

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica - UAEE

Yan Abrantes Cavalcante

Relatório de Estágio Supervisionado

Campina Grande, Brasil
23 de julho de 2026

Yan Abrantes Cavalcante

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Controle e Automação

Orientador: Prof. George Acioli Júnior, DSc.

Supervisor: Victor Luiz Santiago de Oliveira, MSc.

Campina Grande, Brasil
23 de julho de 2026

Yan Abrantes Cavalcante

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ___/___/___

Prof. George Acioli Júnior, DSc.
Orientador

Prof. Péricles Rezende Barros, DSc.
Convidado

Campina Grande, Brasil
23 de julho de 2026

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter feito morada em minha vida, sendo guia e luz em meu caminho. A Sua Presença foi fundamental para conceder-me a força necessária para lutar pelos meus objetivos.

Aos meus pais, Badaró e Conceição, agradeço pelo amor, exemplo e apoio ao longo da minha trajetória. Vocês me ensinaram o valor da educação e mostraram como ela pode transformar vidas, assim como transformou a nossa.

Ao meu irmão, Yago, por desde sempre ter sido uma inspiração e um exemplo a ser seguido. Obrigado por me ensinar a amar rock, futebol e videogame. Eu não seria quem sou hoje se não fosse pela sua influência na minha vida, desde a infância, até os dias de hoje.

À minha irmã, Yasmin, por além de irmã, ter sido minha melhor amiga ao longo desses 5 anos de curso. Foi com você que dividi pensamentos, receios, frustrações e sonhos. Obrigado por todos os conselhos e ensinamentos que me permitiram buscar ser melhor todos os dias.

À minha namorada e companheira de vida, Hellen, por ter sido minha fortaleza, os braços para os quais eu sempre podia voltar e continuar seguindo. Seu apoio e amor foi peça chave no meu desenvolvimento como pessoa, filho, aluno e companheiro. Obrigado por ter acreditado em mim, muitas vezes mais do que eu acreditava em mim mesmo.

Aos meus colegas de faculdade, em especial à Danilo, Davi, João, Mateus Pincho e Gabriel, que se tornaram grande amigos. Agradeço por dividirem os estresses acadêmicos, as provas antigas e principalmente, os almoços, sejam de jogatinas ou de conversas aleatórias.

Aos meus irmãos de vida: Alessandro, Athyrson, Arley, Ângelo, Bruno Marques, Caio Moura, Caio Vinicius, Daniel, Fernando, José e Rikkellmy. Obrigado por todos os momentos em que a tristeza e negatividade não tinham vez. Vocês são os maiores idiotas do mundo.

Aos meus colegas do LIEC, em especial à Matheus Ferreira, Andrey, Bruno, Lucas, Mateus, William, Francinildo, Igor e Felipe. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados, pelos rachas e pelas tardes de conversa na copa.

Ao meu orientador, Professor Dr. George Acioli Júnior, pelo apoio e atenção dedicados ao longo deste trabalho. Agradeço também ao Professor Dr. Péricles Rezende Barros, por me abrir as portas do LIEC e fazer-me apaixonar pela ênfase de controle e automação. Além disso, gostaria de agradecer à UFCG, que me proporcionou um leque de oportunidades, e aos professores e funcionários do DEE, muito obrigado.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.
Sir Isaac Newton.

Resumo

Este relatório apresenta as atividades desenvolvidas durante o Estágio Supervisionado realizado no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O estágio teve como objetivo o desenvolvimento de um simulador computacional para uma planta didática laboratorial de evaporação por circulação forçada. Para tal, foram aplicados conceitos teóricos e práticos na área de modelagem de processos, instrumentação eletrônica e simulação de processos.

Palavras-chave: Modelagem de Sistemas Dinâmicos, Instrumentação Eletrônica, Simulação de Processos, Automação Industrial e Sistemas Industriais.

Abstract

This report presents the activities carried out during the Supervised Internship at the Electronics and Control Instrumentation Laboratory (LIEC) of the Federal University of Campina Grande (UFCG). The internship aimed at developing a computational simulator for a laboratory-scale forced-circulation evaporation process. To achieve this objective, theoretical and practical concepts related to process modeling, electronic instrumentation, and process simulation were applied.

Keywords: Dynamic Systems Modeling, Electronic Instrumentation, Process Simulation, Industrial Automation and Industrial Systems.

Lista de Abreviaturas e Siglas

CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
LIEC	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle
LT	Level Transmitter
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PV	Process Variable
PWM	Pulse Width Modulation
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
TT	Temperature Transmitter
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
MAE	Mean Absolute Error
RMSE	Root Mean Squared Error

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fachada do LIEC. 13
Figura 2 – Evaporador de Circulação Forçada. 15
Figura 3 – Diagrama esquemático do Evaporador de Circulação Forçada. 16
Figura 4 – SDCD *Emerson DeltaV* 18
Figura 5 – Transmissor de temperatura Rosemount 3144P FOUNDATION Fieldbus. 19
Figura 6 – Transmissor de pressão diferencial Rosemount 3051S FOUNDATION Fieldbus. 20
Figura 7 – Atuador linear NVF24-MFT-E-50. 21
Figura 8 – Inversor de frequência PowerFlex 40. 21
Figura 9 – Bomba trifásica Hydrobloc P 500 T. 22
Figura 10 – Conversor de potência Tiristherm TH 6200. 22
Figura 11 – Curva Característica da Bomba 34
Figura 12 – Curva de Esvaziamento do Tanque 3 para abertura da válvula em 20%. 36
Figura 13 – Curva de Esvaziamento do Tanque 3 para abertura da válvula em 20%. 37
Figura 14 – Interface gráfica do simulador desenvolvido. 39
Figura 15 – Simulação aumentando a abertura da Válvula 1 para 20% 40
Figura 16 – Simulação aumentando a abertura da Válvula 1. 41
Figura 17 – Comparação entre a resposta experimental e a resposta simulada do modelo. 42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição e unidades de medida dos parâmetros utilizados na modelagem. 26
Tabela 2 – Identificação das vazões do processo. 27
Tabela 3 – Métricas de desempenho do modelo durante a validação experimental. 42

Sumário

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 Objetivos 11

2 LOCAL DE ESTÁGIO 13

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
3.1 Controle de Processos 14
3.2 Planta SMAR PD3-F 14
3.3 Descrição do Processo 16
3.4 Instrumentação Eletrônica do Sistema 17
3.4.1 Sistema Digital de Controle Distribuído 17
3.4.2 Transmissores FOUNDATION Fieldbus 19
3.4.3 Atuadores 4–20 mA 20
3.5 Modelagem Dinâmica de Processos 23
3.5.1 Balanço de Massa 23
3.5.2 Balanço de Energia 24

4 ATIVIDADES REALIZADAS 26
4.1 Modelagem do Evaporador 26
4.1.1 Balanço de Massa no Tanque 2 27
4.1.2 Balanço de Massa no Tanque 3 28
4.1.3 Balanço de Energia no Tanque 2 29
4.2 Caracterização dos Atuadores 33
4.2.1 Caracterização da Vazão da Bomba F_{B_1} 33
4.2.2 Caracterização do Decaimento do nível no Tanque 3 35
4.3 Simulador do Evaporador 38
4.4 Experimentos de Validação 41

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 44

REFERÊNCIAS 45

1 Introdução

A modelagem e simulação de processos industriais desempenham papel fundamental no desenvolvimento, análise e projeto de sistemas de controle. Por meio dessas ferramentas, torna-se possível compreender o comportamento dinâmico dos processos, avaliar estratégias de controle e reduzir custos associados a testes em plantas reais (SEBORG et al., 2016). Dessa forma, plantas didáticas representam importantes ambientes experimentais para a integração entre teoria e prática na formação de engenheiros na área de automação.

Este documento apresenta as atividades desenvolvidas pelo discente Yan Abrantes Cavalcante, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), durante o Estágio Supervisionado. As atividades foram realizadas no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC), no período de 18/05/2026 a 29/06/2026, sob a orientação do Prof. Dr. George Acioli Júnior e a supervisão do engenheiro Victor Luiz Santiago de Oliveira.

O estágio teve como foco a utilização da planta didática SMAR PD3-F[1], disponível no Laboratório de Controle de Processos e modificada para reproduzir um processo de evaporação por circulação forçada. Nesse contexto, as atividades desenvolvidas envolveram inicialmente o estudo da instrumentação eletrônica da planta. Em seguida, foram realizadas a modelagem dinâmica do processo e a caracterização dos principais atuadores, etapas que serviram de base para o desenvolvimento de um simulador em *Python*. Por fim, foram conduzidos experimentos na planta física com o objetivo de validar os modelos obtidos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do estágio supervisionado consistiu no desenvolvimento de um simulador em *Python* capaz de reproduzir, de forma satisfatória, o comportamento dinâmico observado na planta física. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo dinâmico do sistema com base em balanços de massa e energia;
- Caracterizar os atuadores da planta, visando à obtenção de modelos que representem adequadamente suas dinâmicas reais;

[1] Disponível em: <https://www.smar.com.br/pt/produto/pd3-302-planta-didatica-foundation-fieldbus>. Acesso em: jul. 2026.

- Implementar um simulador para o processo via *Python*;
- Realizar experimentos na planta física para validação do modelo desenvolvido e comparação entre os resultados simulados e experimentais;

2 Local de Estágio

O LIEC[1] integra o Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) do Centro de Engenharia Elétrica e Informática (CEEI) da UFCG, localizado no campus de Campina Grande, Paraíba. Fundado em dezembro de 1975, o laboratório desempenha papel relevante no desenvolvimento de pesquisas, projetos e soluções tecnológicas nas áreas de instrumentação eletrônica, controle, automação e redes industriais.

O LIEC ocupa uma área de 900 m^2, sendo composto por nove laboratórios, duas salas de apoio técnico, uma sala de reunião e diversos espaços destinados às atividades de docentes, pesquisadores e estudantes. Os laboratórios são dedicados ao estudo e desenvolvimento de tecnologias nas áreas de Manufatura Avançada (Indústria 4.0), Instrumentação Eletrônica, Controle de Processos, Sistemas Distribuídos, Sistemas Abertos de Automação e Automação Industrial.

O corpo técnico do laboratório é composto por professores, engenheiros, pesquisadores e estudantes de graduação e pós-graduação, que atuam em projetos de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação. Atualmente, a coordenação do LIEC é exercida pelo Prof. Dr. Péricles Rezende Barros.

