (MSE)	3,7352
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	1,9327

Fonte: Elaborada pela autora.

3.4 Projeto preliminar do controlador a partir da técnica de sintonia de Ziegler-Nichols

O projeto preliminar do controlador foi realizado, empregando a técnica de sintonia de Ziegler-Nichols, com base na curva de reação apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Representação da saída de um sistema a uma entrada em degrau unitário utilizando o Método de Ziegler-Nichols.



A Figura 12 apresenta a resposta do sistema a uma entrada em degrau unitário, sendo a curva utilizada como base para o projeto do controlador pelo método de sintonia de *Ziegler-Nichols*. A partir dessa resposta, traçou-se a reta tangente no ponto de inflexão da curva, possibilitando a determinação dos parâmetros característicos do processo: o *tempo morto* (θ) e a *constante de tempo* (τ).

Para a aplicação do método, foi desenvolvido um código em *Matlab* capaz de identificar automaticamente esses parâmetros a partir da curva obtida. A análise da Figura 12 resultou em $\theta = 1,7810$ s e $\tau = 2,6420$ s, valores utilizados na Tabela 2 para o cálculo dos ganhos dos controladores K_p e K_i , os quais são apresentados na Tabela 6. Dessa forma, obteve-se o seguinte controlador PID discreto

$$G_c(z) = 1,3340 + 0,0851 \frac{T}{z-1}. \quad (3.2)$$

A simulação em malha fechada foi realizada no ambiente *Matlab*, implementando-se o modelo da planta $G(z)$ em conjunto com o controlador PI projetado (3.2). Durante a simulação, a saída do sistema foi realimentada e comparada com o sinal de referência, sendo o erro processado pelo controlador para geração da ação de controle. Esse procedimento

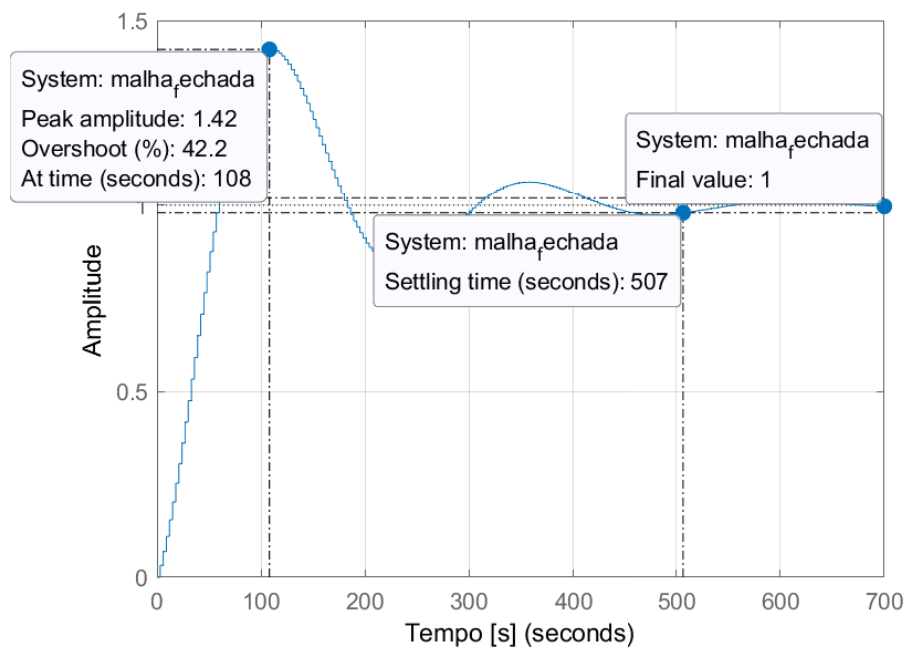
permitiu obter a resposta do sistema controlado a um degrau de referência, conforme ilustrado na Figura 13.

Tabela 6 – Ganhos do controlador PI obtidos no projeto pela técnica de sintonia de Ziegler-Nichols.

Parâmetros	Valores
K_P	1,3340
K_I	0,0851

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 13 – Simulação da resposta do sistema em malha fechada para o controlador PI (3.2) considerando o modelo (3.1).