As atividades desenvolvidas durante o estágio foram realizadas na Sala 09, onde está localizado o Laboratório de Controle de Processos. Na Figura 1, apresenta-se uma fotografia da fachada do Edifício Gurdip Singh Deep, com destaque para a área destinada ao LIEC.

Figura 1 – Fachada do LIEC.



Fonte: Site Oficial do LIEC.

[1] Disponível em: <https://liec.ufcg.edu.br/>. Acesso em: jul. 2026.

3 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos que servem de base para as atividades desenvolvidas durante o estágio, abrangendo aspectos relacionados ao controle de processos, à planta experimental utilizada, à instrumentação eletrônica do sistema e à modelagem dinâmica de processos.

3.1 Controle de Processos

O controle de processos consiste no conjunto de técnicas utilizadas para monitorar e manipular variáveis de sistemas industriais, de modo a garantir que estes operem de forma segura, estável e eficiente. Em aplicações industriais, variáveis como temperatura, pressão, nível e vazão devem ser mantidas dentro de faixas específicas, assegurando qualidade ao produto final.

O desenvolvimento de sistemas de controle está diretamente relacionado à compreensão da dinâmica do processo. Para isso, é necessário obter modelos matemáticos capazes de representar adequadamente o comportamento temporal das variáveis de interesse. Esses modelos são normalmente construídos a partir de princípios físicos fundamentais, como os balanços de massa e energia, podendo ser utilizados para análise, simulação e projeto de estratégias de controle (BEQUETTE, 2023).

Modelos dinâmicos desempenham papel fundamental em atividades de projeto, treinamento de operadores, análise de segurança e desenvolvimento de sistemas de controle. Além disso, simuladores computacionais permitem avaliar o comportamento de processos industriais sob diferentes condições operacionais sem a necessidade de intervenções diretas na planta física, reduzindo custos e riscos associados à experimentação em sistemas reais (BEQUETTE, 2023).

3.2 Planta SMAR PD3-F

A planta didática SMAR PD3-F consiste em uma plataforma experimental desenvolvida para fins de treinamento, ensino e pesquisa na área de automação industrial. Sua estrutura integra instrumentos de medição, elementos finais de controle e sistemas computacionais amplamente empregados em ambientes industriais, possibilitando a implementação e o estudo de diferentes estratégias de controle de processos (SOUZA, 2024).

Por meio dessa plataforma, é possível realizar atividades de monitoramento, supervisão e controle de variáveis de processo em um ambiente laboratorial que reproduz

características encontradas em aplicações industriais reais. Além disso, sua configuração modular permite a implementação de diferentes arranjos de controle sem a necessidade de modificações significativas na estrutura física do sistema, tornando-a uma ferramenta versátil para atividades de ensino, treinamento e desenvolvimento tecnológico (SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA., 2015).

No LIEC, o protótipo da SMAR teve sua estrutura modificada e reconfigurada para a implementação de um processo de evaporador de circulação forçada. O evaporador é um dos processos mais populares na indústria química e alimentícia e consiste em aumentar a concentração de um soluto, removendo parte do solvente por meio do fornecimento de calor (NEWELL; LEE, 1989). A configuração de circulação forçada permite aumentar a velocidade da troca de calor, aumentando a eficiência do processo de concentração. A Figura 2 apresenta a configuração física presente no LIEC.

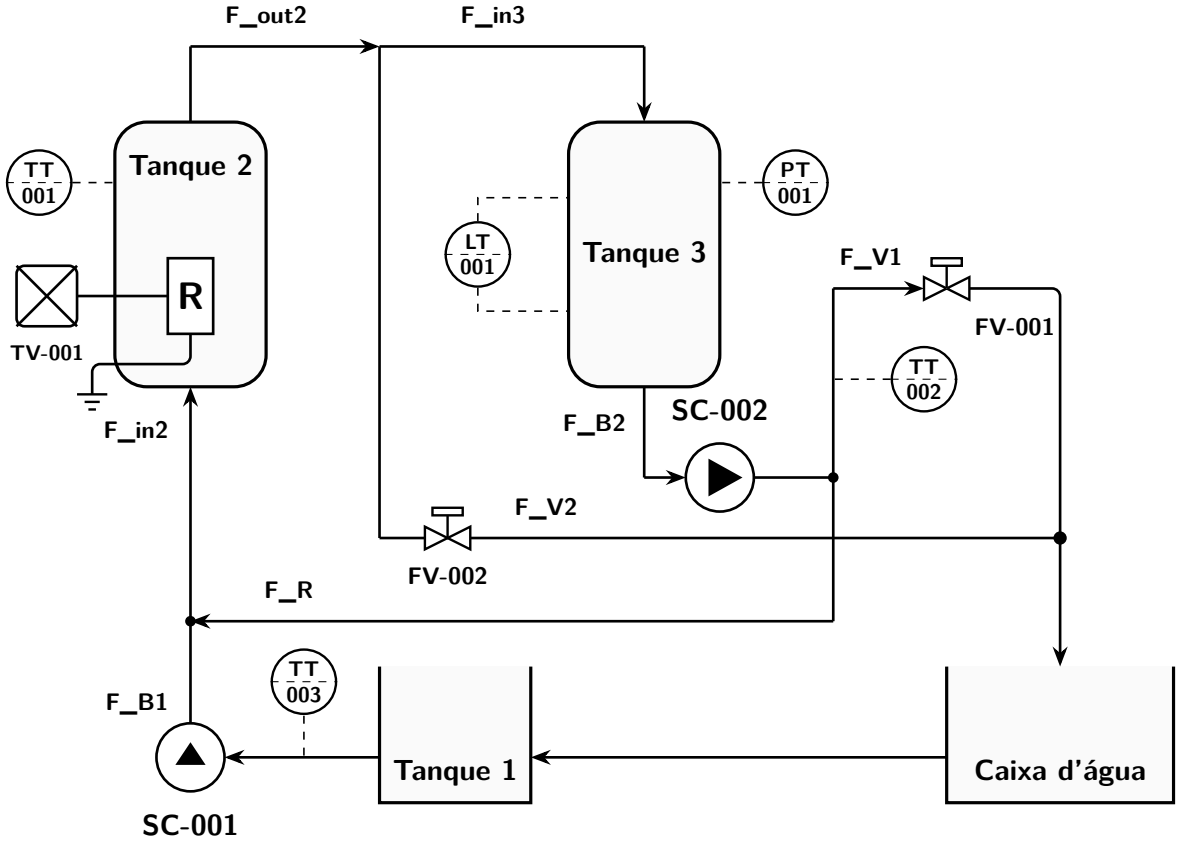
Figura 2 – Evaporador de Circulação Forçada.



3.3 Descrição do Processo

O diagrama esquemático do evaporador de circulação forçada é apresentado na Figura 3. O sistema é composto por três tanques principais: o Tanque 1, destinado à alimentação do processo; o Tanque 2, responsável pelo aquecimento do fluido; e o Tanque 3, utilizado para armazenamento. Além desses elementos, o sistema dispõe de um reservatório responsável pelo armazenamento e suprimento do fluido utilizado durante a operação da planta. Os Tanques 2 e 3 são idênticos em dimensões. As variáveis de processo (PV, do inglês *Process Variable*) são a temperatura do fluido no Tanque de aquecimento e o nível no Tanque de armazenamento.

Figura 3 – Diagrama esquemático do Evaporador de Circulação Forçada.



Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, a água é transferida do Tanque 1 para o Tanque 2 por meio de uma bomba trifásica acionada por um inversor de frequência, identificado como SC-001. Quando cheio, o Tanque 2 abastece o Tanque 3 por gravidade. Nesta tubulação, uma válvula proporcional, denominada FV-002, permite o desvio de parte da vazão diretamente para o reservatório.

A saída do Tanque 3 constitui a linha de recirculação. O escoamento nessa linha é feito por uma segunda bomba trifásica, cujo acionamento é realizado pelo inversor de

frequência SC-002. Uma válvula proporcional FV-001 é posicionada nesta tubulação para regular a fração da vazão de recirculação que é direcionada ao reservatório.

O Tanque 3 é equipado com um transmissor de nível, identificado como LT-001, empregado para monitoramento do nível no Tanque 3, uma das variáveis de processo. Adicionalmente, o sistema dispõe de três transmissores de temperatura TT-001, TT-002 e TT-003, instalados, respectivamente, no Tanque 2, na linha de recirculação e na linha de alimentação. O primeiro é utilizado para monitoramento da temperatura no Tanque 2, uma das variáveis de processo, enquanto os outros dois são utilizados para monitoramento operacional das tubulações.

Para o controle da temperatura do Tanque 2, a planta é equipada com uma resistência elétrica de 11 kW, denominada TV-001. A potência dissipada por esse elemento é ajustada por meio de modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), comandada por um sinal de corrente de 4 a 20 mA proveniente de um microcontrolador.

Em condições normais de operação, o Tanque 2 permanece completamente preenchido, atuando como um *buffer* hidráulico para o Tanque 3. Consequentemente, admite-se volume constante nesse tanque, de modo que sua dinâmica pode ser descrita exclusivamente pelo balanço de energia, sem a necessidade de considerar variações de nível.

3.4 Instrumentação Eletrônica do Sistema

Nesta seção são apresentados os principais elementos que constituem a instrumentação eletrônica da planta.

3.4.1 Sistema Digital de Controle Distribuído

A operação da planta é supervisionada por um Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) da fabricante *Emerson Process Management*, modelo *DeltaV*. Sistemas desse tipo constituem plataformas integradas de automação industrial responsáveis pela aquisição de dados, execução de estratégias de controle e comunicação com instrumentos de campo.

Na planta estudada, o *DeltaV* atua como elemento central da arquitetura de automação. Este é composto pelo sistema de *hardware* M-Series, responsável pela alimentação do controlador *DeltaV M-Series MQ Controller* e do subsistema *DeltaV M-Series Traditional I/O*, formado por:

- Módulo de Entrada Analógica HART 4–20 mA com 8 canais;
- Módulo de Saída Analógica HART 4–20 mA com 8 canais;

- Módulo de Entrada Discreta com 8 canais;
- Módulo de Saída Discreta com 8 canais;
- Módulo FOUNDATION Fieldbus H1 com 2 portas de comunicação.

As variáveis de processo são adquiridas por meio de sensores FOUNDATION Fieldbus utilizando o Módulo H1, enquanto a execução de estratégias de controle é realizada pelo *DeltaV M-Series MQ Controller*. Além disso, o sistema DeltaV apresenta como principais características:

- Rede FOUNDATION Fieldbus para comunicação digital entre instrumentos de campo e o controlador;
- Estação de supervisão baseada em sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para monitoramento, operação e armazenamento de dados históricos;
- Protocolo OPC UA (*Open Platform Communications Unified Architecture*) para troca de dados com aplicações externas.

Essa infraestrutura permite a aquisição das variáveis do processo, a execução das estratégias de controle implementadas na planta e a disponibilização dos dados experimentais utilizados nas etapas de modelagem, caracterização dos atuadores e validação do simulador desenvolvidas durante o estágio.

Figura 4 – SDCD *Emerson DeltaV*



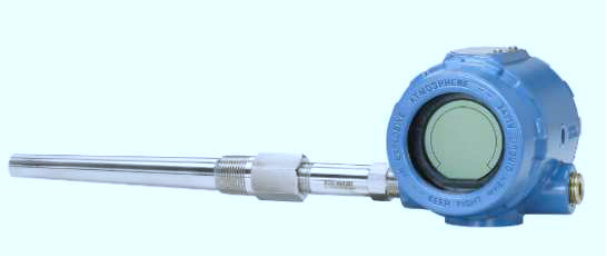
Fonte: Autoria Própria.

3.4.2 Transmissores FOUNDATION Fieldbus

A instrumentação de campo da planta é composta por quatro transmissores conectados à rede FOUNDATION Fieldbus: TT-001, TT-002, TT-003 e LT-001. Os instrumentos TT-001, TT-002 e TT-003 são responsáveis pela medição de temperatura em diferentes pontos do processo, enquanto o instrumento LT-001 realiza a medição da variável de nível. Todos os dispositivos comunicam-se digitalmente com o SDCD *DeltaV* por meio do módulo *FOUNDATION Fieldbus H1* disponível na plataforma *DeltaV M-Series Traditional I/O*.

- Rosemount 3144P Fieldbus Temperature Transmitter (TT-001, TT-002 e TT-003): Os transmissores Rosemount 3144P são utilizados para a medição das temperaturas do Tanque 2, da linha de recirculação e da linha de alimentação do processo, correspondentes aos instrumentos TT-001, TT-002 e TT-003, respectivamente. Esses dispositivos realizam o condicionamento e a transmissão digital dos sinais de temperatura por meio do protocolo *FOUNDATION Fieldbus*, permitindo sua integração direta ao sistema de controle distribuído.

Figura 5 – Transmissor de temperatura Rosemount 3144P FOUNDATION Fieldbus.



Fonte: Emerson.

- Rosemount 3051S Differential Pressure Transmitter FOUNDATION Fieldbus (LT-001): O instrumento LT-001 utiliza um transmissor de pressão diferencial Rosemount 3051S para a medição indireta do nível do fluido no Tanque 3. O princípio de funcionamento baseia-se na relação entre a altura da coluna líquida e a pressão hidrostática exercida sobre o sensor. O valor medido é transmitido digitalmente ao SDCD por meio da rede FOUNDATION Fieldbus.

Figura 6 – Transmissor de pressão diferencial Rosemount 3051S FOUNDATION Fieldbus.



Fonte: Emerson.

Os sinais provenientes desses transmissores constituem as principais entradas do sistema de controle, sendo utilizados tanto para monitoramento operacional da planta quanto para a obtenção dos dados experimentais empregados neste trabalho.

3.4.3 Atuadores 4–20 mA

Os elementos finais de controle da planta comunicam-se com o SDCD por meio de sinais analógicos de corrente na faixa de 4 a 20 mA. A interface entre o sistema de controle e os atuadores é realizada por módulos de saída analógica HART disponíveis na plataforma DeltaV.

- NVF24-MFT-E-50 Atuador Linear para Válvulas (BELIMO) (FV-001 e FV-002): Os atuadores NVF24-MFT-E-50 são utilizados para o posicionamento das válvulas proporcionais FV-001 e FV-002. Esses dispositivos convertem o sinal analógico de controle proveniente do SDCD em deslocamento linear da haste da válvula, permitindo a modulação contínua da abertura e, consequentemente, a variação de vazão. A válvula FV-001 atua diretamente sobre a vazão de recirculação do processo, enquanto a válvula FV-002 permite o desvio parcial da vazão entre os Tanques 2 e 3.

Figura 7 – Atuador linear NVF24-MFT-E-50.



Fonte: BELIMO.

- Inversor de Frequência Ajustável *PowerFlex* 40 (SC-001 e SC-002): Os inversores de frequência *PowerFlex* 40 são empregados no acionamento das bombas de alimentação e de recirculação da planta. Esses equipamentos recebem um sinal analógico de 4 a 20 mA proveniente do SDCD e ajustam a frequência e a tensão fornecidas aos motores elétricos, possibilitando o controle contínuo da velocidade de rotação das bombas e, consequentemente, da vazão. O inversor SC-001 controla a bomba de alimentação do processo, enquanto o inversor SC-002 atua sobre a bomba de recirculação.

Figura 8 – Inversor de frequência PowerFlex 40.



Fonte: Rockwell Automation.

- Bomba Trifásica Hydrobloc P 500 T (KSB): As bombas centrífugas Hydrobloc P 500 T são utilizadas para promover o transporte do fluido ao longo da planta. A bomba 1 é responsável pela transferência de água do Tanque 1 para o Tanque 2,

enquanto a bomba 2 realiza a recirculação do fluido a partir do Tanque 3. Ambas são acionadas pelos inversores *PowerFlex 40*.

Figura 9 – Bomba trifásica Hydrobloc P 500 T.



Fonte: KSB.

- Conversor de Potência Tiristherm TH 6200 (TV-001): O conversor de potência Tiristherm TH 6200 é responsável pelo acionamento da resistência elétrica instalada no Tanque 2. O equipamento recebe um sinal analógico de 4 a 20 mA proveniente do SDCD e modula a potência elétrica fornecida à resistência por meio de tiristores, permitindo o controle contínuo da energia térmica transferida ao processo. Dessa forma, atua diretamente na regulação da temperatura do fluido no Tanque 2.

Figura 10 – Conversor de potência Tiristherm TH 6200.



Fonte: Fotografia registrada pelo autor.

Os atuadores descritos nesta subseção são responsáveis pela manipulação de variáveis importantes do processo, desempenhando papel fundamental tanto na operação da planta quanto na obtenção dos modelos utilizados para o desenvolvimento do simulador.

3.5 Modelagem Dinâmica de Processos

Os modelos dinâmicos fundamentados em princípios físicos são geralmente desenvolvidos a partir das leis de conservação da massa e da energia, complementadas por relações constitutivas que descrevem fenômenos de transporte, propriedades termodinâmicas e características dos equipamentos envolvidos (BEQUETTE, 1998). Dessa forma, torna-se possível descrever o comportamento do processo frente a alterações nas condições de operação e nas variáveis manipuláveis.

A partir dessas informações, são formuladas as equações diferenciais que representam a dinâmica do sistema. Estas são apresentadas à seguir nas seções de Balanço de Massa e Balanço de Energia.

3.5.1 Balanço de Massa

O balanço de massa é baseado no princípio da conservação da matéria, segundo o qual a massa não pode ser criada nem destruída. Dessa forma, a taxa de acumulação de massa em um sistema $\frac{dM}{dt}$ deve ser igual à diferença entre as taxas de entrada e saída de massa, acrescida de eventuais termos de geração ou consumo decorrentes de reações químicas ou outros fenômenos físicos (BEQUETTE, 1998).

Considerando um sistema dinâmico analisado ao longo de um intervalo de tempo finito Δt, a variação da massa armazenada entre os instantes t e $t + \Delta t$ é igual à diferença entre a massa que entra e a massa que sai do sistema nesse intervalo. Matematicamente:

$$M\Big|_{t+\Delta t} - M\Big|_{t} = \int_{t}^{t+\Delta t} \dot{m}_{in}\, dt - \int_{t}^{t+\Delta t} \dot{m}_{out}\, dt = \int_{t}^{t+\Delta t} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})\; dt \tag{3.1}$$

Onde M representa a massa total no sistema, enquanto $\dot{m}_{in}$ e $\dot{m}_{out}$ representam a taxa de massa entrando e saindo do sistema, respectivamente. Para prosseguir com a derivação da forma diferencial do balanço de massa, aplica-se o Teorema do Valor Médio para Integrais. Este teorema diz que se f é contínua em $[a, b]$, então existe um ponto $c \in [a, b]$, tal que:

$$\int_{a}^{b} f(x)\, dx = f(c)(b - a), \qquad c \in [a, b]. \tag{3.2}$$

Aplicando o Teorema do Valor Médio para a integral:

$$\int_t^{t+\Delta t} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})\ dt = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})|_c \Delta t \tag{3.3}$$

Uma maneira de definir c dentro do intervalo $[t, t+\Delta t]$ matematicamente é:

$$c = t + \alpha\Delta t, \qquad 0 \leq \alpha \leq 1. \tag{3.4}$$

Substituindo c na Equação 3.3:

$$\int_t^{t+\Delta t} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})\ dt = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})|_{t+\alpha\Delta t} \Delta t \tag{3.5}$$

Substituindo a Equação 3.5 na Equação 3.1:

$$M\Big|_{t+\Delta t} - M\Big|_t = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})|_{t+\alpha\Delta t} \Delta t \tag{3.6}$$

Dividindo ambos os lados por Δt e tomando o limite quando $\Delta t \to 0$, obtém-se:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{M\Big|_{t+\Delta t} - M\Big|_t}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})\Big|_{t+\alpha\Delta t} \tag{3.7}$$

Utilizando a definição de derivada e observando que $(t + \alpha\Delta t \to t)$ quando $(\Delta t \to 0)$, obtém-se a forma diferencial do balanço de massa:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \tag{3.8}$$

Para sistemas sem reações químicas e constituídos por fluidos incompressíveis, a massa pode ser escrita como o produto entre o volume e a densidade do fluido. Além disso, as taxas de variação de massa de entrada e saída podem ser expressas em função das vazões volumétricas. Assim:

$$\frac{dV\rho}{dt} = F_{in}\rho_{in} - F_{out}\rho \tag{3.9}$$

em que V representa o volume de fluido armazenado no sistema, ρ sua densidade e F a vazão volumétrica.

3.5.2 Balanço de Energia

O balanço de energia é formulado a partir da Primeira Lei da Termodinâmica, segundo a qual a energia total de um sistema é conservada. Assim, a taxa de variação da energia armazenada em um sistema ao longo do tempo é determinada pelo fluxo de

energia total entrando e saindo do sistema, bem como pelas trocas térmicas e pelo trabalho realizado sobre o sistema. (BEQUETTE, 1998).