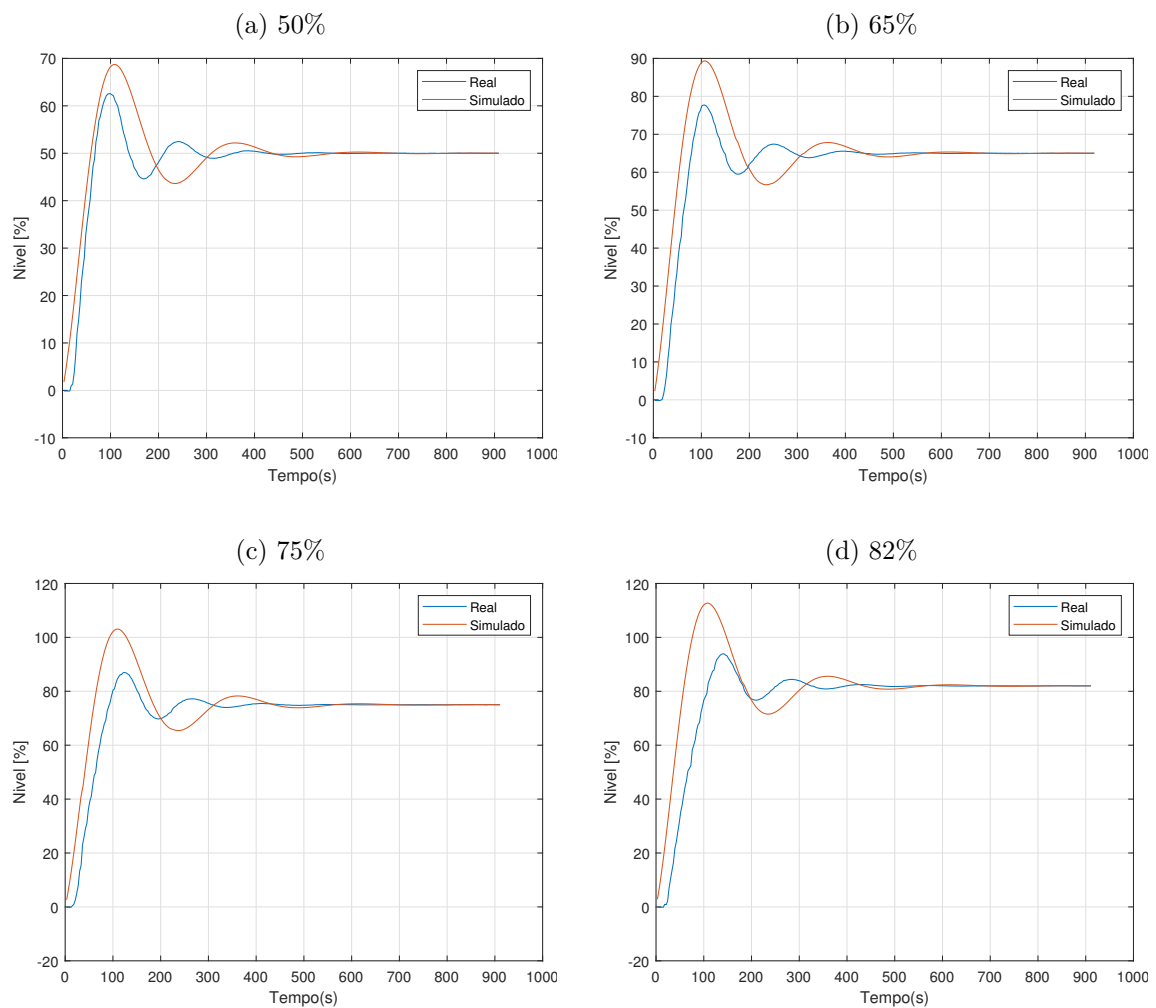
Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que, na Seção 3.2, foram estabelecidas as especificações de desempenho do sistema (Tabela 4), a simulação indicou que, após a sintonia do controlador pelo método de Ziegler-Nichols — baseado na curva de reação do processo —, a resposta em malha fechada apresentou um sobressinal aproximado de 42,2% e tempo de assentamento em torno de 507s, esses resultados comprovaram-se coerentes com as especificações previamente apresentadas. Com os parâmetros ajustados, foram então realizados ensaios na planta real, a fim de verificar o desempenho do sistema em malha fechada sob diferentes condições operacionais. Cabe destacar que o ponto de operação de 75% havia sido previamente definido, com base em uma análise exploratória inicial do comportamento da planta.

3.4.1 Resultados obtidos do controlador PI (3.2) projetado

Para validar o controlador projetado, foram realizados testes na planta em diferentes níveis de referência, abrangendo os *setpoints* de 50,00%, 65,00%, 75,00% e 82,00%. A Figura 14 apresenta a comparação entre as respostas simuladas e experimentais do sistema para diferentes valores de referência 50,00%, 65,00%, 75,00% e 82,00%, utilizando os ganhos $K_P = 1,3340$ e $K_I = 0,0851$ obtidos pela sintonia de Ziegler-Nichols. Essas referências foram empregados para realizar testes de nível diretamente na planta, visando avaliar o comportamento dinâmico do sistema em distintas condições operacionais, fundamentando-se em estudos anteriores que indicaram essas faixas como representativas do desempenho da planta¹.

Figura 14 – Resposta real e simulada do sistema para diferentes valores de *setpoint* com o controlador PI (3.2) projetado pelo método de Ziegler-Nichols, considerando o modelo (3.1).



Fonte: Elaborada pelo autor.

¹ Essas referências têm objetivo diferente das mencionadas na página 25, que foram utilizadas para a modelagem da planta em malha aberta.