Em termos matemáticos, tem-se que :

$$\frac{dTE}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{out} + Q + W \tag{3.10}$$

Onde:

- TE é a energia total do sistema, sendo a soma das energias interna, cinética e potencial;
- Q é a taxa de transferência de calor que entra no sistema;
- W é a taxa de trabalho sendo executado pelo sistema.

Os termos $\dot{E}_{in}$ e $\dot{E}_{out}$ representam as taxas de energia envolvendo as massas de entrada e saída do sistema, respectivamente.

Em alguns processos industriais, como tanques aquecidos, as variações de energia cinética e potencial são frequentemente desprezadas quando comparadas à energia interna armazenada no fluido. Nessas condições, a dinâmica energética do sistema pode ser descrita predominantemente pela variação da energia interna. Essa simplificação será tomada neste trabalho.

O balanço de energia é frequentemente utilizado para determinar uma equação diferencial para a dinâmica de malhas de temperatura.

Neste trabalho, os balanços de massa e energia constituem a base para o desenvolvimento do modelo matemático do evaporador de circulação forçada, permitindo a obtenção das equações diferenciais das malhas de nível e temperatura.

4 Atividades Realizadas

Neste capítulo são apresentadas as principais atividades desenvolvidas durante o período de realização do Estágio Supervisionado. Dentre estas, destaca-se a modelagem do evaporador, a caracterização dos atuadores, o desenvolvimento do simulador e os experimentos para validação.

4.1 Modelagem do Evaporador

Nesta seção é apresentada a modelagem dinâmica do evaporador de circulação forçada, implementado utilizando a planta didática apresentada neste documento. O desenvolvimento do modelo foi realizado a partir da aplicação dos balanços de massa e energia aos diferentes elementos da planta, considerando as hipóteses adotadas para sua operação. A Tabela 1 apresenta a nomenclatura e as unidades das principais variáveis utilizadas ao longo da modelagem, enquanto a Tabela 2 identifica as vazões consideradas no processo.

Tabela 1 – Descrição e unidades de medida dos parâmetros utilizados na modelagem.

Variável	**Descrição**	**Unidade**
V	Volume do tanque	m^3
ρ	Densidade do fluido	kg/m^3
h	Nível do fluido no tanque	m
A	Área da seção transversal do tanque	m^2
T	Temperatura do fluido no Tanque 2	$^\circ C$
T_i	Temperatura da corrente de entrada	$^\circ C$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^\circ C$
T_{parede}	Temperatura da parede do tanque	$^\circ C$
C_p	Calor específico do fluido	$J/(kg \cdot K)$
C_{parede}	Capacitância térmica da parede do tanque	J/K
$Q_{eletrico}$	Potência térmica fornecida pela resistência	W
Q_{perdas}	Taxa de perdas térmicas para o ambiente	W
α_{agua}	Coeficiente de transferência de calor entre fluido e parede	W/K
α_{isol}	Coeficiente de transferência de calor entre parede e ambiente	W/K
u	Energia interna específica	J/kg
$\bar{h}$	Entalpia específica	J/kg

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Identificação das vazões do processo.

Variável	**Descrição**	**Unidade**
F_{B_1}	Vazão fornecida pela Bomba 1	m^3/s
F_{B_2}	Vazão fornecida pela Bomba 2	m^3/s
F_{V_1}	Vazão descarregada pela válvula FV-001	m^3/s
F_{V_2}	Vazão descarregada pela válvula FV-002	m^3/s
F_R	Vazão de recirculação	m^3/s
F_{in_2}	Vazão de entrada do Tanque 2	m^3/s
F_{out_2}	Vazão de saída do Tanque 2	m^3/s
F_{in_3}	Vazão de entrada do Tanque 3	m^3/s

Fonte: Autoria própria.

4.1.1 Balanço de Massa no Tanque 2

Inicialmente, aplica-se o balanço de massa no Tanque de aquecimento com o intuito de obter uma expressão para a vazão de entrada no Tanque de armazenamento, objeto de estudo da dinâmica de nível. Aplicando a Equação 3.9, apresentada na Seção 3.5.1, ao Tanque 2:

$$\frac{dV\rho}{dt} = F_{in_2}\rho_{in} - F_{out_2}\rho \tag{4.1}$$

O volume pode ser escrito em função da área de seção transversal do tanque e do nível $V = A \cdot h$:

$$\frac{dAh_2\rho}{dt} = F_{in_2}\rho_{in} - F_{out_2}\rho \tag{4.2}$$

Admitindo área transversal constante e considerando a água como fluido incompressível, a densidade pode ser considerada constante ao longo da operação. Dessa forma, os termos A e ρ podem ser retirados da derivada temporal, resultando em:

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A}(F_{in_2} - F_{out_2}) \tag{4.3}$$

Conforme descrito na Seção 3.3, o Tanque 2 opera permanentemente preenchido durante o funcionamento normal da planta. Nessas condições, o nível permanece constante ao longo do tempo, implicando em:

$$\frac{1}{A}(F_{in_2} - F_{out_2}) = 0 \tag{4.4}$$

Dessa forma, a vazão que entra no Tanque 2 é a mesma que deixa o sistema:

$$F_{in_2} = F_{out_2} \tag{4.5}$$

Com base nas linhas de vazão mostradas na Figura 3, tem-se que:

$$F_{in_2} = F_{B_1} + F_R \tag{4.6}$$

$$F_{out_2} = F_{V_2} + F_{in_3} \tag{4.7}$$

Utilizando a Equação 4.5 e substituindo a Equação 4.6 na Equação 4.7, obtém-se a expressão para a vazão que entra no Tanque 3:

$$F_{in_3} = F_{B_1} + F_R - F_{V_2} \tag{4.8}$$

4.1.2 Balanço de Massa no Tanque 3

Após a obtenção da expressão para a vazão de entrada do Tanque 3, realiza-se a aplicação do balanço de massa ao Tanque de armazenamento, cuja variável de interesse é o nível do fluido. O objetivo é obter a equação diferencial que descreve a dinâmica de nível do sistema.

Aplicando a Equação 3.9, apresentada na Seção 3.5.1, ao Tanque 3:

$$\frac{dV\rho}{dt} = F_{in_3}\rho_{in} - F_{B_2}\rho \tag{4.9}$$

Reescrevendo o volume em função da área transversal do tanque e da altura do fluido e considerando a água como um fluido incompressível de densidade constante, obtém-se:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A}(F_{in_3} - F_{B_2}) \tag{4.10}$$

Agora, pode-se substituir a Equação 4.8, encontrada ao realizar o balanço de massa no Tanque 2, na Equação 4.10:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A}(F_{B_1} + F_R - F_{V_2} - F_{B_2}) \tag{4.11}$$

Observa-se, entretanto, que a Equação 4.11 ainda depende da vazão de recirculação F_R, variável interna do processo que não está diretamente associada a um atuador. Assim, torna-se necessário reescrevê-la em função das vazões manipuladas.

$$F_R = F_{B_2} - F_{V_1} \tag{4.12}$$

Substituindo a Equação 4.12 na Equação 4.11:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A}(F_{B_1} - F_{V_1} - F_{V_2}) \tag{4.13}$$

Observa-se que a variável de estado h_3 não aparece explicitamente no lado direito da Equação 4.13. Consequentemente, a dinâmica de nível do Tanque 3 apresenta característica integrativa e comportamento não autorregulatório.

Assim, a dinâmica de nível depende diretamente da vazão de alimentação fornecida pela Bomba 1 e das vazões descarregadas pelas válvulas FV-001 e FV-002, tornando necessária a modelagem desses elementos para a simulação dinâmica do sistema.

4.1.3 Balanço de Energia no Tanque 2

Além da dinâmica de nível, o processo de evaporação por circulação forçada apresenta uma dinâmica térmica associada ao Tanque 2, responsável pelo aquecimento do fluido por meio de uma resistência elétrica. Dessa forma, torna-se necessário desenvolver um modelo que descreva a evolução temporal da temperatura do sistema.

Aplicando o balanço de energia apresentado na Seção 3.5.2 ao Tanque 2, obtém-se:

$$\frac{dTE}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{out} + Q + W \tag{4.14}$$

A energia transportada pelas correntes de entrada e saída está associada ao escoamento de massa através do sistema. Considerando desprezíveis as contribuições de energia cinética e potencial, a energia transportada por unidade de massa pode ser representada pela energia interna específica u.

Assim, as taxas de energia associadas às correntes de entrada e saída podem ser escritas como:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{m}_{in} u_i \tag{4.15}$$

$$\dot{E}_{out} = \dot{m}_{out} u \tag{4.16}$$

onde u_i e u representam as energias internas específicas das correntes de entrada e saída, respectivamente.

A vazão mássica pode ser obtida por:

$$\dot{m} = F\rho \tag{4.17}$$

resultando em:

$$\dot{E}_{ent} = F_{in_2}\rho_i u_i \tag{4.18}$$

$$\dot{E}_{out} = F_{out_2}\rho u \tag{4.19}$$

Substituindo essas relações na Equação 4.14:

$$\frac{dU}{dt} = F_{in_2}\rho_i u_i - F_{out_2}\rho u + Q + W \tag{4.20}$$

onde U representa a energia interna total armazenada no tanque.

O termo W corresponde ao trabalho de escoamento associado ao transporte de massa através do sistema. Esse trabalho pode ser escrito como:

$$W = F_{in_2}\rho_i p_i v_i - F_{out_2}\rho p v \tag{4.21}$$

em que $p_i v_i$ e pv representam os trabalhos específicos de escoamento das massas de entrada e saída.

Substituindo essa expressão na Equação 4.20:

$$\frac{dU}{dt} = F_{in_2}\rho_i(u_i + p_i v_i) - F_{out_2}\rho(u + pv) + Q \tag{4.22}$$

Utilizando a definição de entalpia específica,

$$\bar{h} = u + pv \tag{4.23}$$

obtém-se:

$$\frac{dU}{dt} = F_{in_2}\rho_i\bar{h_i} - F_{out_2}\rho\bar{h} + Q \tag{4.24}$$

A transferência de calor para o sistema é composta pela potência fornecida pela resistência elétrica e pelas perdas térmicas que o Tanque sofre para o ambiente:

$$Q = Q_{eletrico} - Q_{perdas} \tag{4.25}$$

Substituindo:

$$\frac{dU}{dt} = F_{in_2}\rho_i\bar{h_i} - F_{out_2}\rho\bar{h} + Q_{eletrico} - Q_{perdas} \tag{4.26}$$

Admitindo calor específico constante, a entalpia específica pode ser escrita como:

$$\bar{h} = C_p(T - T_{ref}) \tag{4.27}$$

e

$$\bar{h_i} = C_p(T_i - T_{ref}) \tag{4.28}$$

Onde C_p é o calor específico do fluido.

A entalpia específica de um fluido é calculada para um determinado valor de referência de temperatura. No caso da água, que é o fluido utilizado durante a operação da planta física, a temperatura de referência utilizada é o ponto de fusão ($0\ ^\circ C$). Substituindo essas relações e considerando densidade constante:

$$\frac{dU}{dt} = F_{in_2}\rho_i C_p T_i - F_{out_2}\rho C_p T + Q_{eletrico} - Q_{perdas} \tag{4.29}$$

Conforme demonstrado anteriormente no balanço de massa do Tanque 2, o nível permanece constante durante a operação normal da planta, implicando:

$$F_{in_2} = F_{out_2} \tag{4.30}$$

Dessa forma, considerando a densidade constante, pode-se colocar os termos de energia interna de entrada e saída em evidência, resultando na Equação 4.31:

$$\frac{dU}{dt} = F_{in_2}\rho C_p(T_i - T) + Q_{eletrico} - Q_{perdas} \tag{4.31}$$

Considerando o volume do tanque constante, bem como a densidade do fluido, tem-se que a energia interna armazenada no tanque é dada por:

$$U = V\rho C_p(T - T_{ref}) \tag{4.32}$$

Substituindo a Equação 4.32 na Equação 4.31:

$$V\rho C_p\frac{dT}{dt} = F_{in_2}\rho C_p(T_i - T) + Q_{eletrico} - Q_{perdas} \tag{4.33}$$

Para obter uma representação mais realista da dinâmica térmica do sistema, considera-se a condução de calor realizada pela parede do tanque, feita de aço inox:

$$C_{parede}\frac{dT_{parede}}{dt} = Q_{perda,parede} - Q_{perda,amb} \tag{4.34}$$

Por sua vez, os termos $Q_{perda,parede}$ e $Q_{perda,amb}$, podem ser expressos em função do coeficiente de transferência de calor do fluido e do material isolante $\alpha_{água}$ e α_{isol}:

$$Q_{perda,parede} = \alpha_{\text{água}}(T - T_{parede}) \tag{4.35}$$

$$Q_{perda,amb} = \alpha_{isol}(T_{parede} - T_{amb}) \tag{4.36}$$

Como o coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede do tanque é significativamente maior que o coeficiente de transferência de calor entre a parede e o ambiente $\alpha_{\text{água}} \gg \alpha_{isol}$, a diferença de temperatura entre a água e a parede torna-se muito pequena, permitindo assumir:

$$T \approx T_{parede} \tag{4.37}$$

Como $T \approx T_{parede}$, a diferença de temperatura entre fluido e parede torna-se desprezível quando comparada às demais dinâmicas térmicas do sistema. Assim,

$$Q_{perda,parede} = \alpha_{\text{água}}(T - T_{parede}) \approx 0 \tag{4.38}$$

Substituindo a aproximação obtida na Equação 4.38 e a Equação 4.36 na Equação 4.34, resulta-se na Equação 4.39:

$$C_{parede}\frac{dT_{parede}}{dt} = -\alpha_{isol}(T_{parede} - T_{amb}) \tag{4.39}$$

Englobando a Equação 4.39 na Equação 4.33, resulta-se na expressão final, exposta na Equação 4.40:

$$(V\rho C_p + C_{parede})\frac{dT}{dt} = F_{in_2}\rho C_p(T_i - T) + Q_{eletrico} - \alpha_{isol}(T - T_{amb}) \tag{4.40}$$

Observa-se que a dinâmica térmica do Tanque 2 possui comportamento autorregulatório, uma vez que a variável de estado T aparece explicitamente no lado direito da Equação 4.40. Dessa forma, para valores constantes de vazão de alimentação, potência elétrica e temperatura ambiente, o sistema tende naturalmente a um ponto de equilíbrio térmico.

A Equação 4.40 descreve a dinâmica da temperatura no Tanque 2 em função da vazão de entrada, da potência elétrica fornecida ao sistema de aquecimento, por meio do atuador térmico, e das perdas térmicas para o ambiente, constituindo a base para a modelagem da malha de temperatura do evaporador e para futuras estratégias de controle.

4.2 Caracterização dos Atuadores

Para a implementação das equações dinâmicas no simulador desenvolvido em *Python*, tornou-se necessária a caracterização dos atuadores e dos parâmetros que influenciam as dinâmicas de nível do Tanque 3 e de temperatura do Tanque 2.

Entretanto, durante o desenvolvimento das atividades experimentais, após a conclusão da caracterização dos atuadores associados à malha de nível e a implementação do respectivo simulador, ocorreram problemas mecânicos na Bomba de Recirculação SC-002. O equipamento passou a apresentar travamento mecânico, impossibilitando sua operação e, consequentemente, a realização de novos ensaios experimentais.

A indisponibilidade da bomba afetou diretamente a continuidade dos trabalhos relacionados à malha de temperatura, uma vez que a vazão de recirculação exerce papel fundamental na dinâmica térmica do processo. Dessa forma, embora a modelagem matemática da dinâmica de temperatura tenha sido desenvolvida a partir do balanço de energia do Tanque 2, a implementação e validação experimental da malha térmica não puderam ser concluídas.

Pelo mesmo motivo, os experimentos de validação apresentados neste trabalho ficaram restritos a um único ponto de operação da planta. Os dados obtidos antes da ocorrência da falha mecânica foram utilizados para comparar o comportamento do modelo matemático com a resposta real do sistema, permitindo a realização da validação da dinâmica de nível do Tanque 3.

Antes da realização dos ensaios experimentais, foram determinadas as dimensões geométricas do Tanque 3, necessárias tanto para a modelagem dinâmica do sistema quanto para a conversão das medições de nível em vazão volumétrica. Para isso, foram realizadas medições do diâmetro interno e da altura do tanque, obtendo-se os valores de $d = 0{,}220\,m$ e $h = 0{,}71\,m$, respectivamente.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0{,}0379\ m^2 \tag{4.41}$$

$$V = Ah = 0{,}0269 m^3 \tag{4.42}$$

Assumindo geometria cilíndrica, foram obtidos uma área transversal de $0{,}0379\,m^2$ e um volume útil aproximado de $0{,}0269\,m^3$.

4.2.1 Caracterização da Vazão da Bomba F_{B_1}

A dinâmica de nível no Tanque de Armazenamento depende da vazão da bomba F_{B_1}, que por sua vez é acionada e alterada por um inversor de frequência. Então, para

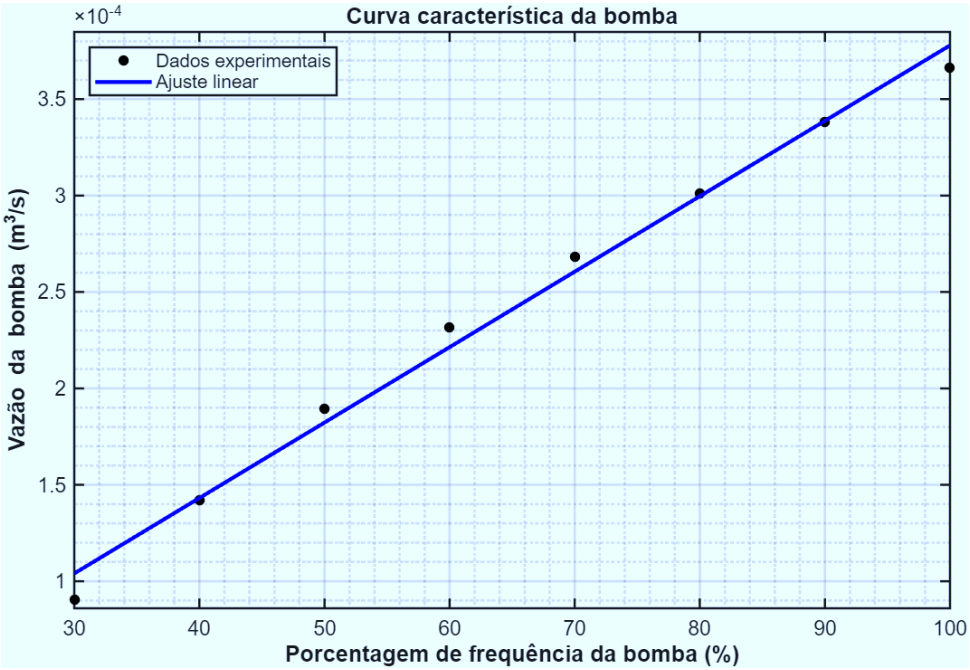
modelagem dessa vazão para quaisquer condições do processo, é necessário o levantamento da curva característica vazão x frequência do inversor.

A determinação da vazão associada à bomba foi realizada a partir da análise da variação temporal do nível no Tanque 3. Conhecendo-se previamente o volume do tanque e sua área transversal, foi possível converter a taxa de variação de nível em vazão volumétrica. Dessa forma, tornou-se possível obter experimentalmente a relação entre a frequência de acionamento do inversor e a vazão produzida pela bomba.

Para a realização dos ensaios, as linhas associadas à recirculação e às válvulas de descarga foram isoladas, de modo que a única contribuição para a variação de nível no Tanque 3 fosse a vazão proveniente da Bomba 1. Nessas condições, a dinâmica do tanque passa a ser descrita exclusivamente pelo fluxo F_{B_1}. Dessa forma, foram realizados ensaios para diferentes frequências de operação do inversor, variando entre 18 Hz e 60 Hz, correspondentes a aproximadamente 30% e 100% da frequência nominal do equipamento, respectivamente.

A Figura 11 apresenta a curva característica da bomba obtida por ajuste polinomial de primeira ordem (linear) em azul, obtida a partir dos dados experimentais coletados, representados por marcadores pretos.

Figura 11 – Curva Característica da Bomba



Fonte: Autoria Própria.

Com o objetivo de obter uma relação matemática entre a frequência do inversor e a vazão da bomba, realizou-se um ajuste linear aos dados experimentais por meio do método dos Mínimos Quadrados. O modelo obtido apresentou coeficiente de determinação

(*R-Squared*) de $R^2 = 0.9918$, indicando elevada aderência aos dados experimentais. A aproximação resultou na Equação 4.43, utilizada posteriormente na implementação do simulador do processo.

$$F_{B_1} = 4.005 \times 10^{-6} f_1 - 2.073 \times 10^{-5} \tag{4.43}$$

Onde f_1 corresponde à frequência de operação do inversor SC-001, expressa em porcentagem da frequência nominal.