Observa-se, de modo geral, uma boa concordância entre os resultados, sendo possível avaliar o desempenho do controlador em diferentes condições operacionais. A Tabela 7 apresenta os valores de sobressinal e tempo de assentamento obtidos nas simulações e nos testes experimentais. Nota-se que, nas proximidades do ponto de projeto — especialmente em 65,00%, 75,00% e 82,00% — o controlador demonstrou bom desempenho, com sobressinais menores do que os previstos na simulação. Essa diferença pode ser atribuída a fatores presentes na planta real, como atrito mecânico, saturações do atuador e pequenas não linearidades não capturadas pelo modelo discreto utilizado na simulação. Tais fatores contribuem para reduzir o sobressinal observado em relação ao valor simulado, tornando o comportamento da planta mais estável.

Tabela 7 – Comparação dos resultados reais, na planta SMAR PD3-F, e simulados empregando o controlador (3.2).

Valor de Referência	Sobressinal (%)	Tempo de assentamento (s)
Simulado	42,2	507
50%	25,2	319
65%	19,5	276
75%	15,9	286
82%	14,4	302

No ponto de 75,00%, por exemplo, a resposta real foi ligeiramente mais rápida que a simulada, como ilustrado na Figura 14(c). Essa diferença pode ser atribuída às simplificações do modelo linear obtido, que não contempla todas as não linearidades e dinâmicas da planta real. Por outro lado, no ponto de 82,00%, embora o tempo de assentamento tenha se mantido satisfatório, observou-se uma tendência à saturação da planta, causada pelo alto sobressinal, reforçando a importância de considerar os limites físicos do sistema. Nota-se ainda, a partir da análise das respostas (Figura 14), que o sistema apresenta maior estabilidade e um comportamento mais representativo próximo de 75,00% de nível. Assim, a linearização do modelo dinâmico da planta e o projeto dos controladores foram conduzidos tomando como base o ponto de operação de 75,00%, previamente definido a partir desses resultados experimentais.

As diferenças observadas entre os resultados simulados e experimentais podem ser atribuídas à presença de não linearidades na planta, perturbações externas e variações dinâmicas não representadas pelo modelo (3.1) linear utilizado. Ainda assim, os testes em malha fechada demonstram que o controlador, projetado com base nesse modelo, apresenta desempenho satisfatório em uma região ao redor do ponto de operação, confirmando sua aplicabilidade para pequenos desvios em relação às condições de projeto. A Tabela 7 apresenta a comparação entre os valores de sobressinal e tempo de assentamento obtidos experimentalmente e os oriundos das simulações, permitindo uma avaliação direta do desempenho do modelo identificado frente ao sistema real.

A avaliação inicial demonstrou que, para uma entrada em degrau unitário aplicada ao modelo linear no ambiente *Matlab*, a simulação indicou um sobressinal de aproximadamente 42,2% e um tempo de assentamento de cerca de 507 segundos. Por outro lado, os testes experimentais realizados na planta real, com diferentes valores de referência (50,00%, 65,00%, 75,00% e 85,00%), apresentaram desempenhos significativamente melhores, conforme evidenciado na Tabela 7. Observa-se que, à medida que o valor de referência aumentou, o sistema real manteve um bom desempenho, sem degradações significativas no sobressinal ou no tempo de assentamento — comportamento não previsto pelo modelo linear identificado. Essa discrepância reforça as limitações do modelo obtido por identificação linear, que se mostrou válido somente em torno do ponto de operação nominal (75,00%). Além disso, evidencia-se a influência das não linearidades da planta na resposta dinâmica, indicando que o modelo simulado não representa precisamente o comportamento da planta sob diferentes amplitudes de entrada.

Diante dos resultados obtidos nas simulações e da comparação com os dados experimentais coletados no ponto de operação de 75,00%, verificou-se que as especificações iniciais de desempenho — definidas a partir do modelo simulado, com sobressinal de 42,2% e tempo de assentamento de 507 s — não representavam idealmente o comportamento desejado da planta. Embora houvesse coerência entre os valores simulados e os dados reais, a análise detalhada indicou a viabilidade de adotar critérios mais conservadores, alinhados aos limites operacionais do sistema. Dessa forma, optou-se por revisar as especificações com base nas respostas observadas na região linear em torno do ponto de operação, especialmente nas faixas de 65,00% e 82,00%, que também apresentaram respostas coerentes. Visando garantir maior fidelidade entre o modelo e a dinâmica da planta real, foram definidas novas metas de desempenho, descritas na Tabela 8. Essas especificações serviram como referência para o ajuste do controlador utilizando o *PIDtool*, permitindo otimizar o desempenho em malha fechada e minimizar o esforço de controle.

Tabela 8 – Novas especificações de desempenho adotadas para os próximos testes.

Parâmetros	Especificações
MUP	30%
T_{ss}	500s
E_{ss}	0

Fonte: Elaborada pela autora.

3.5 Sintonia dos controladores utilizando *PIDTool*

Inicialmente, o projeto do controlador foi desenvolvido com base na técnica clássica de Ziegler-Nichols. Com essa técnica, os ganhos do controlador foram definidos com base na resposta do sistema a uma entrada em degrau. Essa abordagem, embora eficaz,

gerou resultados com sobressinal e tempo de assentamento que não estavam totalmente otimizados para a planta real, apresentando certos desafios no ajuste fino dos parâmetros.