4.2.2 Caracterização do Decaimento do nível no Tanque 3

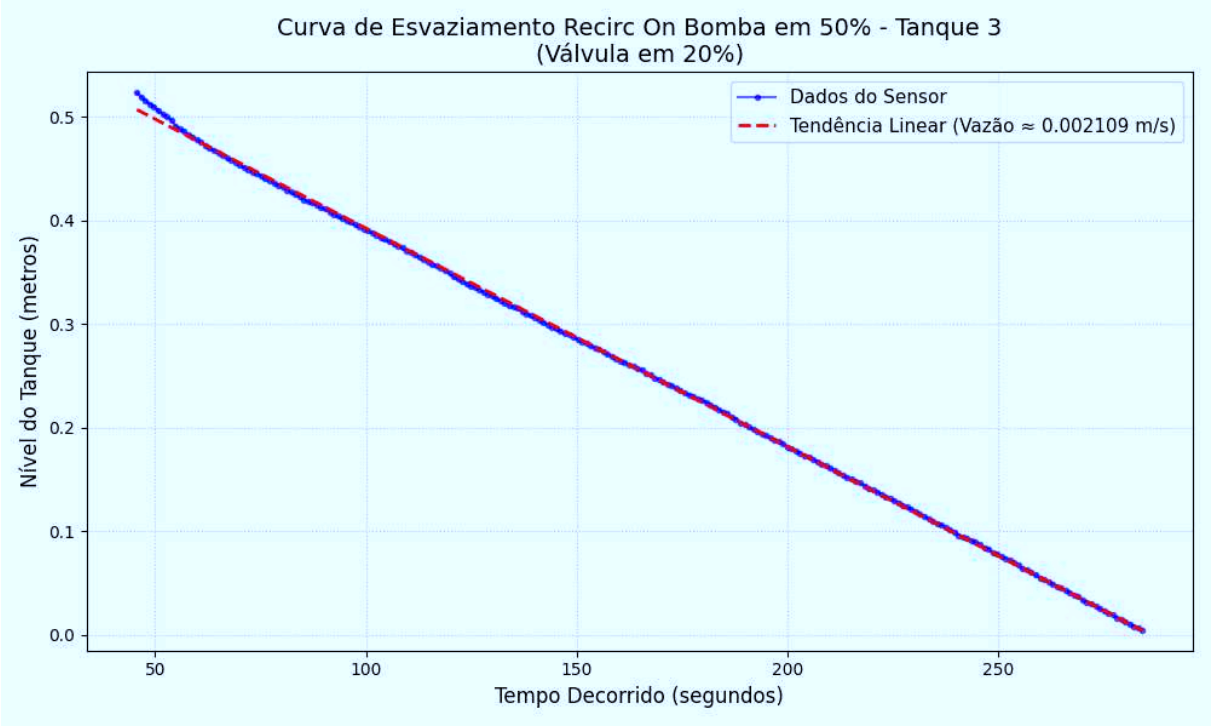
Uma vez caracterizado a vazão que adentra ao sistema por meio da bomba de alimentação F_{B_1}, faz-se necessário caracterizar a vazão que deixa o sistema, que é a vazão na linha F_{V_1}. A vazão volumétrica nessa linha é alterada por meio da porcentagem de abertura da válvula FV-001 modulada pelo sinal de corrente 4–20 mA. Além disso, a vazão que passa por esta linha depende do ponto de operação da bomba de recirculação F_{B_2}.

Como a vazão descarregada pela válvula depende simultaneamente da abertura da válvula e da vazão fornecida pela bomba de recirculação, foi necessário fixar um ponto de operação para a bomba controlada pelo inversor SC-002. Dessa forma, a caracterização pôde ser conduzida considerando apenas a influência da abertura da válvula FV-001 sobre a vazão descarregada. O ponto de operação escolhido foi de 50% do valor de frequência nominal, ou seja, 30 Hz.

Para a realização do experimento, encheu-se o Tanque 3 até 80% de seu volume por meio da bomba de alimentação F_{B_1}. Em seguida, realizou-se o isolamento completo do tanque, fechando as tubulações tanto de alimentação, quanto de descarga da válvula FV-002. Dessa forma, foram realizados ensaios para diferentes pontos de abertura da válvula, variando de 20% até 100%. É importante destacar que os ensaios foram realizados com a tubulação de recirculação aberta, uma vez que esta não exerce influência na dinâmica de nível do tanque 3, como demonstrado na Equação 4.13.

Para obtenção dos dados, utilizou-se um cliente OPC UA que realizava a leitura dos valores do sensor de nível LT-001 pelo nó instaciado via Servidor OPC UA criado pelo sistema *DeltaV*, disponível na estação dedicada. Considerando a vazão de descarregamento constante, a inclinação da reta ajustada aos dados experimentais forneceu a taxa de variação de nível $\frac{dh_3}{dt}$, expressa em m/s. Multiplicando esse valor pela área da seção transversal do tanque, obteve-se a vazão volumétrica correspondente em m^3/s. A Figura 12 mostra o decaimento linear do nível considerando uma abertura de 20%. A curva contínua em azul trata-se dos dados lidos pelo cliente OPC UA, enquanto que a curva vermelha tracejada trata-se da reta obtida via regressão linear.

Figura 12 – Curva de Esvaziamento do Tanque 3 para abertura da válvula em 20%.

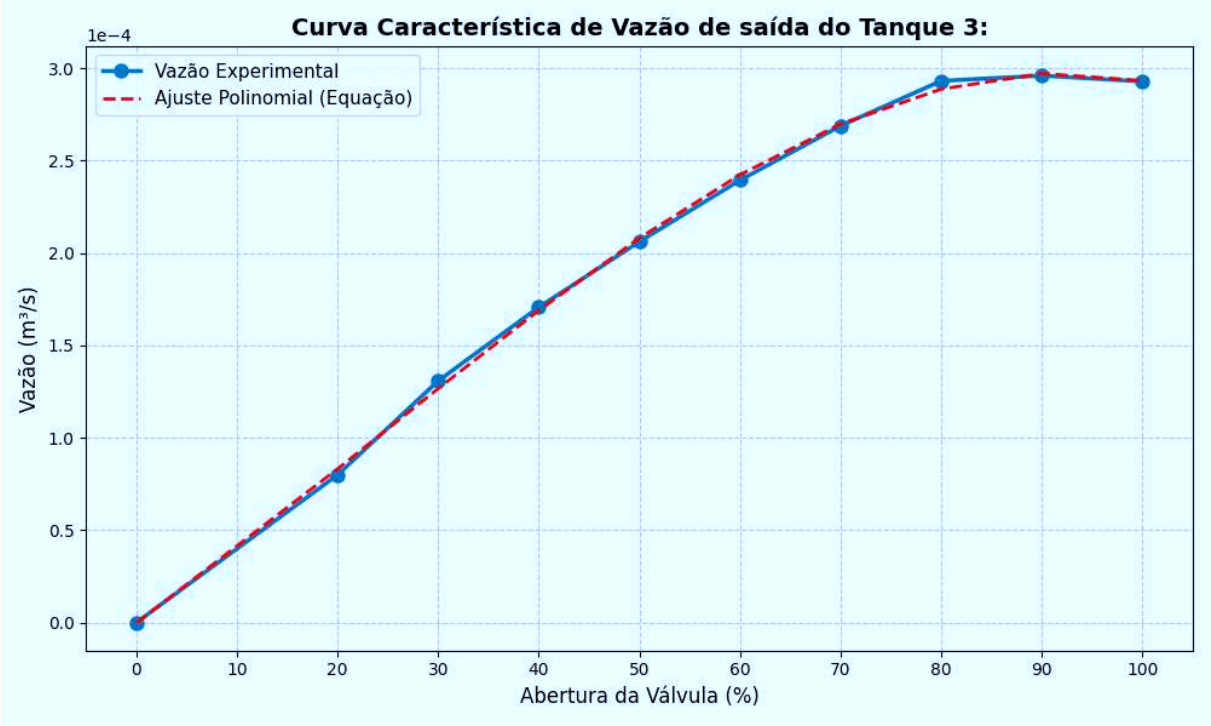


Fonte: Autoria Própria.

Esse procedimento foi repetido para as demais porcentagens no intervalo definido, de modo a obter a vazão volumétrica nestes pontos e assim, traçar a curva vazão versus abertura.

Observou-se um comportamento não linear dos dados obtidos, de modo que um polinômio de terceira ordem foi adotado para o ajuste polinomial por apresentar elevado grau de aderência aos dados experimentais. O modelo obtido apresentou $R^2 = 0.999$. A Figura 13 apresenta os pontos de vazão obtidos experimentalmente, representados por marcadores azuis, e em vermelho tracejado a curva característica obtida que relaciona vazão volumétrica ($\frac{m^3}{s}$) e abertura da válvula (%).

Figura 13 – Curva de Esvaziamento do Tanque 3 para abertura da válvula em 20%.



Fonte: Autoria Própria.

A aproximação de terceira ordem resultou na Equação 4.44, utilizada posteriormente na implementação do simulador do processo.

$$F_{V_1} = -3.066219 \cdot 10^{-10} u^3 + 2.135975 \cdot 10^{-8} u^2 + 3.865239 \cdot 10^{-6} u - 2.662637 \cdot 10^{-7} \quad (4.44)$$

Onde u corresponde a abertura da válvula FV-001, expressa em porcentagem. Para simplificação do modelo desenvolvido neste trabalho, considerou-se a válvula FV-002 permanentemente fechada durante as simulações e experimentos. Essa hipótese elimina uma corrente de descarga adicional, reduzindo o número de variáveis manipuladas e permitindo concentrar a análise da dinâmica de nível sobre os efeitos da bomba de alimentação e da válvula FV-001.

Com a caracterização da bomba de alimentação e da vazão sobre FV-001 nas condições de operação do processo, foram obtidas relações matemáticas capazes de descrever as vazões de entrada e saída do Tanque 3 em função dos atuadores. Essas relações constituem a base para a implementação do simulador e para a reprodução da dinâmica de nível do processo, apresentado na Equação 4.13, sob diferentes condições operacionais.

4.3 Simulador do Evaporador

Após a obtenção dos modelos matemáticos e das curvas características dos atuadores, foi desenvolvido um simulador para reproduzir a dinâmica de nível do evaporador sob diferentes condições operacionais. O simulador teve como objetivo fornecer uma ferramenta capaz de descrever o comportamento do processo a partir das ações aplicadas aos atuadores, possibilitando o estudo e análise do sistema sem a necessidade de utilização da planta física.

A implementação foi realizada na linguagem *Python*, utilizando as bibliotecas *NumPy*[1], *SciPy*[2], *Matplotlib*[3] e *Tkinter*. A interface gráfica desenvolvida permite ao usuário alterar, em tempo de execução, as variáveis manipuladas do processo e observar instantaneamente os efeitos dessas alterações sobre a dinâmica do nível no Tanque 3.

O modelo implementado baseia-se na equação diferencial obtida a partir do balanço de massa do Tanque 3:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A}\left(F_{B_1} - F_{V_1} - F_{V_2}\right) \tag{4.45}$$

Considerando o ponto de operação adotado para a válvula FV-002, mantida totalmente fechada durante os ensaios experimentais, a dinâmica do sistema pode ser simplificada para:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A}\left(F_{B_1} - F_{V_1}\right) \tag{4.46}$$

As vazões F_{B_1} e F_{V_1} são calculadas a partir das equações obtidas experimentalmente durante a etapa de caracterização dos atuadores. A vazão de alimentação é determinada em função da frequência aplicada ao inversor da Bomba 1, enquanto a vazão de saída é calculada em função da abertura da válvula FV-001.

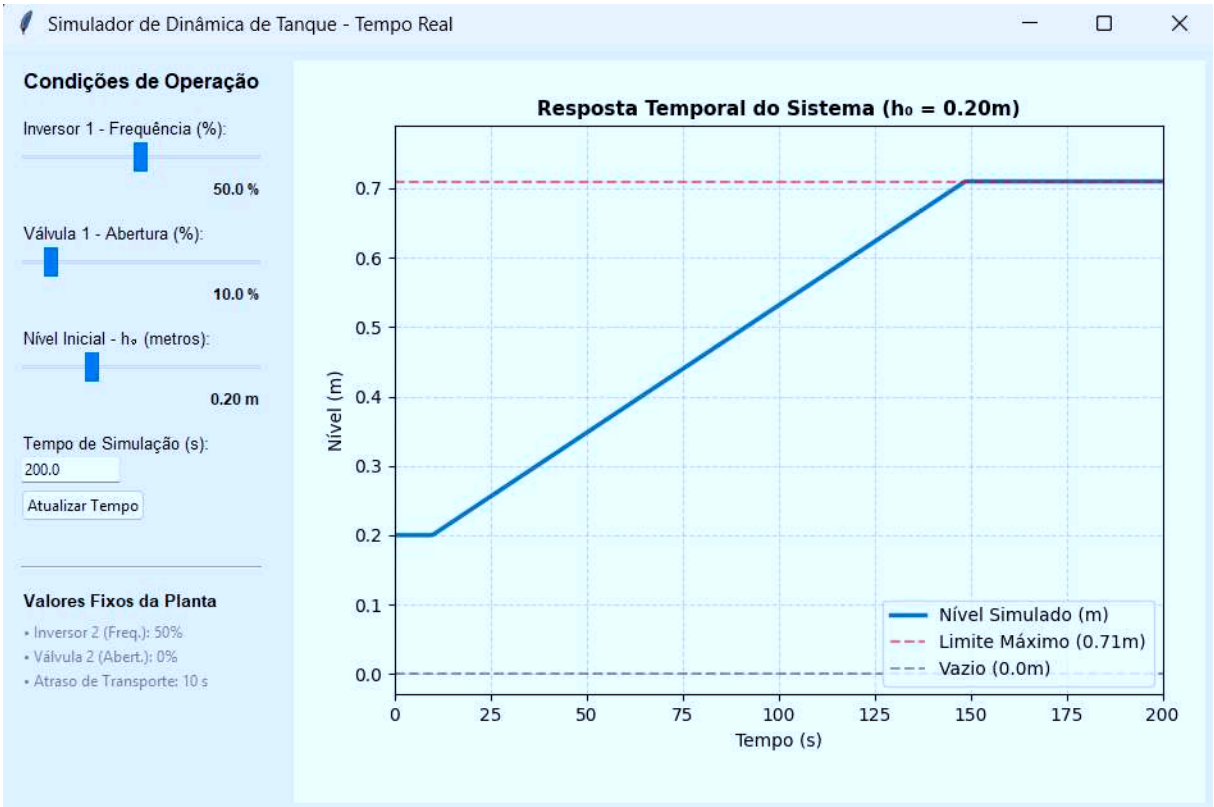
A resolução numérica da equação diferencial foi realizada utilizando o método Runge-Kutta de quinta ordem, disponível por meio da função *solve_ivp* da biblioteca *SciPy*. Além disso, foi incorporado ao modelo um atraso de transporte de 10 segundos, observado experimentalmente durante os ensaios realizados na planta.

Para garantir a coerência física dos resultados, foram implementadas restrições correspondentes aos limites operacionais do tanque. Dessa forma, o nível é limitado ao intervalo compreendido entre 0 m e 0,71 m, impedindo valores fisicamente impossíveis durante as simulações.

[1] Disponível em: <https://numpy.org/>.
[2] Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/>.
[3] Disponível em: <https://matplotlib.org/>.

A interface gráfica desenvolvida permite ao usuário ajustar a frequência da Bomba 1, a abertura da válvula FV-001, o nível inicial do tanque e o tempo total de simulação. A Figura 14 apresenta a interface implementada. Nessa condição, considera-se nível inicial de 0,20 m, frequência da Bomba 1 igual a 50% e abertura da válvula FV-001 de 10%.

Figura 14 – Interface gráfica do simulador desenvolvido.

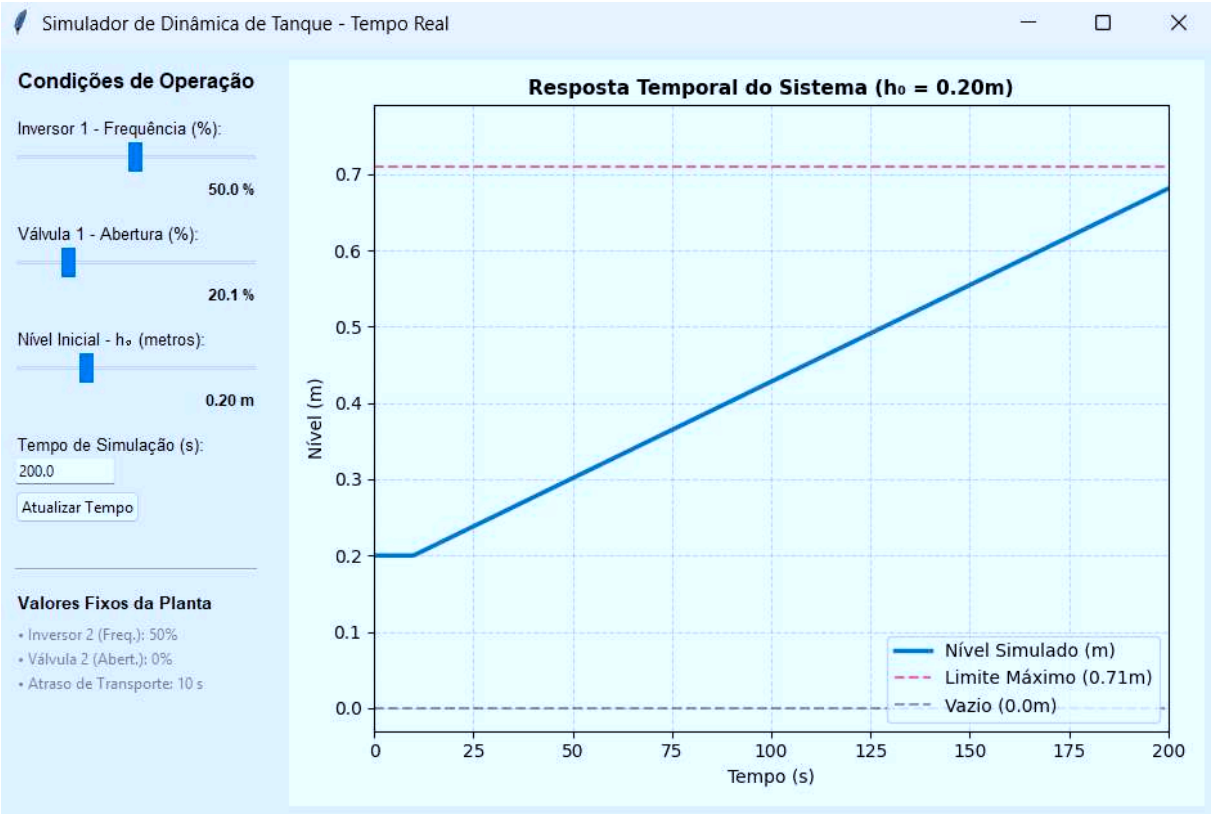


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o nível do tanque cresce aproximadamente de forma linear ao longo do tempo. Esse comportamento é consequência da natureza integrativa da dinâmica de nível, uma vez que a vazão de entrada é superior à vazão de saída, resultando em $\frac{dh_3}{dt} > 0$.

Por sua vez, mantendo a frequência da Bomba 1 em 50% e aumentando a abertura da válvula FV-001 para 20%, a vazão de saída torna-se maior. Como consequência, a diferença entre as vazões de entrada e saída é reduzida, diminuindo a taxa de crescimento do nível, conforme ilustrado na Figura 15.