Nesta etapa, a metodologia de projeto do controlador foi alterada, adotando-se o uso do *PIDTool* do Matlab. Essa decisão foi motivada pela necessidade de um ajuste mais preciso dos ganhos do controlador, visando melhorar a resposta dinâmica do sistema. Enquanto os métodos anteriores utilizavam técnicas de sintonia baseadas nos modelos matemáticos previamente obtidos, o *PIDTool* ofereceu uma interface interativa, permitindo um ajuste mais flexível e precisa dos parâmetros do controlador PID.

Para o projeto do controlador, foi escolhido um período de amostragem de $T = 5$ s. O modelo (3.1) foi inserido na ferramenta *PIDtool*, que forneceu valores iniciais para os ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i). A partir desses valores, realizou-se um ajuste manual iterativo, utilizando abordagem de tentativa e erro, de forma visual e interativa, visando refinar o comportamento do sistema, equilibrando a rapidez da resposta e minimizando o esforço de controle. Os valores finais de K_p e K_i , obtidos após o ajuste, para o período de amostragem definido, está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Constantes do controlador PID para período de amostragem $T = 5$ s, sintonizadas via *PIDTool*.

Período (s)	K_p	K_i
5	0,2437	0,006040

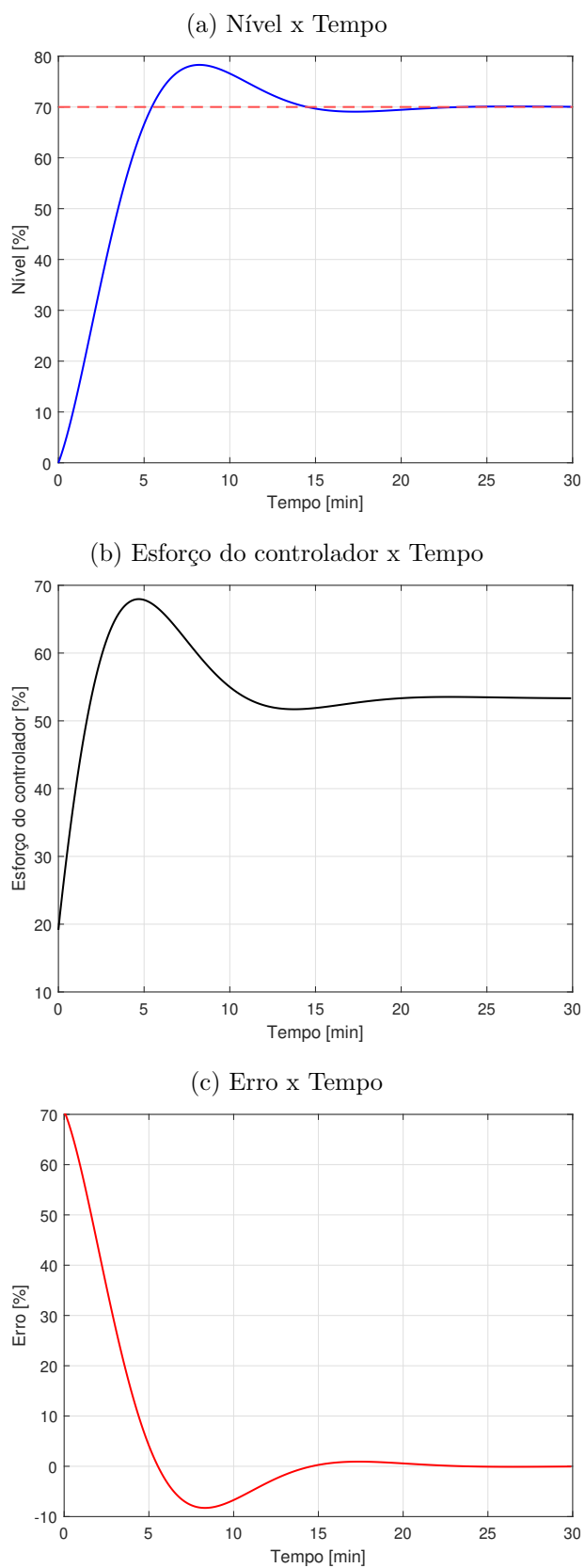
Fonte: Elaborada pela autora.

Esses parâmetros foram então aplicados na implementação do controlador, cuja forma discreta é dada por

$$G_c(z) = 0,2437 + 0,006040 \frac{T}{z - 1}. \quad (3.3)$$

Os resultados obtidos do projeto utilizado na ferramenta *PIDtool* são apresentados nos gráficos da Figura 15. Nos gráficos, apresentam-se os resultados da simulação de um controlador PI projetado via *PIDtool* aplicado a um sistema de controle de nível, em função do tempo. O gráfico 15(a) evidencia a evolução do nível do tanque ao longo do ensaio. A curva azul representa o nível do sistema, enquanto a linha vermelha tracejada indica o *setpoint*, ou seja, o valor desejado, aproximadamente 70% do nível máximo. Observa-se que o nível aumenta rapidamente no início, caracterizando uma resposta ágil do sistema, seguido de um leve sobressinal de aproximadamente 11% acima do *setpoint*, típico de sistemas com controlador PI. O tempo de assentamento, definido como o intervalo necessário para que o nível permaneça dentro de uma faixa de $\pm 2\%$ em torno do *setpoint*, foi de, aproximadamente, 15 minutos. Esse valor indica que o sistema alcança a condição de regime permanente de forma relativamente rápida, indicando que o controlador consegue conduzir o sistema ao ponto desejado eficientemente, mesmo com o *overshoot* inicial.

Figura 15 – Resposta simulados do controlador (3.3) via *PIDtool*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico 15(b) mostra o sinal enviado ao sistema, a saber, a vazão da bomba. Inicialmente, o esforço é elevado, explicando a rápida elevação do nível, e, após o *overshoot*, o esforço se estabiliza em um valor constante, suficiente para manter o nível próximo ao *setpoint*. Este comportamento é relevante para avaliar se o controlador não está exigindo ações excessivas que possam comprometer a operação do equipamento. Por fim, o gráfico 15(c) mostra a evolução do erro do sistema. No início, o erro é significativo, refletindo o desvio inicial do nível em relação ao *setpoint*. Durante o *overshoot*, o erro torna-se negativo, indicando que o nível excedeu o valor desejado. Com o decorrer do tempo, o erro converge para zero, evidenciando a estabilidade do sistema no *setpoint*.

Em síntese, o controlador PI projetado demonstra capacidade de atingir rapidamente o *setpoint*, apresenta somente um leve *overshoot* inicial, mantém o esforço de controle nos limites adequados e minimiza o erro ao longo do tempo. Esses resultados confirmam a eficácia do controlador na regulação precisa do nível, caracterizando um desempenho consistente e robusto do sistema em análise.

Na Tabela 10, resumiram-se os resultados simulados de MUP e T_{ss} obtidos com o controlador projetado (3.3) para o período de amostragem de 5 s via *PIDtool*. Para $T = 5$ s, a máxima ultrapassagem percentual (MUP) foi de somente 11,00%, valor significativamente inferior ao limite estabelecido de 30,00%, indicando uma resposta suave e controlada. Entretanto, o tempo de estabilização (T_{ss}) foi de 800 s, acima do valor especificado de 500 s, evidenciando uma limitação no desempenho dinâmico do controlador projetado. Observa-se, portanto, que o controlador atendeu parcialmente os requisitos definidos no projeto, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 10 – Resultados para o projeto do controlador (3.3) via *PIDTool* para o modelo (3.1) no período de amostragem de $T = 5$ s.

Período (s)	MUP(%)	T_{ss} (s)
5	11	800

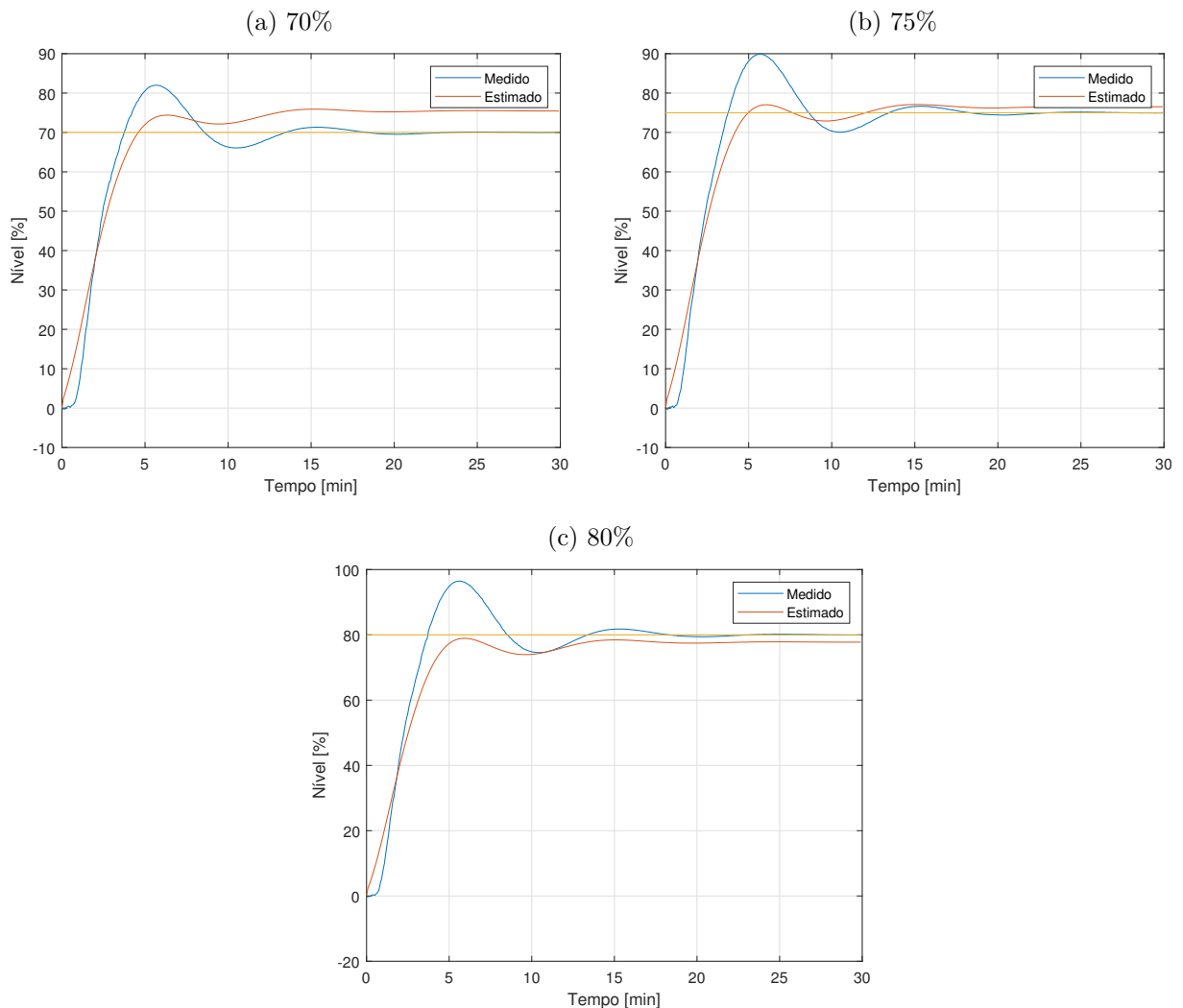
Fonte: Elaborada pela autora.

3.5.1 Resultados obtidos do controlador PI (3.3) projetado

A seguir, foram conduzidos testes experimentais com pontos de referência de 70%, 75% e 80% do nível do tanque conforme pode ser visto na Figura 16. Essa escolha está relacionada à necessidade de analisar o comportamento do sistema em diferentes regiões de operação. Além disso, os valores escolhidos foram definidos com base em estudos anteriores, que indicaram que essas faixas são representativas e permitem validar a robustez do controlador projetado em condições de operação variáveis, como indicado na Seção 3.4.

De modo geral, os sinais simulados acompanham consistentemente as medidas experimentais, especialmente para os *setpoints* de 75% e 80,00%. No entanto, para o *setpoint*

Figura 16 – Análise do sistema de nível com período de amostragem $T = 5$ s para o controlador PI (3.3) projetado via *PIDTool*.



Fonte: Elaborada pela autora.

de 70,00% (gráfico (a)), observa-se uma diferença mais pronunciada entre os sinais. Essa discrepância pode estar associada à distância em relação ao ponto de operação (75,00%), utilizado como referência na identificação do modelo e na sintonia do controlador. Como o modelo é linear e foi obtido em torno de um ponto específico, seu desempenho tende a ser mais preciso em faixas próximas a esse ponto.

A Tabela 11 apresenta os resultados reais obtidos para o controlador (3.3) com período de amostragem $T = 5$ s. Observa-se que o controlador atendeu o critério de sobressinal, com valores significativamente menores do que os observados na simulação, evidenciando boa adaptação prática. No entanto, o tempo de assentamento permaneceu acima do valor desejado, não atendendo completamente a esse critério.

De forma geral, os resultados demonstram que, apesar de os controladores atenderem amplamente ao critério de sobressinal, o tempo de assentamento ainda pode ser otimizado em algumas configurações. Isso indica haver espaço para ajustes finos nos pa-

Tabela 11 – Comparação entre as especificações de desempenho desejadas e obtidas, na planta SMAR PD3-F, com o controlador (3.3) projetado via *PIDTool* para o período de amostragem de 5 s.

Valor de Referência (%)	Sobressinal (%)	Tempo de assentamento (s)
Desejado	30	500
70	17,2	753,6
75	19,8	960,6
80	20,6	969,6

Fonte: Elaborada pela autora.

râmetros de controle, visando melhorar a velocidade de resposta sem comprometer a estabilidade do sistema.

3.6 Considerações parciais

A avaliação inicial do sistema foi conduzida em ambiente controlado, garantindo resultados consistentes e reproduzíveis, para o caso do controlador (3.2) sintonizado pela técnica de Ziegler-Nichols. As simulações e coletas de dados foram realizadas em laboratório, sem interferências externas, considerando o sistema como aproximadamente linear. Para isso, foi aplicada uma entrada do tipo degrau unitário, e as respostas foram monitoradas até que o nível do tanque se estabilizasse, avaliando-se diferentes pontos de operação, correspondentes aos *setpoints* de 50,00%, 65,00%, 75,00% e 82,00%.

Os resultados obtidos indicaram que, na simulação, o sistema apresentou um sobressinal de aproximadamente 42,2% e tempo de assentamento em torno de 507 segundos. Nos testes experimentais realizados na planta real, o desempenho foi significativamente melhor, com sobressinais variando entre 15,9% e 25,2% e tempos de assentamento reduzidos, de 276 a 319 s, dependendo do ponto de operação. Observou-se ainda que o comportamento mais estável e representativo ocorreu próximo ao ponto de operação de 75,00%, utilizado como referência para a linearização do modelo e para o projeto do controlador.

A avaliação do controlador obtido pelo método de Ziegler-Nichols evidenciou, portanto, que, embora tenha proporcionado respostas aceitáveis, os sobressinais e tempos de assentamento não atenderam completamente às especificações previamente definidas. Essa diferença ressalta a presença de não linearidades na planta e limitações do modelo utilizado na simulação, indicando a necessidade de ajustes adicionais no projeto do controlador.

Com base nas respostas observadas, foram estabelecidas novas especificações para os próximos ensaios, considerando sobressinal máximo de 30,00% e tempo de assentamento de 500 s. Para atender a esses critérios, realizou-se o projeto do controlador (3.3) utilizando

o *PIDTool*, buscando minimizar o esforço de controle e otimizar o desempenho do sistema em malha fechada.

No segundo conjunto de testes, empregou-se a ferramenta computacional o *PID-Tool*, considerando o modelo do processo (3.1). Os resultados simulados, apresentados na Tabela 10, evidenciam diferenças quantitativas no desempenho dos controladores. Observa-se que a máxima ultrapassagem percentual (MUP) foi de 11,00%, valor bem abaixo do limite de 30,00%, indicando resposta suave e controlada. Por outro lado, o tempo de assentamento (T_{ss}) foi de 800 s, superior ao valor desejado de 500 s, evidenciando que o sistema apresenta uma resposta mais lenta, embora com boa estabilidade.

Essas métricas permitem avaliar a influência do período de amostragem sobre o desempenho do sistema, reforçando a importância da escolha criteriosa da metodologia de sintonia e do ajuste fino dos parâmetros do controlador. Tais informações são fundamentais para garantir a robustez do sistema em diferentes condições operacionais.

4 Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e avaliar técnicas de identificação e controle aplicadas a um sistema de nível em tanques industriais, visando garantir estabilidade, precisão e eficiência operacional. Para isso, o estudo abrangeu as etapas de modelagem, projeto, simulação e implementação prática de controladores PI aplicados à planta SMAR PD3-F. Inicialmente, realizou-se a modelagem do sistema composto pelo tanque e pela bomba trifásica, a partir de experimentos que permitiram obter um modelo discreto do tipo ARX. O modelo foi essencial para a análise da dinâmica do processo e para o projeto dos controladores.

Na sequência, foram projetados e testados controladores PI por meio de diferentes metodologias de sintonia, incluindo o método clássico de Ziegler–Nichols e a ferramenta computacional *PIDTool* do *MATLAB*. A comparação entre as estratégias de ajuste possibilitou avaliar o impacto de cada método sobre os principais indicadores de desempenho, como o tempo de assentamento, o sobressinal e o erro em regime permanente. Os resultados experimentais demonstraram que ambos os métodos atenderam ao critério de sobressinal, apresentando sinais de controle com amplitudes adequadas e erro em regime permanente próximo de zero. Observou-se, contudo, que o tempo de assentamento permaneceu acima do valor desejado em alguns casos, resultando em uma resposta ligeiramente mais lenta, embora estável.

A análise evidenciou que o controlador ajustado via *PIDTool* proporcionou ajustes mais precisos e desempenho consistente, resultando em respostas suaves e bem amortecidas. Em contrapartida, a sintonia clássica de Ziegler–Nichols forneceu parâmetros iniciais eficazes para a estabilização do sistema, mas com tendência a tempos de assentamento mais longos. Em síntese, este trabalho permitiu desenvolver um sistema de controle robusto e eficiente, evidenciando a importância da escolha adequada da técnica de sintonia e do período de amostragem para garantir estabilidade, precisão e baixo esforço de controle. Os resultados obtidos fornecem subsídios para aprimoramentos futuros e aplicações práticas em processos industriais, permitindo adaptações a cenários mais desafiadores.

4.1 Trabalhos futuros

Para aprimorar os resultados obtidos, sugere-se explorar novas malhas de controle e topologias de controladores. Uma abordagem promissora é a implementação de controle em cascata, com a vazão da bomba como malha interna e a abertura da válvula (FY302) apresentada na Figura 1, como malha externa conferindo maior robustez ao sistema.

A utilização de controladores do tipo Reguladores Quadráticos Lineares (LQR, do inglês *Linear Quadratic Regulator*) oferece flexibilidade adicional, permitindo impor

restrições nos sinais de controle e de saída. Além disso, técnicas avançadas, como controle adaptativo, controle robusto e controladores baseados em modelos não lineares, como NARX (*Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs*), podem ser investigadas para melhorar o desempenho diante de variações dinâmicas do processo.

Outra linha importante de pesquisa envolve a aplicação dessas metodologias em sistemas mais complexos, como processos com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, do inglês *Multiple Inputs Multiple Outputs*) e plantas industriais compostas por múltiplos subsistemas. A implementação em tempo real, utilizando sistemas embarcados ou controladores lógicos programáveis (CLP), poderá garantir a viabilidade prática em ambientes industriais, assegurando robustez frente a distúrbios e variações operacionais.

Adicionalmente, recomenda-se investigar técnicas de controle não linear em processos cujas dinâmicas apresentam comportamentos não lineares pronunciados, ampliando a capacidade de resposta e estabilidade do sistema em condições mais desafiadoras.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas – Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2023.
- BISHOP, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006.
- CALLEGARI, J. M. S. et al. Modelagem caixa preta do tanque de aquecimento da planta didática SMAR PD3: Uma atualização. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 5, n. 3, p. 0220–0227, 2019.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- FRANCO, J. P.; SILVA, R. A. Controle de bombas industriais usando inversores de frequência: vantagens e aplicações. *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 12, n. 3, p. 45–53, 2015.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 4. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- GARCIA, L.; MORALES, E. Fluid level control techniques in food processing. *Journal of Food Engineering*, v. 243, p. 45–54, 2019.
- GOMES, N. C.; NICACIO, J. V.; TÔRRES, A. G. Planta didática SMAR-PD3: modelagem, simulação e ajuste dos parâmetros do controlador de temperatura do tanque de mistura. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 2017.
- GOODWIN, G. C.; GRAEBE, S. F.; SALGADO, M. E. *Control System Design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.
- International Society of Automation (ISA). *ANSI/ISA-5.1-2024 – Instrumentation and Control – Symbols and Identification*. Durham, NC: ISA, 2024. Acesso em: 02 out. 2025. Disponível em: <<https://www.isa.org/products/ansi-isa-5-1-2024-instrumentation-and-control-symb>>.
- ISERMANN, R. *Modeling and Identification of Dynamic Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- JOHNSON, R. Level control systems in industrial applications. *Control Engineering Practice*, v. 64, p. 15–27, 2017.
- JONES, E.; BROWN, M. Industrial automation: Trends and challenges. *Journal of Industrial Engineering*, v. 45, n. 3, p. 123–134, 2020.
- LAGE, R. L. *Projeto de um sistema de controle de nível para tanques industriais*. 2019. <<https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2429>>. Acesso em: 2 out. 2025.
- LIMA, L. M. *Modelagem e controle de nível em um sistema de tanques interligados utilizando a planta didática SMAR PD3*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, 2018.

- LJUNG, L. *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.
- MILLER, D. *Production Efficiency and Automation*. London: Industry Publications, 2019.
- MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5th. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
- OLIVEIRA, L. et al. Utilização de uma planta didática SMAR para complementação do ensino de engenharia de controle e automação. In: ABENGE. *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, PA*. Belém, PA, 2012.
- PEREIRA, J. V.; SANTOS, M. L. Automação do controle de nível em tanques de fermentação na indústria cervejeira. In: ABEPRO. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*. São Paulo, Brasil, 2018.
- PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. *Digital Control System Analysis and Design*. 3^a. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1995.
- RIANO, C.; RODRIGUEZ, E.; ALVARES, A. Desenvolvimento e implementação de um controle de temperatura para a planta SMAR-PD3. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, v. 13, p. 1–13, 2017.
- RODRIGUES, M.; LIMA, P. Process control in chemical industry: A review. *Chemical Engineering Journal*, v. 268, p. 123–135, 2015.
- SEBORG, D. E. et al. *Process Dynamics and Control*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- SILVA, A.; SOUZA, C. The impact of automation on manufacturing flexibility. *International Journal of Manufacturing Technology*, v. 52, n. 2, p. 78–89, 2021.
- SILVA, C. H.; ALMEIDA, F. R. Sistema automatizado de controle de nível aplicado ao tratamento de água. *Revista Brasileira de Engenharia Aplicada*, v. 8, n. 2, p. 45–52, 2016.
- SILVA, J.; PEREIRA, L.; ANDRADE, M. Controle de nível em sistemas de abastecimento de caldeiras: Estudo de caso em ambiente industrial. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. Florianópolis, Brasil: SBA - Sociedade Brasileira de Automática, 2020.
- SILVERIO, A. G. *Aplicação de técnicas de controle para sistemas lineares positivos*. 2022. <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/3858>>. Acesso em: 2 out. 2025.
- SMAR. *Manual dos Procedimentos de Instalação, Operação e Manutenção: Foundation Fieldbus*. 3. ed. Sertãozinho, SP: SMAR, 2008. 66 p.
- SMAR. *Planta Didática PD3 Series 301-302-303*. 2011. Acesso em 29/08/2025.
- SMAR. *LD302 Fieldbus Pressure Transmitter – User Manual*. Sertãozinho, SP, 2020. Acesso em: 03 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.smar.com.br/public/img/produtos/arquivos/ld302me.pdf>>.
- SMITH, J. *Automation Technologies in Modern Industry*. New York: Tech Press, 2018.

WEG. *Manual do Usuário – CFW08*. Jaraguá do Sul, SC: WEG, 2021.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, v. 64, p. 759–768, 1942.

ÅSTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2010.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado Controle do sistema de nível de uma planta piloto 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, 24 de novembro de 2025.

Marphiza Magalhães F. Santos Silvério