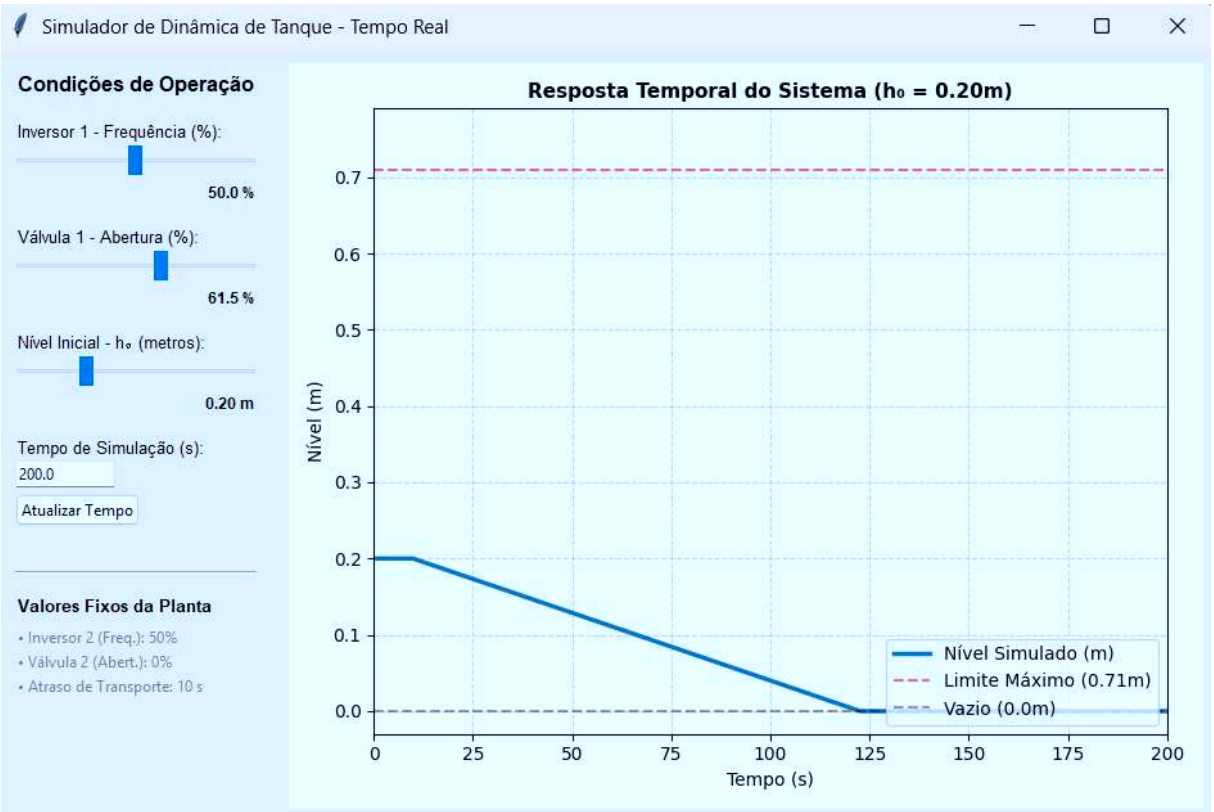
Figura 15 – Simulação aumentando a abertura da Válvula 1 para 20%



Fonte: Autoria própria.

À medida que a abertura da válvula continua aumentando, a vazão descarregada pode superar a vazão fornecida pela bomba de alimentação. Nessa situação, o balanço de massa torna-se negativo ($\frac{dh_3}{dt} < 0$), provocando a redução contínua do nível armazenado no tanque. Esse comportamento é evidenciado na Figura 16.

Figura 16 – Simulação aumentando a abertura da Válvula 1.



Fonte: Autoria própria.

Por meio da ferramenta desenvolvida, tornou-se possível avaliar o comportamento dinâmico do processo para diferentes condições operacionais, contribuindo para a compreensão da influência dos atuadores sobre a variável de nível e servindo como base para futuras etapas de projeto e implementação de estratégias de controle.

4.4 Experimentos de Validação

Após a obtenção das equações do modelo e o desenvolvimento do simulador, realizou-se a etapa de validação com o objetivo de verificar a capacidade do modelo em reproduzir a dinâmica observada na planta real.

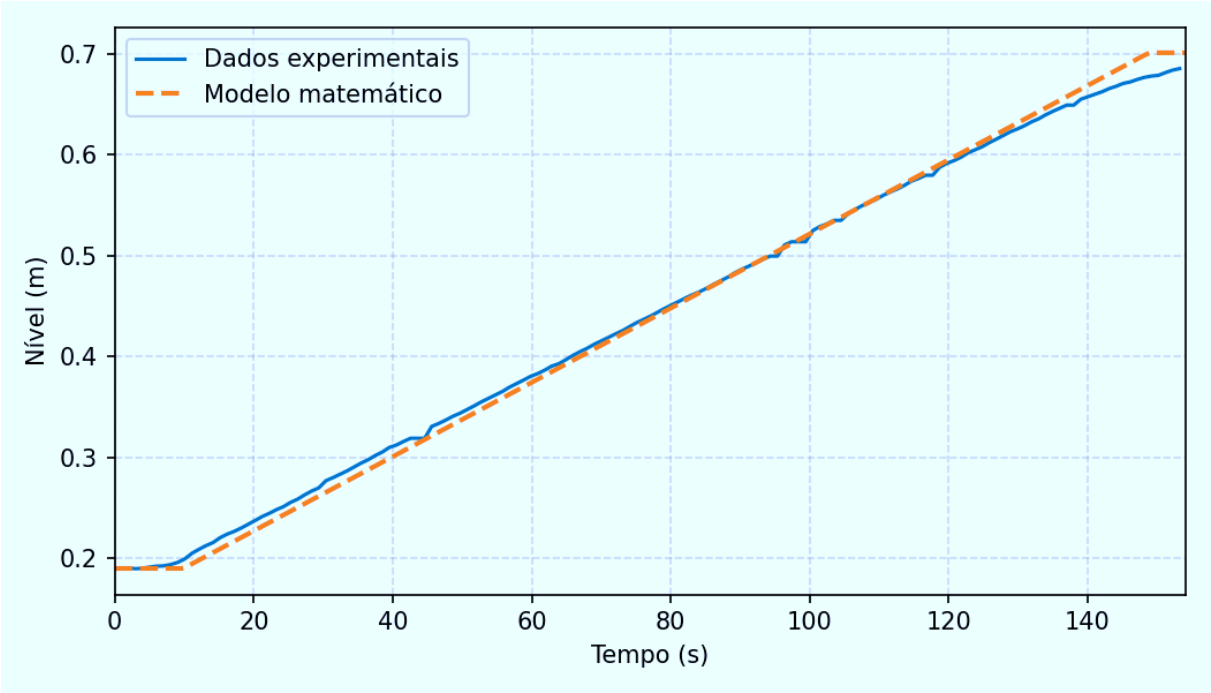
Para isso, foi executado um experimento em malha aberta utilizando as mesmas condições adotadas na simulação. O cenário de teste foi definido com a Bomba 1 operando a 50% da frequência nominal, a válvula FV-001 posicionada em 10% de abertura, a Bomba 2 mantida em 50% de frequência e a válvula FV-002 completamente fechada. Nessas condições, a vazão de entrada é superior à vazão de saída, resultando no aumento gradual do nível do Tanque 3.

Os dados experimentais foram obtidos por meio da leitura do transmissor de nível LT-001 através do servidor OPC UA disponibilizado pelo sistema DeltaV. Em seguida, o

modelo matemático foi simulado utilizando as mesmas condições operacionais do experimento e o mesmo valor inicial de nível observado na planta.

A Figura 17 apresenta a comparação entre a resposta experimental e a resposta obtida pelo modelo matemático. A curva contínua em azul trata-se dos dados de leitura do sensor e a curva em laranja tracejado trata-se da resposta do modelo simulado. Observa-se que ambas as curvas apresentam comportamento semelhante ao longo do período analisado, indicando que o modelo obtido é capaz de representar adequadamente a dinâmica do processo.

Figura 17 – Comparação entre a resposta experimental e a resposta simulada do modelo.



Fonte: Autoria própria.

Para avaliar quantitativamente a capacidade do modelo em reproduzir a dinâmica observada na planta real, foram calculados indicadores estatísticos de erro entre os dados experimentais e a resposta obtida pelo simulador. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Métricas de desempenho do modelo durante a validação experimental.

Métrica	**Valor**
MAE (*Mean Absolute Error*)	$0,00659\,\text{m}$
RMSE (*Root Mean Squared Error*)	$0,00867\,\text{m}$
R^2 (Coeficiente de Determinação)	$0,9968$

Fonte: Autoria Própria.

O MAE representa o erro médio absoluto entre os valores medidos e simulados, indicando que, ao longo de todo o experimento, o modelo apresentou um desvio médio inferior a $7\,mm$ em relação aos dados reais. Já o RMSE apresentou valor inferior a $1\,cm$, o que evidencia o baixo valor desvio entre o processo e o modelo.

O coeficiente de determinação R^2 mede a capacidade do modelo em explicar a variabilidade observada nos dados experimentais. O valor de 0,9968 indica que aproximadamente 99,68% da variação do nível observada experimentalmente é explicada pelo modelo desenvolvido.

Os resultados obtidos evidenciam que as simplificações adotadas durante a modelagem não comprometeram significativamente a representação da dinâmica do processo.

5 Considerações Finais

O presente estágio supervisionado possibilitou a aplicação prática de conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica nas áreas de controle e modelagem de processos, instrumentação eletrônica e automação industrial. As atividades desenvolvidas envolveram o estudo da planta didática de evaporação por circulação forçada, a modelagem dinâmica das variáveis de nível e temperatura, a caracterização dos principais atuadores do sistema e o desenvolvimento de um simulador computacional em *Python* para análise do comportamento dinâmico do processo.

A validação experimental realizada para a dinâmica de nível demonstrou boa concordância entre o modelo matemático e os dados obtidos na planta física, evidenciada pelos índices de desempenho obtidos, com coeficiente de determinação elevado e baixos erros de predição. Esses resultados indicam que o modelo desenvolvido é capaz de representar adequadamente o comportamento da planta na condição operacional analisada.

Embora a modelagem da dinâmica de temperatura tenha sido desenvolvida, a caracterização experimental completa dessa malha e sua implementação no simulador não puderam ser concluídas devido à indisponibilidade da bomba de recirculação, componente essencial para a operação térmica do sistema. Como trabalhos futuros, recomenda-se a restauração desse componente e a realização dos ensaios necessários para identificação dos parâmetros térmicos, permitindo a simulação da malha de temperatura.

Referências

BEQUETTE, B. W. **Process Dynamics: Modeling, Analysis, and Simulation**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998. ISBN 0133536408.

_____. **Process Control: Modeling, Design, and Simulation**. 2. ed. Hoboken, NJ: Pearson, 2023. ISBN 9780134033754.

NEWELL, R. B.; LEE, P. L. **Applied Process Control: A Case Study**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989. ISBN 0130409405.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; III, F. J. D. **Process Dynamics and Control**. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 9781119285915.

SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. **PD3-P: Manual de Instruções, Operação e Manutenção**. 3. ed. Sertãozinho, SP, 2015.

SOUZA, J. R. C. **Relatório de Estágio Supervisionado em Engenharia Elétrica**. Campina Grande, PB, 2024. Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC).