

Luiza Custódio Freitas

**Análise de Desempenho de Controladores em
uma Unidade Experimental de Tanques em
Série**

Uberlândia, MG

2025

Luiza Custódio Freitas

Análise de Desempenho de Controladores em uma Unidade Experimental de Tanques em Série

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
da Engenharia de Controle e Automação
da Universidade Federal de Uberlândia -
UFU - Campus Santa Mônica, como requisito
para a obtenção do título de Graduação em
Engenharia de Controle e Automação.

Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT

Orientadora Profa. Dra. Gabriela Vieira Lima
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Vaz da Costa

Uberlândia, MG

2025

Dedico este trabalho à minha mãe, Carlla, por ter sido a base de tudo. Desde os primeiros passos até esta conquista, foi ela quem sustentou, acreditou, investiu e preparou o caminho com amor, coragem e renúncia. Cada esforço dela está refletido aqui, e esta vitória é, antes de tudo, dela.

Em forma de homenagem, também dedico ao meu avô e padrinho, Aguiar, que teve papel importante em minha educação e com muito amor me apoiou, escutou e aconselhou durante minha formação. Embora não tenha visto este final, ele esteve presente em cada começo e permanece, silenciosamente, em tudo o que construo.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Carlla e Valdinei, por todo amor, educação, dedicação e por serem meus maiores apoiadores na vida. Ao meu irmão, Mateus, pelo companheirismo e risadas em tantos momentos importantes. Aos meus avós, Edna, Idemir, Heloiza e Aguimar, por todo o cuidado e amor incondicional. À minha família como um todo, que sempre me acompanhou com palavras de incentivo e gestos de carinho ao longo dessa jornada.

Sou grata também ao técnico Hermano, que não mediu esforços para me ajudar com a construção da bancada desse projeto. Aos meus amigos e colegas de laboratório, Vitor Henrique e Luan Rafael, pela ajuda em pontos cruciais deste trabalho. Reconheço também meus amigos de dentro e fora da faculdade que contribuíram com essa caminhada, oferecendo conselhos, força, incentivo e deixando o dia a dia mais leve.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, especialmente aos meus orientadores, Gabriela Lima e Thiago Costa, pela orientação técnica, paciência, apoio essencial para a realização deste trabalho e por serem minhas principais inspirações dentro do ambiente acadêmico.

E a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu sincero e profundo agradecimento.

“Cada segundo conta.”
(*“O Urso”*, 2022)

Resumo

A escolha adequada de estratégias de controle é fundamental para garantir a estabilidade, o desempenho e a eficiência de processos industriais. Sistemas com tanques configurados em série são amplamente utilizados em setores como químico, petroquímico e de tratamento de água, e exigem técnicas de controle precisas devido às suas características dinâmicas e acoplamento entre estágios. Neste contexto, este projeto propõe uma análise de desempenho do Controle Proporcional Integral Derivativo convencional e do Controle Preditivo Baseado em Modelo aplicados ao controle de nível do segundo tanque em uma bancada experimental composta por dois tanques em série. A bancada foi desenvolvida integralmente, incluindo estrutura física, projeto eletrônico com placa de circuito impresso e interface gráfica para monitoramento em tempo real. Além disso, as implementações embarcadas e todas as análises foram realizadas em plataformas *open source*, destacando as linguagens de programação Python e C++. O estudo visa compreender as vantagens, limitações e aplicações práticas de cada método de controle, explorando ferramentas abertas a fim de oferecer subsídios para a tomada de decisão em projetos reais de automação industrial.

Palavras-chaves: Controle de nível; Tanques em série; Controle PID; Controle Preditivo MPC; Python.

Abstract

The appropriate selection of control strategies is essential to ensure the stability, performance, and efficiency of industrial processes. Tank systems configured in series are widely used in sectors such as chemical, petrochemical, and water treatment, and require precise control techniques due to their dynamic characteristics and inter-stage coupling. In this context, this project proposes a performance analysis of conventional Proportional-Integral-Derivative Control and Model Predictive Control applied to the level control of the second tank in an experimental two-tank-in-series setup. The entire system was developed from scratch, including the physical structure, electronic design with printed circuit board, and a graphical interface for real-time monitoring. Additionally, the embedded implementations and all analyses were conducted on open-source platforms, with a particular focus on the programming languages Python and C++. The study aims to understand the advantages, limitations, and practical applications of each control method, exploring open-source tools to support decision-making in real-world industrial automation projects.

Keywords: Level control; Tanks in series; PID control; Model Predictive Control (MPC); Python.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Configuração de Tanques em Série.	21
Figura 2 – Diagramas de blocos de sistemas de controle: a. sistema em malha aberta; b. sistema em malha fechada.	24
Figura 3 – Estrutura geral do MPC.	28
Figura 4 – Módulo ESP32 DevKit.	34
Figura 5 – Pirâmide de automação industrial.	35
Figura 6 – Estrutura da bancada experimental de tanques em série.	38
Figura 7 – Instrumentação do Projeto de Dois Tanques.	39
Figura 8 – Sensor de pressão diferencial MPX5100DP.	39
Figura 9 – Sinais de saída do sensor de pressão diferencial.	40
Figura 10 – Curva de calibração do sensor diferencial.	41
Figura 11 – Bomba d’água RS-385.	42
Figura 12 – Ponte H L298N.	42
Figura 13 – Montagem inicial em protoboard para validação do circuito.	44
Figura 14 – Esquemático do circuito eletrônico.	44
Figura 15 – Layout da PCB.	45
Figura 16 – PCB construída e montada para o sistema experimental.	45
Figura 17 – Resposta do sistema em malha aberta.	46
Figura 18 – Sinais em PWM aplicados no sistema.	46
Figura 19 – Resposta em variável de desvio para o segundo degrau.	47
Figura 20 – Validação do modelo FOPDT identificado.	48
Figura 21 – Diagrama do funcionamento do algoritmo DMC implementado em Python.	51
Figura 22 – Configuração do <i>Data Source</i> Modbus TCP/IP no ScadaBR.	53
Figura 23 – Configuração dos <i>Data Points</i> no ScadaBR.	54
Figura 24 – Tela do sistema supervisório.	55
Figura 25 – Aparato experimental para controle de nível operando com supervisório ScadaBR.	56
Figura 26 – Saída do sistema com controle PID.	58
Figura 27 – Entrada do sistema com controle PID.	58
Figura 28 – Saída simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$	59
Figura 29 – Entrada simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$	60
Figura 30 – Saída simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$	61
Figura 31 – Entrada simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$	61
Figura 32 – Saída experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$	62
Figura 33 – Entrada experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$	62
Figura 34 – Saída experimental com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$	63

Figura 35 – Entrada experimental com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$	63
Figura 36 – Saída experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 3$	64
Figura 37 – Entrada experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 3$	64

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Calibração do sensor de nível.	40
Tabela 2	–	Mapeamento dos pinos do ESP32 utilizados no projeto.	43
Tabela 3	–	Métricas de desempenho dos controladores.	65

Lista de Quadros

Quadro 1 – Ficha técnica ESP32-WROOM-32 DevKit	34
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	Analog to Digital Converter (Conversor Analógico-Digital — A/D)
BLE	Bluetooth Low Energy (Bluetooth de Baixo Consumo)
BR/EDR	Basic Rate / Enhanced Data Rate (Bluetooth Clássico — Taxa Básica/Taxa Aprimorada)
CAN	Controller Area Network (Rede de Controle de Área)
CLP	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programável)
DAC	Digital to Analog Converter (Conversor Digital-Analógico — D/A)
DMC	Dynamic Matrix Control (Controle por Matriz Dinâmica)
FOPDT	First-Order Plus Dead Time (Modelo de Primeira Ordem com Tempo Morto — FODT)
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrada/Saída de Uso Geral)
HMI	Human–Machine Interface (Interface Homem–Máquina)
IAE	Integral of Absolute Error (Integral do Erro Absoluto)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IMC	Internal Model Control (Controle por Modelo Interno)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
I2C	Inter-Integrated Circuit (Barramento de Circuitos Integrados)
I2S	Integrated Interchip Sound (Som Interchip Integrado)
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
ISE	Integral of Squared Error (Integral do Erro Quadrático)
ITAE	Integral of Time-weighted Absolute Error (Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo)
LTI	Linear Time-Invariant (Linear e Invariante no Tempo — LIT)
MPC	Model Predictive Control (Controle Preditivo Baseado em Modelo)

MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de Telemetria por Fila de Mensagens)
OPC	Open Platform Communications (Comunicações de Plataforma Aberta)
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de Tubulação e Instrumentação)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
PID	Proportional Integral Derivative (Proporcional Integral Derivativo)
PWM	Pulse-Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RMT	Remote Control Peripheral (Periférico de Controle Remoto — ESP32)
RTU	Remote Terminal Unit (Unidade Terminal Remota)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de Dados)
SCL	Serial Clock Line (Linha de Clock Serial — barramento I2C)
SDA	Serial Data Line (Linha de Dados Serial — barramento I2C)
SISO	Single-Input Single-Output (Entrada Única e Saída Única)
SNMP	Simple Network Management Protocol (Protocolo Simples de Gerenciamento de Rede)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface Serial Periférica)
SRAM	Static Random Access Memory (Memória Estática de Acesso Aleatório)
TCP	Transmission Control Protocol (Protocolo de Controle de Transmissão)
UART	Universal Asynchronous Receiver–Transmitter (Receptor-Transmissor Assíncrono Universal)
ZOH	Zero-Order Hold (Retentor de Ordem Zero)

Lista de símbolos

β	Parâmetro de descarga
Δ	Operador incremento/diferença
λ	Peso do esforço de controle na função custo do MPC
π	Constante matemática pi
ρ	Densidade do fluido
τ	Constante de tempo do sistema
θ	Constante de tempo morto (<i>dead time</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativas	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivos Específicos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Tanques em Série	20
2.1.1	Modelagem do Sistema	20
2.1.2	Linearização do Modelo	22
2.2	Fundamentos de Sistemas de Controle	23
2.2.1	Sistemas de Primeira Ordem com Tempo Morto	24
2.2.2	Controle Proporcional Integral Derivativo - PID	25
2.2.3	Controle Preditivo Baseado em Modelo - MPC	27
2.2.3.1	Controle por Matriz Dinâmica - DMC	29
2.2.4	Métricas de Desempenho	31
2.3	Sistemas Embarcados	33
2.3.1	ESP32	33
2.4	Sistemas Supervisórios	35
2.4.1	ScadaBR	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	Descrição da Bancada Experimental	37
3.1.1	Instrumentação	37
3.1.1.1	Sensor de Pressão Diferencial	38
3.1.1.1.1	Calibração do Sensor	39
3.1.1.2	Atuador	41
3.1.1.3	Microcontrolador ESP32	42
3.1.2	Placa de Circuito Impresso	43
3.2	Identificação do Sistema	46
3.3	Projeto do Controle Proporcional Integral Derivativo	48
3.4	Projeto do Controle Preditivo Baseado em Modelo	49
3.5	Interface ScadaBR	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5	CONCLUSÃO	68

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70

1 Introdução

O controle automático de nível de líquidos remonta à Antiguidade. Um dos primeiros registros históricos de sistemas de realimentação data de aproximadamente 300 a.C., quando Ktesibios de Alexandria desenvolveu um relógio de água baseado no gotejamento constante de um reservatório de alimentação. Para que a taxa de gotejamento fosse mantida uniforme, era necessário estabilizar o nível do reservatório, o que foi obtido por meio de um dispositivo semelhante às válvulas de boia ainda utilizadas em caixas de descarga modernas (NISE, 2011).

Poucos anos mais tarde, Philon de Bizâncio aplicou o mesmo princípio de regulação automática no projeto de uma lâmpada a óleo. Nesse sistema, dois reservatórios eram interconectados por tubos capilares e um transportador vertical. À medida que o óleo era consumido na bandeja inferior, o ar passava a ocupar a base do transportador, permitindo a transferência de óleo do reservatório superior até que o nível inicial fosse reestabelecido. Dessa forma, obtinha-se a manutenção constante do nível do líquido de maneira autônoma (NISE, 2011).

Esses exemplos ilustram a utilização primitiva da realimentação negativa, conceito central no controle de processos. O princípio de manter uma variável de processo em torno de um valor de referência foi fundamental para o desenvolvimento de sistemas de controle mais complexos, como aqueles aplicados em tanques em série. Nesse tipo de configuração, os tanques exigem que o nível seja regulado de forma coordenada, considerando a dinâmica do sistema. Assim, desde os experimentos de Ktesibios e Philon, observa-se a evolução natural para sistemas multivariáveis e interativos, que demandam abordagens de controle mais sofisticadas.

Atualmente, os sistemas de controle de nível estão presentes em diversos setores da indústria de processos, atuando na de líquidos em reservatórios e na manutenção de concentrações químicas em tanques. Controladores clássicos, como o Proporcional Integral Derivativo (PID), são amplamente utilizados por sua simplicidade de implementação e bom desempenho na maioria dos processos industriais (OGATA, 2010). Técnicas de controle avançadas também têm ganhado relevância nos estudos e aplicações práticas por sua capacidade de tratar sistemas com dinâmica complexa, múltiplas variáveis e restrições operacionais. Entre essas técnicas, o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC – *Model Predictive Control*) se destaca por utilizar um modelo explícito da planta para prever seu comportamento futuro e otimizar, a cada instante, a ação de controle (QIN; BADGWELL, 2003; CAMACHO; BORDONS, 2013).

Na literatura, o arranjo de dois tanques em série tem sido amplamente empregado

como plataforma experimental e didática para a avaliação de diferentes estratégias de controle, permitindo desde a aplicação de técnicas convencionais até métodos mais avançados ou robustos capazes de lidar com a dinâmica do processo. Nesse contexto, [Silva e Prado \(2013\)](#) demonstram a aplicação de abordagens de controle robusto nesse tipo de sistema, utilizando o PID como referência comparativa de desempenho. Isso reforça a relevância do arranjo de dois tanques como modelo para estudos experimentais e validação de diferentes metodologias de controle em ambiente real.

Já o estudo de [Bagni et al. \(2018\)](#) aplica diretamente o MPC a uma simulação de dois tanques em série, analisando desde a modelagem matemática até a seleção dos parâmetros. Nesse trabalho, o PID também é empregado, permitindo avaliar de forma consistente as diferenças obtidas com o controlador preditivo. Os autores ressaltam que, embora a parametrização do MPC seja mais trabalhosa e menos intuitiva do que a de controladores clássicos, fator que explica sua menor utilização em ambientes industriais, a sintonia adequada proporciona desempenho superior, reforçando seu potencial como ferramenta didática e de pesquisa.

No presente trabalho, será realizada a implementação do controle PID e MPC em um sistema físico composto por dois tanques em série. O objetivo é avaliar o desempenho de ambos os controladores frente a mudanças de referência no segundo tanque e consolidar a compreensão do comportamento desses controladores em um processo real, alinhando-se às aplicações reportadas na literatura e reforçando o papel desse sistema como plataforma relevante para validação de métodos de controle.

1.1 Justificativas

O controle de processos industriais é um dos pilares da Engenharia de Controle e Automação, sendo responsável por garantir que variáveis de interesse, como temperatura, nível e vazão, mantenham-se próximas de valores desejados, mesmo diante de perturbações externas ou incertezas no modelo do sistema ([SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2010](#)). Entre as estratégias mais difundidas, destacam-se os controladores PID, amplamente utilizados devido à sua simplicidade e robustez ([OGATA, 2010](#)), e o MPC, que, embora mais complexo, oferece vantagens em termos de otimização e tratamento de restrições ([CAMACHO; BORDONS, 2013](#)).

A bancada experimental de dois tanques em série constitui um sistema de referência para estudos de controle devido a não linearidades presentes e tempo morto associado ao escoamento entre os reservatórios ([DORF; BISHOP, 2011](#)). O controle é realizado no segundo tanque, com a manipulação de uma bomba que alimenta o primeiro, caracterizando um sistema de entrada única e saída única (SISO – *Single Input Single Output*) que exige uma sintonia criteriosa dos parâmetros de controle para garantir estabilidade e desempenho.

A escolha da bancada experimental de dois tanques como objeto de estudo justifica-se por seu papel consolidado no ensino e pesquisa de controle de processos, sendo amplamente utilizada para simular comportamentos típicos de sistemas reais, como atraso de transporte, acoplamento de variáveis e dinâmicas lentas (NISE, 2011). Tais características permitem que o aluno ou pesquisador experimente, de forma segura e controlada, desafios semelhantes aos encontrados na indústria.

A aplicação de controladores PID e MPC nesse tipo de bancada é relevante em três dimensões. Primeiramente, no âmbito acadêmico, ela promove o entendimento profundo das diferenças conceituais e práticas entre métodos clássicos e modernos, auxiliando na formação de engenheiros capazes de selecionar a estratégia de controle mais adequada ao contexto (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010). Em segundo lugar, no âmbito industrial, contribui para decisões técnicas que afetam diretamente a eficiência energética, a qualidade do produto e a segurança operacional. Por fim, no âmbito tecnológico, demonstra a viabilidade de implementar tais estratégias em ambientes *open source*, como o Python, reduzindo custos e aumentando a acessibilidade a soluções de automação (SciPy Developers, 2023).

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a implementação dos controladores PID convencional e Preditivo baseado em Modelo MPC aplicados ao controle de nível do segundo tanque em uma bancada experimental com dois tanques em série e uma posterior análise de desempenho dos dois.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Projetar e construir uma bancada didática experimental com dois tanques em série, incluindo o projeto e a montagem da estrutura física do sistema;
- Desenvolver o sistema de automação utilizando o microcontrolador ESP32, integrando uma placa de circuito impresso (PCB) projetada para aquisição dos dados de nível d'água e manipulação de vazão da bomba d'água;
- Implementar os controladores PID e MPC utilizando ferramentas e bibliotecas de código aberto;
- Aplicar ambos os controladores ao segundo tanque do sistema, realizando ensaios experimentais e registrando as respostas dinâmicas do processo;
- Desenvolver um sistema supervisor com interface gráfica para monitoramento em tempo real do sistema físico;

- Analisar o desempenho dos controladores PID e MPC com base em critérios de tempo de resposta, sobressinal, métricas de erro e esforço de controle.

2 Referencial Teórico

O presente capítulo apresenta o referencial teórico utilizado no projeto de controle de tanques configurados em série. Para tal, a Seção 2.1 aborda o desenvolvimento do modelo fenomenológico do sistema de dois tanques e sua linearização em torno de um ponto de operação. Na Seção 2.2, são apresentados conceitos teóricos de controle de sistemas, aborda a formulação da função transferência em tempo contínuo com representação em primeira ordem com tempo morto, mostra os fundamentos e equações dos controladores PID e MPC, e, por fim, apresenta as principais métricas de desempenho para análise de sistemas. A Seção 2.3 apresenta características do sistema embarcado ESP32 utilizado como ferramenta de controle no projeto. Por fim, na Seção 2.4 é realizada uma revisão de conceitos relacionados aos sistemas supervisórios, abordando a plataforma de interface gráfica ScadaBr.

2.1 Tanques em Série

2.1.1 Modelagem do Sistema

O sistema de tanques em série considerado é constituído por um arranjo de dois tanques idênticos dispostos em série, com realimentação de um terceiro tanque reservatório para o primeiro. A vazão de entrada F_0 alimenta o tanque 1; a saída deste, F_1 , alimenta o tanque 2; e a saída do tanque 2, F_2 , retorna ao reservatório. Adota-se, conforme [Roffel e Betlem \(2007\)](#) a vazão de saída proporcional à raiz quadrada do nível de líquido no tanque.

O diagrama esquemático do sistema de tanques em série é mostrado na Figura 1. O modelo físico é obtido considerando o nível do segundo tanque como a variável de controle e a vazão de entrada do primeiro tanque como a variável manipulada.

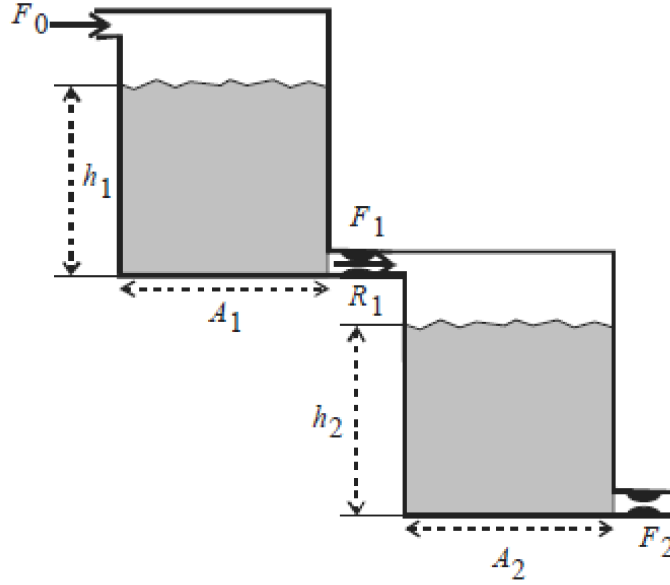
O modelo dinâmico de dois tanques pode ser obtido a partir do balanço de massa em cada reservatório. Para o primeiro tanque, considera-se que a variação de massa é igual à diferença entre a taxa de massa que entra e a taxa de massa que sai:

$$\frac{dm_1(t)}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s. \quad (2.1)$$

Como $m = \rho V$ e $V = A_1 h_1$, em que ρ é a densidade do fluido e A_1 a área da base do tanque 1, pode-se reescrever (2.1) como

$$\frac{d}{dt} (\rho A_1 h_1(t)) = \rho F_0 - \rho F_1, \quad (2.2)$$

Figura 1 – Configuração de Tanques em Série.



Fonte: Adaptado de [Roffel e Betlem \(2007\)](#).

Ao cancelar ρ em todos os termos, obtém-se

$$A_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = F_0 - F_1. \quad (2.3)$$

De forma análoga, para o segundo tanque:

$$A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = F_1 - F_2, \quad (2.4)$$

As vazões de saída F_1 e F_2 podem ser descritas pela equação de Torricelli, que considera o escoamento através de um orifício circular com diâmetro D_k :

$$F_k = C_d a_k \sqrt{2gh_k(t)}, \quad (2.5)$$

em que C_d é o coeficiente de descarga, $a_k = \frac{\pi D_k^2}{4}$ a área do orifício e $h_k(t)$ a altura do fluido no respectivo tanque.

Agrupando os parâmetros, define-se

$$\beta_k = C_d a_k \sqrt{2g}, \quad (2.6)$$

de modo que as equações (2.3) e (2.4) podem ser reescritas como

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{F_0}{A_1} - \frac{\beta_1}{A_1} \sqrt{h_1(t)}, \quad (2.7)$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{\beta_1}{A_2} \sqrt{h_1(t)} - \frac{\beta_2}{A_2} \sqrt{h_2(t)}. \quad (2.8)$$

As equações (2.7) e (2.8) constituem o modelo matemático não linear dos tanques em série, descrevendo a dinâmica dos níveis $h_1(t)$ e $h_2(t)$ em função da vazão de entrada F_0 .

2.1.2 Linearização do Modelo

A linearização de um sistema não linear por meio da série de Taylor de primeira ordem é uma prática consagrada em controle, válida em uma vizinhança do ponto de operação quando a função é continuamente diferenciável e as variações são pequenas. Isso permite empregar a ampla teoria LTI (estabilidade, controlabilidade, observabilidade, projetos clássicos e modernos, sintonia de PID) e ferramentas computacionais eficazes (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010; OGATA, 2010; NISE, 2011). Do ponto de vista de processos, essa aproximação *small-signal* fornece modelos locais adequados para análise e projeto de controladores em torno de condições normais de operação (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2010). Resultados de existência local e erros de truncamento podem ser fundamentados no tratamento de sistemas não lineares de Khalil (2002).

Escolhe-se um ponto de operação $(\bar{F}_0, \bar{h}_1, \bar{h}_2)$ tal que $\dot{h}_1 = \dot{h}_2 = 0$.

$$0 = \frac{\bar{F}_0}{A_1} - \frac{\beta_1}{A_1} \sqrt{\bar{h}_1} \Rightarrow \bar{F}_0 = \beta_1 \sqrt{\bar{h}_1}, \quad (2.9)$$

$$0 = \frac{\beta_1}{A_2} \sqrt{\bar{h}_1} - \frac{\beta_2}{A_2} \sqrt{\bar{h}_2} \Rightarrow \beta_1 \sqrt{\bar{h}_1} = \beta_2 \sqrt{\bar{h}_2}. \quad (2.10)$$

Define-se as variáveis de desvio:

$$h'_1(t) = h_1(t) - \bar{h}_1, \quad h'_2(t) = h_2(t) - \bar{h}_2, \quad F'_0(t) = F_0(t) - \bar{F}_0.$$

Escrevendo $\dot{h}_1 = f_1(h_1, F_0)$ e $\dot{h}_2 = f_2(h_1, h_2)$, e aplicando a expansão de Taylor de primeira ordem em torno do ponto $(\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{F}_0)$, obtém-se:

$$\frac{dh'_1(t)}{dt} \approx \left. \frac{\partial f_1}{\partial h_1} \right|_{\text{op}} h'_1(t) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial F_0} \right|_{\text{op}} F'_0(t), \quad (2.11)$$

$$\frac{dh'_2(t)}{dt} \approx \left. \frac{\partial f_2}{\partial h_1} \right|_{\text{op}} h'_1(t) + \left. \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \right|_{\text{op}} h'_2(t), \quad (2.12)$$

onde “op” indica avaliação no ponto de operação. As derivadas parciais são:

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial h_1} \right|_{\text{op}} = -\frac{\beta_1}{2A_1\sqrt{\bar{h}_1}}, \quad \left. \frac{\partial f_1}{\partial F_0} \right|_{\text{op}} = \frac{1}{A_1}, \quad (2.13)$$

$$\left. \frac{\partial f_2}{\partial h_1} \right|_{\text{op}} = \frac{\beta_1}{2A_2\sqrt{\bar{h}_1}}, \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \right|_{\text{op}} = -\frac{\beta_2}{2A_2\sqrt{\bar{h}_2}}. \quad (2.14)$$

Logo, o modelo linear em variáveis de desvio é apresentado da seguinte forma:

$$\frac{dh'_1}{dt} = -\frac{\beta_1}{2A_1\sqrt{\bar{h}_1}} h'_1 + \frac{1}{A_1} F'_0, \quad (2.15)$$

$$\frac{dh'_2}{dt} = \frac{\beta_1}{2A_2\sqrt{\bar{h}_1}} h'_1 - \frac{\beta_2}{2A_2\sqrt{\bar{h}_2}} h'_2. \quad (2.16)$$

2.2 Fundamentos de Sistemas de Controle

Os sistemas de controle desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e na operação de processos industriais e tecnológicos. Eles permitem que variáveis de interesse sejam mantidas dentro de faixas desejadas, garantindo estabilidade, segurança e eficiência. O estudo de sistemas de controle envolve tanto aspectos teóricos quanto práticos, abrangendo modelagem matemática, análise de estabilidade e síntese de controladores.

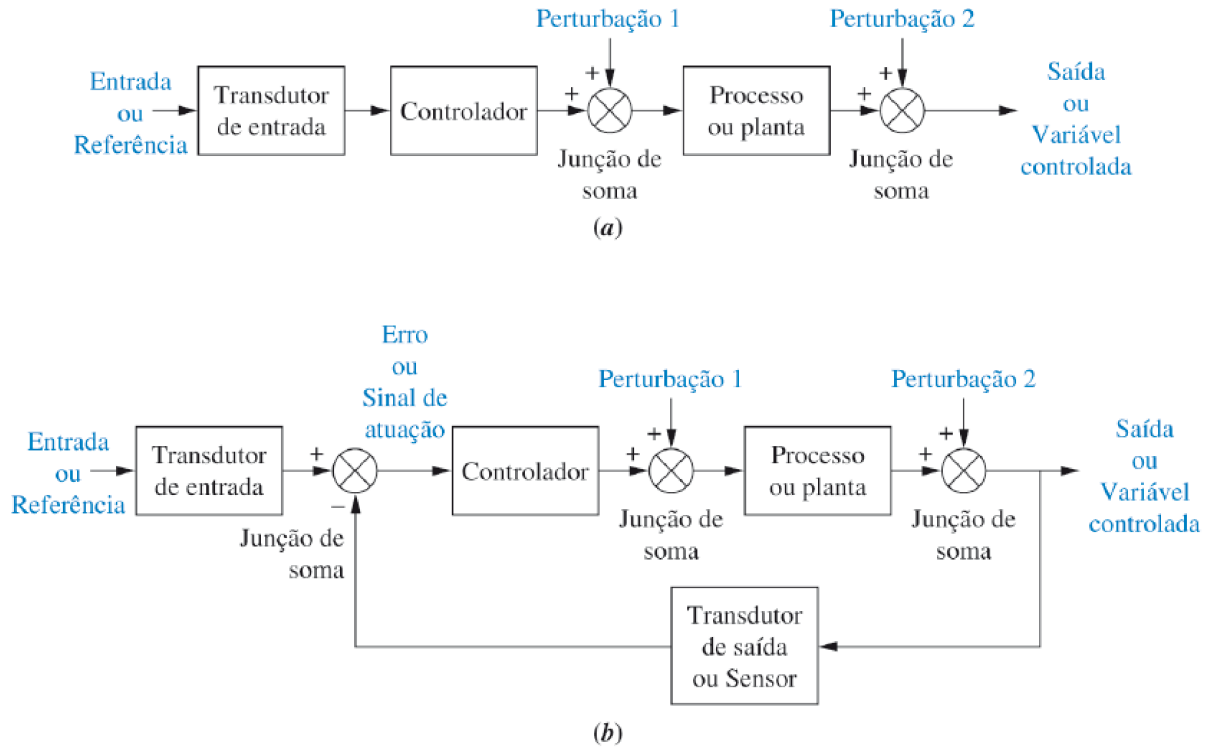
Segundo [Seborg, Edgar e Mellichamp \(2010\)](#), os sistemas de controle são essenciais para lidar com a dinâmica de processos industriais, permitindo compensar distúrbios e manter a qualidade de operação. A abordagem de controle *feedback* tem como função realimentar continuamente a saída do processo, ajustando a entrada de modo a reduzir o erro entre a variável medida e a referência desejada.

Na engenharia, é comum representar tais sistemas por meio de equações diferenciais e diagramas de blocos, que fornecem uma visão estruturada das interações entre os elementos do processo. De acordo com [Nise \(2011\)](#), o controle em malha fechada é o mais amplamente utilizado, pois garante robustez diante de incertezas e perturbações externas, diferentemente dos sistemas de malha aberta, que não possuem realimentação.

A [Figura 2](#) apresenta um diagrama genérico de um sistema de controle em malha aberta e fechada, que ilustra os principais elementos envolvidos: o processo a ser controlado, o controlador, o sensor e o sinal de referência. Esse tipo de representação é amplamente utilizado no ensino e prática da engenharia de controle.

Logo, pode-se dizer que compreender os fundamentos de sistemas de controle é essencial para projetar estratégias que assegurem desempenho adequado em aplicações industriais, laboratoriais e tecnológicas. Essa base teórica serve de suporte para estudos avançados, como controle multivariável, adaptativo e preditivo.

Figura 2 – Diagramas de blocos de sistemas de controle: a. sistema em malha aberta; b. sistema em malha fechada.



Fonte: Adaptado de Nise (2011).

2.2.1 Sistemas de Primeira Ordem com Tempo Morto

No estudo de sistemas dinâmicos, a função de transferência é uma ferramenta essencial para representar matematicamente a relação entre a entrada e a saída de um sistema linear invariante no tempo. Segundo Ogata (2010), a função de transferência é definida como a razão entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada, considerando condições iniciais nulas. Assim, para um sistema LTI, tem-se

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}, \quad (2.17)$$

em que $Y(s)$ representa a saída e $U(s)$ a entrada, ambos no domínio da transformada de Laplace.

Um dos modelos mais empregados na representação de processos industriais é o de primeira ordem com tempo morto (*First Order Plus Dead Time* — FOPDT). Esse modelo descreve adequadamente a dinâmica de muitos processos reais, combinando um comportamento de primeira ordem com um atraso puro na resposta. Sua função de transferência pode ser escrita como

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}, \quad (2.18)$$

em que K é o ganho estático do sistema, τ é a constante de tempo de resposta do sistema e θ representa o tempo morto (*dead time*), que corresponde ao atraso entre a aplicação da entrada e o início da resposta observada na saída.

O modelo FOPDT apresenta simplicidade matemática e, ao mesmo tempo, boa capacidade de representar a dinâmica de sistemas reais, sendo amplamente utilizado em identificação de processos e no projeto de controladores PID.

No caso do sistema de dois tanques, a relação dinâmica entre o nível no segundo tanque e a entrada manipulada pode ser obtida a partir do modelo linearizado em torno de um ponto de equilíbrio. A partir das equações diferenciais que descrevem o escoamento e da aplicação da transformada de Laplace, obtém-se a função de transferência que relaciona a vazão de entrada $F_0(s)$ ao nível do tanque 2, $H_2(s)$.

Embora o sistema completo seja de segunda ordem, em determinadas condições operacionais pode ser adequadamente aproximado por um modelo de primeira ordem com tempo morto. Essa simplificação preserva os aspectos dinâmicos mais relevantes, reduz a complexidade matemática e facilita tanto a análise quanto o projeto de estratégias de controle.

Na prática, a função de transferência exata de um processo raramente é conhecida. Entretanto, seus parâmetros característicos podem ser estimados experimentalmente. O método mais utilizado é o ensaio de resposta ao degrau, que possibilita determinar K , τ e θ de forma empírica, de modo que o modelo FOPDT represente de maneira aproximada a dinâmica real do sistema (NISE, 2011). Para isso, aplica-se um degrau conhecido na vazão de entrada e registra-se a resposta temporal do nível no tanque. A partir dessa curva, identificam-se o ganho estático a partir da relação entre a variação de saída e entrada, a constante de tempo a partir da forma da resposta e o tempo morto medindo-se o atraso inicial antes do início da resposta.

2.2.2 Controle Proporcional Integral Derivativo - PID

A Figura 2(b) apresenta a estrutura típica de um sistema de controle em malha fechada. Nesse arranjo, o sinal de referência é convertido pelo transdutor de entrada e comparado com a realimentação, gerando o erro aplicado ao controlador. O controlador produz então o sinal de atuação, que é enviado ao processo (ou planta) por meio do atuador. A saída do processo é medida pelo transdutor de saída, que converte a variável controlada em um sinal compatível para a realimentação.

Seborg, Edgar e Mellichamp (2010) destacam os objetivos de um sistema de controle, que podem ser resumidos em manter a variável controlada próxima ao seu valor desejado,

reduzir os efeitos de perturbações externas, melhorar o desempenho dinâmico do processo, como tempos de resposta e estabilidade.

No contexto das ações de controle, destaca-se a ação Proporcional Integral Derivativa. Nesse modelo, a ação proporcional atua diretamente sobre o erro instantâneo do sistema, produzindo uma resposta proporcional à diferença entre o valor desejado e o valor medido. A ação integral acumula o erro ao longo do tempo, permitindo a eliminação do erro em regime permanente e melhorando a precisão do controle em estado estacionário. Por fim, a ação derivativa considera a taxa de variação do erro, antecipando o comportamento futuro do sistema e contribuindo para a redução do sobretempo e para o aumento da estabilidade dinâmica.

Observa-se que o ponto de partida para a definição das ações de controle é o erro, definido por $e(t)$, sendo este a diferença entre o sinal do *setpoint*, também conhecido como referência, $r(t)$ e a saída medida da planta $y(t)$:

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (2.19)$$

A partir dessa definição do erro, apresentam-se as formulações para cada termo do controlador PID. Ogata (2010) define a ação proporcional como um amplificador de ganho ajustável, sendo expresso por:

$$u_P(t) = K_p e(t), \quad (2.20)$$

onde K_p é o ganho proporcional. Essa ação fornece uma resposta rápida às variações do erro, mas não garante a eliminação do erro em regime permanente.

Para superar essa limitação, é adicionada a ação integral, que acumula o erro ao longo do tempo, assegurando que desvios persistentes sejam corrigidos. A ação integral é definida como:

$$u_I(t) = K_p \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (2.21)$$

em que T_i é a constante de tempo integral. Quanto menor T_i , maior será a contribuição do termo integral na correção do erro acumulado.

Já a ação derivativa tem como função antecipar a tendência do erro, reagindo proporcionalmente à sua taxa de variação. Essa ação é expressa como:

$$u_D(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.22)$$

em que T_d é a constante de tempo derivativo. O termo derivativo contribui para atenuar oscilações e melhorar a estabilidade do sistema.

Por fim, Ogata (2010) define a lei de controle PID contínuo a partir da combinação das três ações de controle:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (2.23)$$

Em termos de função de transferência no domínio de Laplace, tem-se:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (2.24)$$

Assim, o termo proporcional (K_p) ajusta a intensidade da resposta ao erro instantâneo, o termo integral ($\frac{1}{T_i s}$) elimina o erro estacionário e o termo derivativo ($T_d s$) antecipa a tendência do erro, melhorando a resposta dinâmica do sistema.

Como a maioria dos sistemas de controle industriais modernos é digital, implementado em microcontroladores ou CLPs, o controlador PID precisa ser representado em sua forma discreta. Seborg, Edgar e Mellichamp (2010) apresenta duas formas amplamente utilizadas: o algoritmo de posição e o algoritmo de velocidade. Ambas descrevem o mesmo princípio de ação de controle, diferindo apenas na forma de cálculo e na conveniência computacional para sistemas digitais.

Na forma posição, o controlador calcula diretamente o valor absoluto da ação de controle a cada período de amostragem T_s . A integral é aproximada por uma soma acumulada do erro e a derivada por uma diferença entre amostras, resultando na lei:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right], \quad (2.25)$$

em que $u(k)$ e $e(k)$ representam, respectivamente, o sinal de controle e o erro no instante discreto k .

Por outro lado, a forma incremental, conhecida como algoritmo de velocidade, calcula apenas a variação da ação de controle entre instantes consecutivos. Essa formulação é mais eficiente para implementação em microcontroladores e reduz o acúmulo excessivo do termo integral. Sua expressão é dada por:

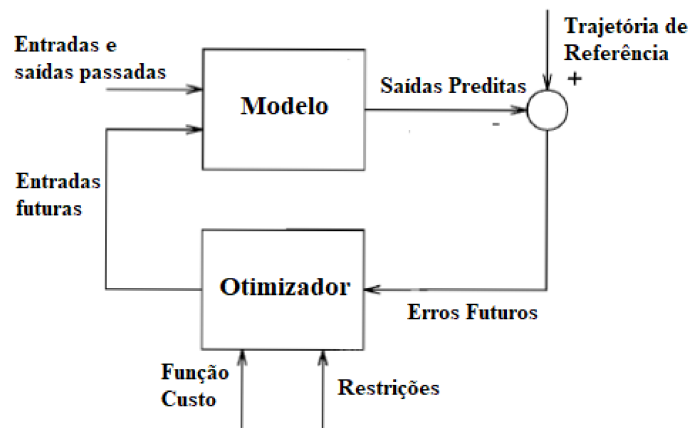
$$u(k) = u(k-1) + K_p \left[(e(k) - e(k-1)) + \frac{T_s}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \right]. \quad (2.26)$$

2.2.3 Controle Preditivo Baseado em Modelo - MPC

O Controle Preditivo baseado em Modelo é uma técnica de controle que utiliza um modelo dinâmico do processo para prever o comportamento futuro das variáveis de saída

ao longo de um horizonte de predição. Essa técnica abrange várias estratégias diferentes para obter o controle de um sistema a partir de três elementos principais: modelo de predição, função objetivo e algoritmo de otimização (CAMACHO; BORDONS, 2013). A Figura 3 ilustra essa estrutura de um controlador preditivo.

Figura 3 – Estrutura geral do MPC.



Fonte: Adaptada de Camacho e Bordons (2013).

O modelo representa matematicamente a dinâmica do processo, prevendo saídas a partir de entradas passadas e futuras do sistema. A partir dessa representação, o MPC é capaz de prever o comportamento futuro da planta dentro de um horizonte de predição, com base nas condições atuais e nas ações de controle estimadas. Essas saídas preditas são então comparadas com a trajetória de referência, que define o comportamento desejado da variável controlada ao longo do tempo.

Com base nos erros futuros gerados por essa comparação da referência com a saída predita, o bloco otimizador calcula a sequência ótima de entradas futuras que deve ser aplicada ao processo. Durante esse cálculo, o otimizador considera restrições operacionais, como limites de atuadores, taxas máximas de variação e faixas seguras de operação, assegurando que o controle seja viável fisicamente. Entre as diversas soluções possíveis, o otimizador escolhe aquela que minimiza a função objetivo. Apesar de gerar uma sequência completa de comandos futuros, apenas o primeiro valor da sequência é efetivamente aplicado, e o processo é então realimentado para uma nova iteração, característica que confere ao MPC o comportamento de horizonte móvel.

A função objetivo citada e demonstrada como uma entrada do Otimizador na Figura 3 é o critério matemático que avalia o desempenho do controlador ao penalizar simultaneamente dois aspectos: o erro de predição e o esforço de controle, associado às variações das entradas. Esses termos são ponderados por parâmetros ajustáveis que equilibram o compromisso entre rapidez da resposta e suavidade da ação de controle.

Assim, o MPC busca não apenas seguir a referência com precisão, mas também operar de forma eficiente e estável, respeitando as restrições impostas ao processo.

2.2.3.1 Controle por Matriz Dinâmica - DMC

O modelo de predição utilizado é um dos principais fatores que diferenciam as diversas estratégias de controle preditivo. O Controle por Matriz Dinâmica (DMC - *Dynamic Matrix Control*) utiliza um modelo baseado na Resposta ao Degrau Finita (FSR - *Finite Step Response*), assumindo que, após um número suficiente de amostras N , o sistema atinge o regime permanente. De acordo com Bequette (2002), o modelo preditivo pode ser expresso pela Equação (2.27).

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{N-1} s_i \Delta u(k-i) + s_N \Delta u(k-N) \quad (2.27)$$

Nessa expressão, $\hat{y}(k)$ representa a saída prevista no instante k , s_i são os coeficientes da resposta ao degrau do processo, $\Delta u(k-i)$ é o incremento de controle, e N é o número de coeficientes considerados, correspondente ao horizonte do modelo. O termo $s_N u(k-N)$ representa o efeito acumulado das ações de controle anteriores ao horizonte de predição.

A diferença entre o sinal de saída medido e o sinal previsto pelo modelo é tratada como um distúrbio aditivo $d(k)$, conforme a Equação (2.28), utilizado para corrigir a predição.

$$d(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (2.28)$$

A correção da predição é realizada pela soma desse distúrbio à saída prevista, resultando na saída corrigida $\hat{y}^c(k)$, apresentada na Equação (2.29). Essa correção compensa erros de modelagem, ruídos de medição e perturbações externas, permitindo que o modelo se mantenha ajustado ao comportamento real da planta.

$$\hat{y}^c(k) = \hat{y}(k) + d(k) \quad (2.29)$$

O modelo é então estendido para j passos à frente, conforme a Equação (2.30), permitindo a obtenção das saídas futuras corrigidas com base nas entradas incrementais e no distúrbio previsto.

$$\hat{y}^c(k+j) = \sum_{i=1}^{N-1} s_i \Delta u(k+j-i) + s_N u(k-N+j) + \hat{d}(k+j) \quad (2.30)$$

O modelo preditivo é escrito matricialmente na Equação (2.31), em que $\hat{Y}^c$ é o vetor das saídas previstas corrigidas ao longo do horizonte de predição (P), ΔU_f contém

os incrementos de controle atuais e futuros dentro do horizonte de controle (M), ΔU_p representa os incrementos de controle anteriores, U_p contém os valores passados da variável manipulada, e $\hat{d}$ corresponde às estimativas dos distúrbios aditivos.

$$\hat{Y}^c = S_f \Delta U_f + S_p \Delta U_p + s_N U_p + \hat{d} \quad (2.31)$$

A versão expandida desse modelo é apresentada na Equação (2.32), onde as matrizes S_M e S_N formam a chamada matriz dinâmica, que representa a influência das variações de controle passadas e futuras sobre as saídas previstas.

$$\begin{aligned} \hat{Y}^c = \begin{bmatrix} \hat{y}^c(k+1) \\ \hat{y}^c(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}^c(k+P) \end{bmatrix} &= S_f \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix} + S_p \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta u(k-2) \\ \vdots \\ \Delta u(k-N+2) \end{bmatrix} \\ &+ s_N \begin{bmatrix} u(k-N+1) \\ u(k-N+2) \\ \vdots \\ u(k-N+P) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{d}(k+1) \\ \hat{d}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{d}(k+P) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Considerando o vetor de referência r , define-se o vetor de erros previstos corrigidos como $E^c = r - \hat{Y}^c$. Agrupando os termos conhecidos, obtém-se o chamado erro livre E , que representa a parcela do erro independente das ações de controle futuras. Assim, o erro corrigido é reescrito de forma compacta como $E^c = E - S_f \Delta U_f$.

O problema de controle consiste em determinar a sequência de incrementos futuros de controle ΔU_f que minimiza a diferença entre a trajetória de referência e a saída prevista. Esse problema é formulado como a minimização da função custo quadrática mostrada na Equação (2.33), em que o primeiro termo penaliza o erro de rastreamento e o segundo termo, ponderado por λ , penaliza o esforço de controle.

$$J = (E^c)^T E^c + \lambda \Delta U_f^T \Delta U_f \quad (2.33)$$

Substituindo $E^c = E - S_f \Delta U_f$ na Equação (2.33), obtém-se a Equação (2.34), que expressa a função objetivo em termos das variáveis de decisão ΔU_f .

$$J = (E - S_f \Delta U_f)^T (E - S_f \Delta U_f) + \lambda \Delta U_f^T \Delta U_f \quad (2.34)$$

A minimização dessa função, para casos sem restrições, é obtida derivando-a em relação a ΔU_f e igualando o gradiente a zero, o que resulta na lei de controle ótima

dada pela Equação (2.35). Essa expressão fornece o vetor de incrementos de controle que minimiza a função custo, considerando o compromisso entre erro de rastreamento e esforço de controle.

$$\Delta U_f = (S_f^T S_f + \lambda I)^{-1} S_f^T E \quad (2.35)$$

Na implementação prática, apenas o primeiro elemento de ΔU_f é aplicado ao sistema a cada instante, sendo os demais utilizados para atualizar a predição nas iterações subsequentes, caracterizando o princípio do horizonte retrocedente.

Em aplicações reais, o problema de controle pode ainda considerar restrições físicas e de segurança operacional, como limites de saturação de atuadores e faixas seguras de operação. Essas restrições são expressas pelas Equações (2.37)–(2.38), que impõem limites aos incrementos de controle, às variáveis manipuladas e às variáveis controladas, respectivamente, ao longo do horizonte de predição.

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u_{\max}, \quad (2.36)$$

$$u_{\min} \leq u(k+i) \leq u_{\max}, \quad (2.37)$$

$$y_{\min} \leq \hat{y}^c(k+i) \leq y_{\max}, \quad i = 1, \dots, P. \quad (2.38)$$

A resolução do problema quadrático fornece a sequência ótima de ações de controle que minimiza a função custo, respeitando simultaneamente as restrições impostas. Dessa forma, o DMC combina a simplicidade de um modelo baseado em resposta ao degrau com a robustez de um otimizador quadrático, proporcionando uma estratégia eficiente, estável e adaptável a diferentes condições operacionais.

2.2.4 Métricas de Desempenho

A aplicação de controladores em um sistema com a consequente mudança de referência gera uma resposta da variável controlada, permitindo a extração de índices de desempenho, empregados na avaliação do comportamento transitório e permanente. Seguindo a teoria de [Seborg, Edgar e Mellichamp \(2010\)](#), foi possível categorizar o desempenho em termos numéricos conforme métricas referente ao tempo, oscilações e erros gerados por essa resposta controlada.

Com isso, define-se o tempo de subida t_r como o intervalo necessário para que a saída evolua de 10% a 90% de seu valor final durante a mudança de referência. Para sistemas de primeira ordem, tem-se:

$$t_r \approx \frac{2,2}{a}, \quad \text{com } a = \frac{1}{\tau} \Rightarrow t_r \approx 2,2\tau. \quad (2.39)$$

Já o tempo de acomodação t_s , corresponde ao intervalo após o qual a resposta permanece dentro de uma faixa de tolerância de $\pm 2\%$ em torno do valor final, sendo dado por:

$$t_s \approx 4\tau. \quad (2.40)$$

Outro parâmetro relevante é o *overshoot*, ou também chamado de sobressinal, que quantifica a ultrapassagem máxima da resposta em relação ao valor final. Sua definição é dada por:

$$\text{Overshoot} = \frac{y_{\max} - y_{\text{final}}}{y_{\text{final}}} \times 100 \quad (2.41)$$

Além dos parâmetros temporais, é comum empregar métricas integrativas do erro para avaliar a qualidade global da resposta. O índice ISE (*Integral of Squared Error*) penaliza erros de maior amplitude e, em sua forma discreta com N sendo o número de amostras, é representado por:

$$ISE = \sum_{k=0}^N e^2(k). \quad (2.42)$$

De forma similar, o índice IAE (*Integral of Absolute Error*) quantifica o erro acumulado durante o tempo, sendo dado por:

$$IAE = \sum_{k=0}^N |e(k)|. \quad (2.43)$$

O índice ITAE (*Integral of Time-weighted Absolute Error*) atribui pesos crescentes aos erros conforme o tempo avança, o que favorece respostas que eliminem erros persistentes. Em notação discreta, tem-se:

$$ITAE = \sum_{k=0}^N k|e(k)|. \quad (2.44)$$

Por fim, tem-se o esforço de controle, métrica utilizada para quantificar a intensidade das ações aplicadas pelo controlador ao longo do ensaio. Essa avaliação é realizada a partir da soma das variações consecutivas do sinal de controle, onde $\Delta u(k)$ representa a diferença entre dois comandos aplicados em instantes sucessivos. Assim, o esforço total aplicado pelo controlador pode ser expresso por:

$$U_{\text{esf}} = \sum_{k=1}^{N-1} |u(k+1) - u(k)|. \quad (2.45)$$

Assim, os parâmetros t_r , t_s , overshoot, ISE, IAE, ITAE e esforço de controle possuem caráter avaliativo, permitindo analisar a eficácia de estratégias de controle em relação à resposta em malha fechada. Ressalta-se que a interpretação adequada desses indicadores deve ser acompanhada da análise qualitativa dos sinais, observação de possíveis saturações de atuadores, verificação das condições experimentais e coerência física do processo.

2.3 Sistemas Embarcados

Sistemas embarcados são estruturas computacionais dedicadas, projetadas para desempenhar funções específicas em dispositivos ou ambientes maiores, com foco em eficiência, confiabilidade e desempenho sob recursos limitados (CARRO; WAGNER, 2017). Diferentemente dos sistemas de propósito geral, como computadores pessoais, esses sistemas são otimizados para executar tarefas predeterminadas de forma contínua, frequentemente com restrições em tempo real ou consumo de energia.

Segundo Carro e Wagner (2017), a visão sistêmica dos sistemas embarcados destaca a integração harmoniosa de hardware, software e interfaces com o usuário (sensores, atuadores, protocolos de comunicação etc.) dentro de um mesmo sistema. Essa integração profunda possibilita aplicação em áreas como automação industrial, veículos autônomos, dispositivos médicos, e Internet das Coisas (IoT), onde a confiabilidade e a precisão são essenciais.

Além disso, por serem compactos e específicos, estes sistemas utilizam microcontroladores com memória e poder de processamento ajustados à tarefa, resultando em um design enxuto e eficiente. Essa característica os torna ideais para operar continuamente por longos períodos, com manutenção mínima e alta estabilidade de funcionamento.

Em suma, os sistemas embarcados representam uma peça fundamental na atual infraestrutura tecnológica, pois permitem a implementação de soluções robustas, econômicas e integradas, atendendo a demandas complexas com restrições de espaço, energia e recursos computacionais.

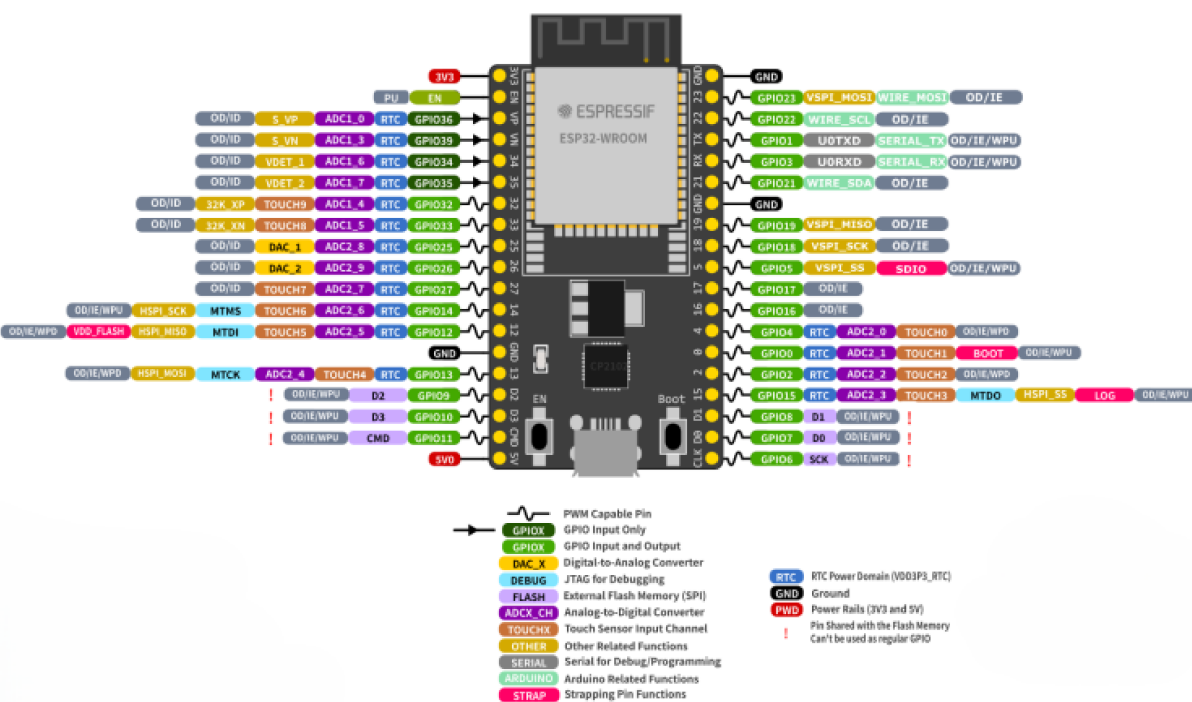
2.3.1 ESP32

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela Espressif Systems, projetado para aplicações que demandam conectividade sem fio, eficiência energética e capacidade de processamento. Segundo a Espressif Systems (2025), o dispositivo integra processadores Tensilica Xtensa LX6 dual-core de 32 bits, que podem operar com frequência de até 240 MHz, além de contar com suporte a conectividade Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) e Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE.

O módulo é amplamente utilizado em aplicações de Internet das Coisas (IoT), automação residencial e sistemas embarcados em geral, devido à sua versatilidade e grande número de interfaces de comunicação. O ESP32 destaca-se também pela disponibilidade de diversos periféricos integrados, que permitem reduzir a necessidade de componentes externos, tornando o desenvolvimento mais prático e econômico (MURTA, 2018).

Devido à sua versatilidade, o ESP32 pode ser empregado em uma variedade de cenários. O quadro 1 apresenta a ficha técnica do modelo ESP32-WROOM-32 DevKit, reunindo suas principais características de hardware. Além disso, a Figura 4 ilustra o *pinout* do módulo, essencial para o correto entendimento das conexões disponíveis no dispositivo.

Figura 4 – Módulo ESP32 DevKit.



Fonte: Adaptado de Espressif Systems (2025).

Quadro 1: Ficha técnica ESP32-WROOM-32 DevKit

Processador	Tensilica Xtensa LX6 dual-core 32 bits
Encapsulamento	Módulo WROOM-32 (38 pinos)
Frequência	Até 240 MHz
SRAM	520 KBytes
Memória Flash	Até 16 MBytes (típico: 4 MB)
Conectividade	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE
Periféricos	34 GPIOs, 12-bit SAR ADC (18 canais), 2x DAC, 3x UART, 2x I2C, 2x SPI, PWM, I2S, CAN, RMT

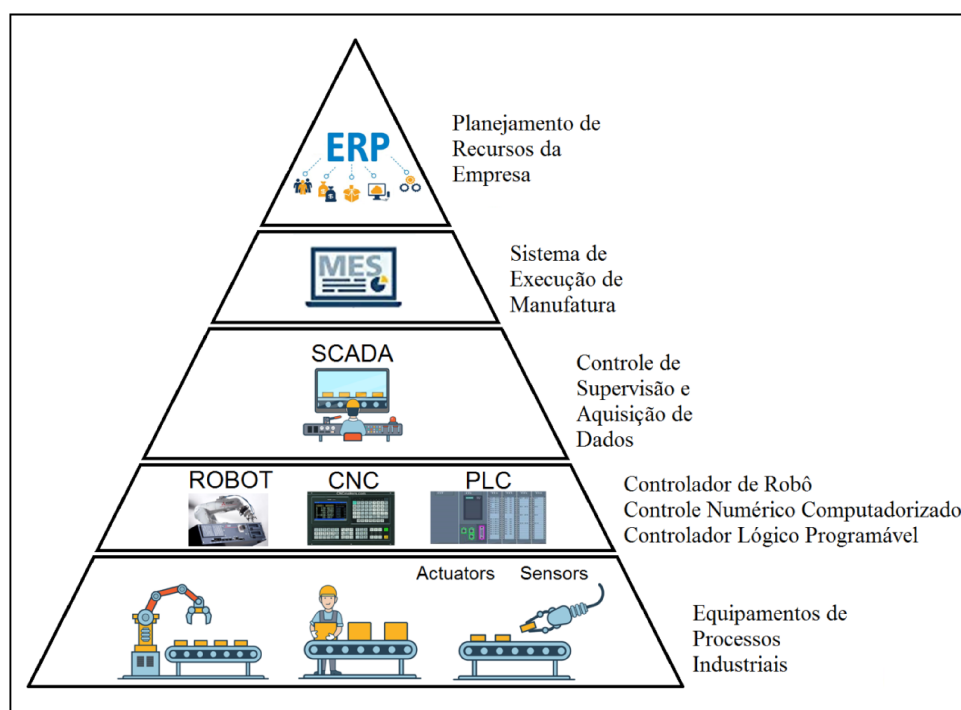
Fonte: Adaptado de Espressif Systems (2025).

2.4 Sistemas Supervisórios

Os sistemas supervisórios, conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), têm papel essencial na automação industrial moderna. Segundo [Costa \(2017\)](#), o SCADA atua como a interface entre o nível de controle (CLPs, sensores e atuadores) e os níveis de planejamento e gestão, permitindo monitorar variáveis em tempo real, armazenar históricos, gerar alarmes e possibilitar tomadas de decisão mais rápidas e eficazes.

A organização hierárquica da automação industrial é representada pela Figura 5. Nela, o SCADA se posiciona no nível de supervisão, entre os CLPs (nível de controle) e os sistemas de gestão:

Figura 5 – Pirâmide de automação industrial.



Fonte: [Quadra \(2024\)](#).

Um sistema supervisório é geralmente composto por módulos de configuração, execução e manutenção. A interface homem-máquina (HMI) apresenta telas-resumo, gráficos de tendência, alarmes e relatórios, oferecendo uma visão abrangente do processo. Além disso, a comunicação com os CLPs e sensores ocorre por protocolos industriais, como Modbus, Profibus e Ethernet/IP ([COSTA, 2017](#)).

A principal vantagem do SCADA está em sua capacidade de integrar dados de campo com sistemas corporativos, permitindo não apenas a supervisão em tempo real, mas também a análise histórica e a tomada de decisão estratégica.

2.4.1 ScadaBR

O *Supervisory Control and Data Acquisition Brazil* (ScadaBR) é um sistema supervisório de código aberto desenvolvido em Java, acessado por navegador web e compatível com diversos protocolos industriais. Seu principal objetivo é prover uma solução flexível e gratuita para supervisão e controle de processos, podendo ser utilizado em ambientes industriais, educacionais e de pesquisa ([SCadaBR, 2023](#)).

De acordo com o projeto oficial, o ScadaBR permite a criação de interfaces interativas, monitoramento em tempo real, geração de relatórios históricos, configuração de alarmes e controle remoto de dispositivos. Além disso, apresenta compatibilidade com mais de 20 protocolos de comunicação, incluindo Modbus (TCP/RTU), OPC-DA, SNMP, MQTT, entre outros, tornando-se uma alternativa viável a sistemas supervisórios proprietários ([SCadaBR, 2023](#)).

Outra vantagem significativa é sua arquitetura multiplataforma. O sistema roda sobre servidores web como Apache Tomcat, sendo compatível com sistemas operacionais Windows, Linux e outros que suportem Java. Isso garante maior portabilidade e facilidade de implementação em diferentes cenários ([SOURCEFORGE, 2022](#)).

O ScadaBR ainda conta com uma comunidade ativa que compartilha aplicações reais, isso evidencia a adaptabilidade da ferramenta em projetos de pequeno e médio porte, ao mesmo tempo em que possibilita escalabilidade em ambientes industriais mais complexos ([SCadaBR Community, 2021](#)).

Portanto, o ScadaBR representa uma solução robusta, flexível e de baixo custo, consolidando-se como uma das principais alternativas de sistema supervisório *open source* disponíveis atualmente.

3 Metodologia

Este projeto foi conduzido em quatro etapas principais, organizadas de forma sequencial e interdependente: (i) Desenvolvimento da Bancada Experimental, (ii) Implementação do Controle PID, (iii) Aplicação do Controle Preditivo Baseado em Modelo e (iv) Integração com Interface SCADA. Cada etapa contemplou atividades práticas e teóricas que visaram garantir a coerência entre o modelo matemático, a simulação computacional e o comportamento real da planta.

3.1 Descrição da Bancada Experimental

A base para todo o desenvolvimento deste trabalho envolveu a construção de uma bancada experimental que representasse de forma didática a dinâmica de um sistema hidráulico de dois tanques de mesmas dimensões interligados em série e possibilitasse a identificação do comportamento do nível do segundo tanque e consequentemente a aplicação de diferentes técnicas de controle. Para a implementação do protótipo, foi desenvolvida uma infraestrutura física que contempla desde a estrutura de suporte até os elementos de instrumentação e controle.

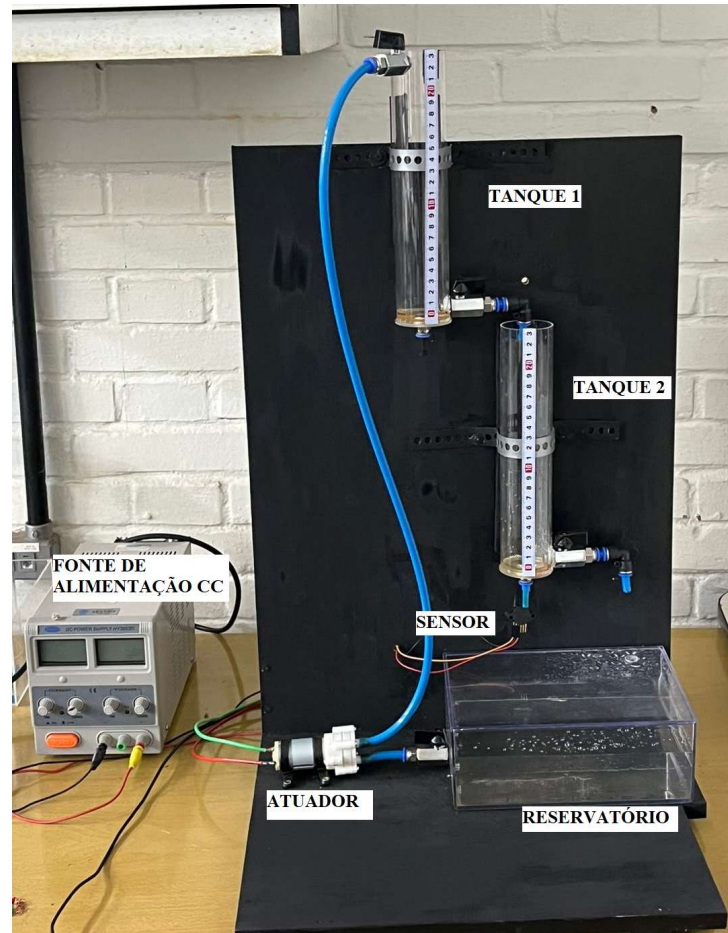
A estrutura da bancada, mostrada na Figura 6, foi confeccionada em MDF, fornecendo rigidez e estabilidade ao conjunto. Os tanques foram construídos em acrílico translúcido, utilizando um tubo cilíndrico, uma caixa e uma chapa do mesmo material, permitindo a visualização direta do comportamento dinâmico dos níveis de líquido. A configuração adotada considera três tanques: o primeiro e o segundo são responsáveis pela dinâmica do escoamento em série, enquanto o terceiro atua apenas como reservatório. A ligação entre os tanques foi realizada por meio de mangueiras pneumáticas flexíveis, que facilitam o escoamento da água, e de mini válvulas esfera de registro, que permitem ajustes manuais no fluxo, assegurando maior versatilidade na operação da planta.

3.1.1 Instrumentação

A instrumentação constitui um dos elementos centrais deste trabalho. A Figura 7 apresenta o diagrama P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*) desenvolvido inicialmente para orientar o projeto como um todo e viabilizar a montagem do sistema.

O diagrama é composto por um sensor de nível alocado no segundo tanque, responsável pela aquisição e transmissão da variável de processo para uma unidade controladora, que faz a devida regulação na vazão de entrada do primeiro tanque. Sendo assim, tem-se como instrumentos principais: um sensor, uma unidade de aquisição e

Figura 6 – Estrutura da bancada experimental de tanques em série.



Fonte: Autoria própria (2025).

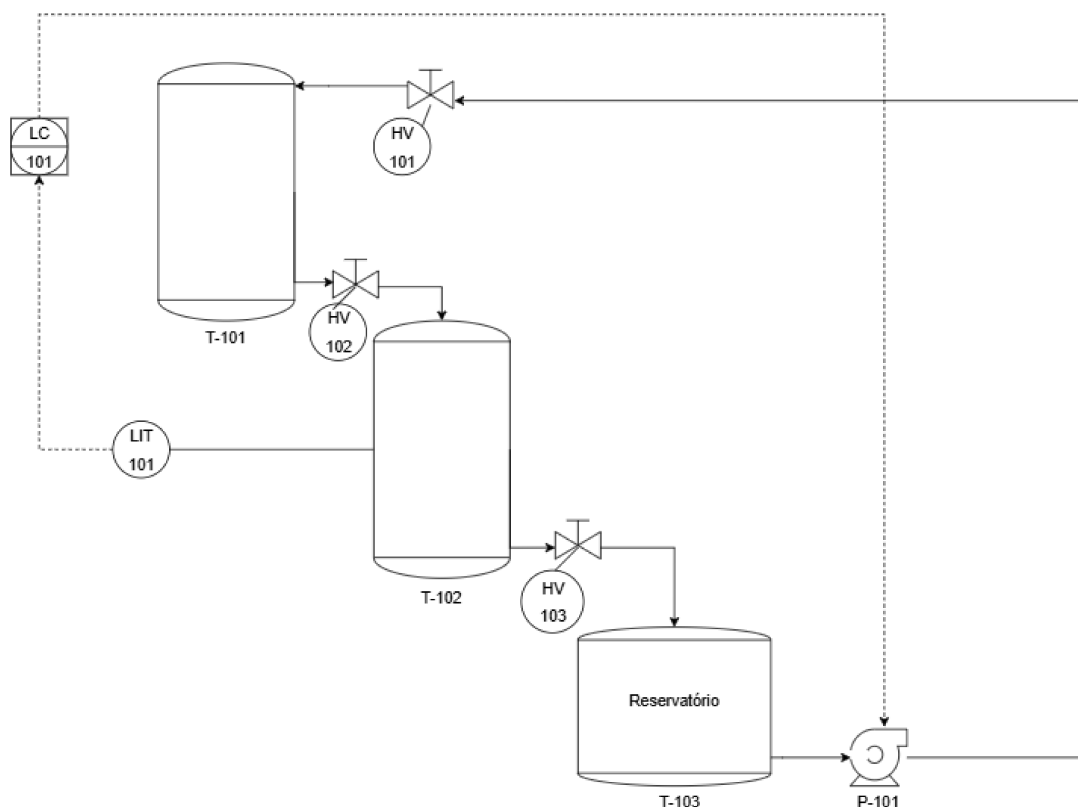
controle de dados e um atuador, que são especificados com maiores detalhes em subseções seguintes.

3.1.1.1 Sensor de Pressão Diferencial

A variável de processo de interesse neste estudo é o nível do segundo tanque, cuja medição foi realizada com o sensor de pressão diferencial MPX5100DP, mostrado na Figura 8.

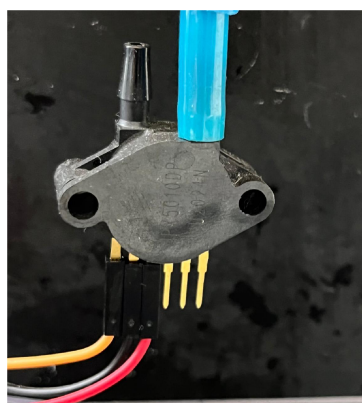
A escolha deste sensor se deve à sua boa sensibilidade e facilidade de integração em aplicações acadêmicas. Além disso, como sua saída é linear em relação à pressão, tornou-se viável estabelecer uma relação direta com a altura de líquido no tanque a partir de uma calibração.

Figura 7 – Instrumentação do Projeto de Dois Tanques.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 8 – Sensor de pressão diferencial MPX5100DP.



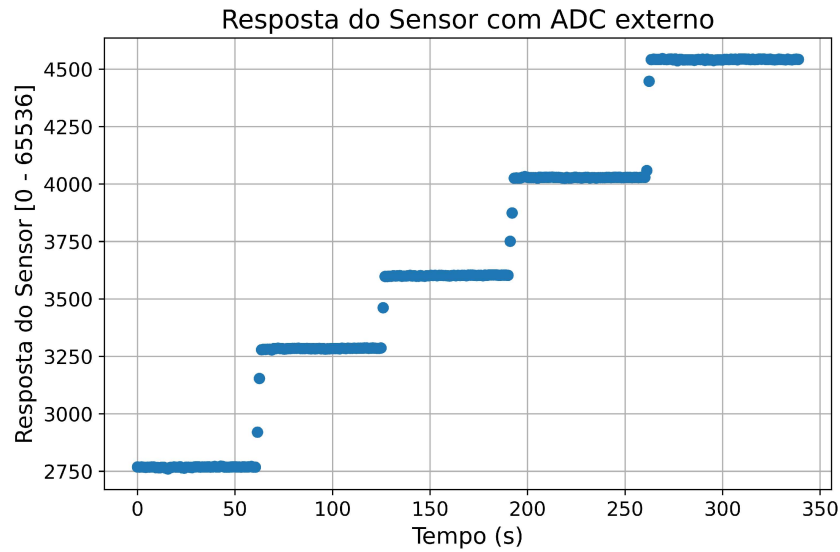
Fonte: Autoria própria (2025).

3.1.1.1.1 Calibração do Sensor

A calibração do sensor diferencial foi realizada experimentalmente, utilizando-se a variação do nível de líquido em patamares definidos e a aquisição dos sinais correspondentes de saída do transdutor. Os valores brutos foram registrados pelo microcontrolador ESP32 e posteriormente tratados no ambiente Python, onde se aplicaram rotinas de análise

estatística para cada patamar medido.

Figura 9 – Sinais de saída do sensor de pressão diferencial.



Fonte: Autoria própria (2025).

O procedimento consistiu na separação dos conjuntos de dados em torno dos valores de saída característicos de cada nível, dentro de uma faixa de tolerância estabelecida. Para cada conjunto, foram determinados a média e o desvio padrão, de modo a reduzir a influência de ruídos e oscilações. Em seguida, calculou-se o intervalo de confiança de 95%, correspondente a duas vezes o desvio padrão, o que permitiu quantificar a incerteza experimental associada às leituras.

Tabela 1 – Calibração do sensor de nível.

Nível medido (cm)	Resposta média do sensor [0–65536]
0.0	2768.0
2.5	3284.5
4.0	3602.0
6.0	4028.5
8.5	4542.5

Fonte: Autoria própria (2025).

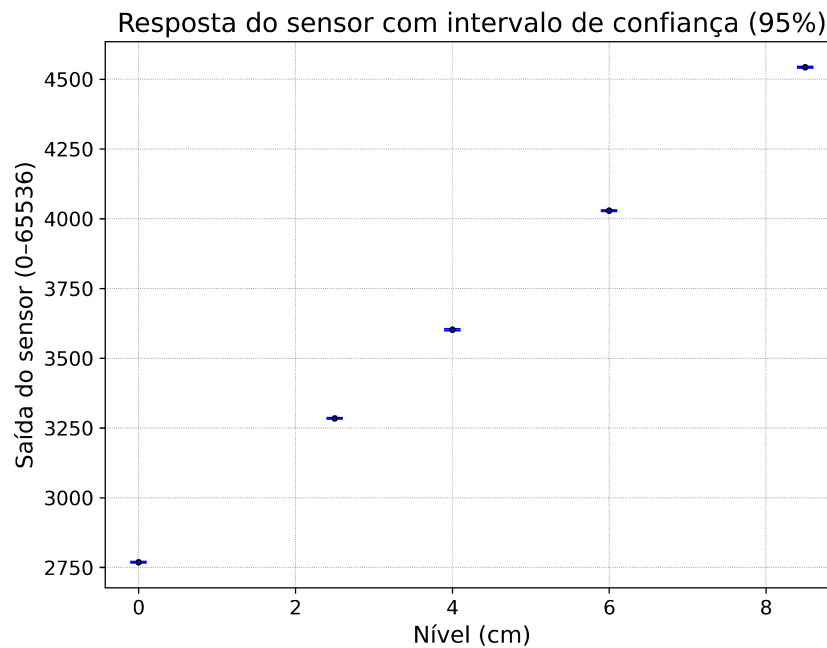
Com os valores médios de saída do sensor e as alturas de líquido observadas por meio de régua graduada, foi traçada a curva de calibração, ajustada por regressão linear do tipo $y = ax + b$. O coeficiente angular da reta (a) representa a sensibilidade do sensor em relação à variável medida, enquanto o coeficiente linear (b) corresponde ao desvio de *offset* do dispositivo. O modelo obtido foi expresso pela seguinte equação:

$$h = 0.0047 \cdot \text{adc} - 13.2156 \quad (3.1)$$

em que h é a altura de líquido no tanque (cm) e adc representa o valor digital proveniente do conversor analógico-digital.

A Figura 10 apresenta o resultado da calibração, incluindo as barras de erro obtidas a partir dos intervalos de confiança de 95%.

Figura 10 – Curva de calibração do sensor diferencial.



Fonte: Autoria própria (2025).

Esse procedimento garantiu a confiabilidade da medição de nível, possibilitando que os valores adquiridos pelo sensor fossem diretamente convertidos em altura de líquido no tanque durante a operação da planta experimental.

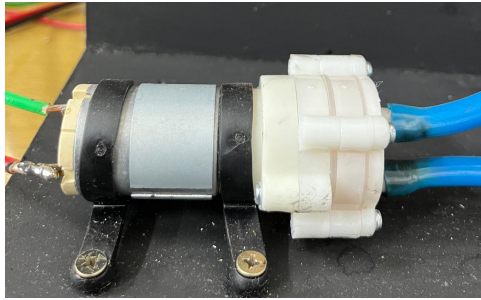
3.1.1.2 Atuador

O bombeamento da água do reservatório para o primeiro tanque é realizado pela mini bomba d'água baseada em motor de corrente contínua do tipo RS-385 da Figura 11, cujo funcionamento é especificado para 12V. Esse atuador foi escolhido por apresentar dimensões reduzidas, simplicidade construtiva e vazão compatível com a escala laboratorial da bancada.

O acionamento da bomba é intermediado por uma ponte H dupla L298N, mostrada na Figura 12, que desempenha a função de interface de potência entre o circuito de controle e o motor. A ponte recebe a alimentação de 12V proveniente da fonte de bancada e, por meio de sua arquitetura interna, regula a tensão entregue ao motor.

A ponte H possibilita o controle da velocidade de rotação do motor, uma vez que responde a sinais modulados em largura de pulso (PWM). Dessa forma, a vazão de entrada

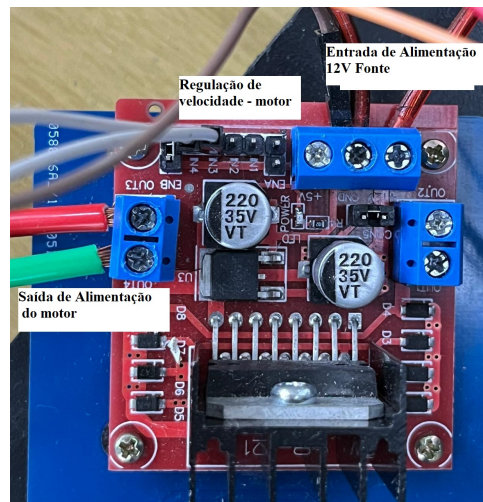
Figura 11 – Bomba d'água RS-385.



Fonte: Autoria própria (2025).

no tanque pode ser ajustada de maneira contínua, assegurando flexibilidade operacional e permitindo a implementação de diferentes estratégias de controle. A utilização da L298N é justificada não apenas por sua capacidade de fornecer a corrente necessária ao motor, mas também por sua simplicidade em acionamento de motores de corrente contínua em aplicações didáticas e experimentais de bancada.

Figura 12 – Ponte H L298N.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.1.1.3 Microcontrolador ESP32

No contexto deste projeto, o microcontrolador ESP32-DevKitC-32D, especificado na subseção 2.3.1, desempenhou a função de unidade central de processamento, integrando os elementos de instrumentação e controle da bancada experimental. Sua utilização possibilitou a leitura do nível de líquido por meio de um conversor analógico-digital externo, a atuação sobre a bomba d'água e a comunicação com o computador.

Devido às limitações conhecidas do conversor analógico-digital interno do ESP32, tais como presença de ruídos, não-linearidades e forte dependência da impedância da fonte

de sinal, optou-se pela utilização de um conversor A/D externo (ADS1115). Essa opção proporciona referência de tensão mais estável, maior resolução efetiva nas leituras e menor suscetibilidade a ruídos e variações da impedância de entrada, assegurando medições mais precisas e repetíveis, condições necessárias para o correto tratamento dos dados e aplicação da curva de calibração.

A comunicação entre o ESP32 e o ADS1115 foi implementada utilizando o protocolo I²C, que consiste em uma interface de comunicação serial síncrona, amplamente empregada em sistemas embarcados. Nesse protocolo, o ESP32 é responsável por enviar sinais de clock e requisições de leitura, enquanto o ADS1115 responde com os valores digitalizados correspondentes à tensão medida no sensor de pressão diferencial. O barramento I²C utiliza apenas duas linhas de conexão: o pino SDA, destinado à transmissão bidirecional de dados, e o pino SCL, responsável pela sincronização da comunicação. A simplicidade dessa interface, aliada à sua confiabilidade, permitiu a integração eficiente entre microcontrolador e conversor A/D, garantindo que os valores de pressão fossem disponibilizados em formato digital para posterior tratamento e aplicação da curva de calibração.

O controle do atuador foi implementado utilizando PWM, aplicadas aos pinos conectados à ponte H responsável pelo acionamento da bomba d'água. A comunicação com o computador foi realizada pela porta serial, permitindo o envio de comandos de controle e a recepção das variáveis de processo em tempo real.

A Tabela 2 apresenta o mapeamento dos pinos do ESP32 utilizados no projeto, evidenciando a integração entre hardware e software na implementação da bancada.

Tabela 2 – Mapeamento dos pinos do ESP32 utilizados no projeto.

Pino ESP32	Função	Elemento Conectado
GPIO21 (SDA)	Comunicação I ² C	ADS1115 - entrada analógica do sensor
GPIO22 (SCL)	Comunicação I ² C	ADS1115 - entrada analógica do sensor
GPIO33	Saída PWM	Ponte H IN3 – controle da bomba
GPIO32	Saída PWM	Ponte H IN4 – controle da bomba
5V / GND	Alimentação	ADS1115 e módulos auxiliares

Fonte: Autoria própria (2025).

Em suma, essa configuração permitiu que o ESP32 desempenhasse simultaneamente as funções de aquisição de dados, processamento de sinais, execução dos algoritmos de controle e transmissão de informações ao sistema supervisor.

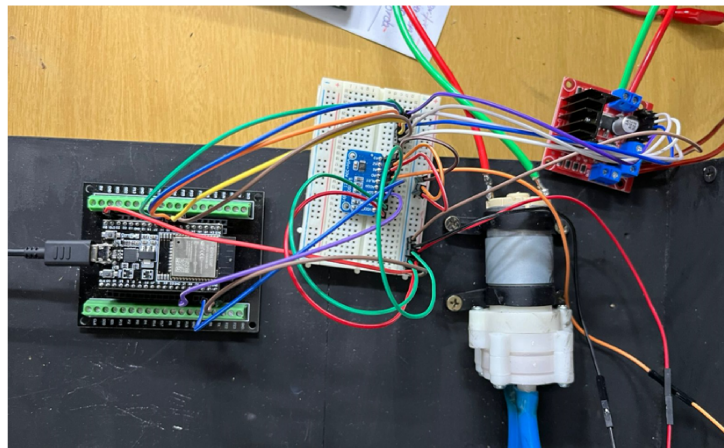
3.1.2 Placa de Circuito Impresso

O desenvolvimento da placa de circuito impresso representou a etapa de consolidação de toda a instrumentação previamente descrita. Enquanto os testes iniciais foram realizados em protoboard, com ligações provisórias entre o sensor, a ponte H, a bomba d'água e o

microcontrolador, a confecção da PCB teve como objetivo reunir esses elementos em um arranjo compacto, confiável e seguro, eliminando o excesso de fios e minimizando riscos de mau contato. Dessa forma, assegurou-se maior robustez elétrica e mecânica ao sistema, além de facilitar tanto a operação quanto a manutenção da bancada experimental.

A Figura 13 ilustra a montagem eletrônica preliminar em protoboard, utilizada para validação das conexões e testes de funcionamento do sistema.

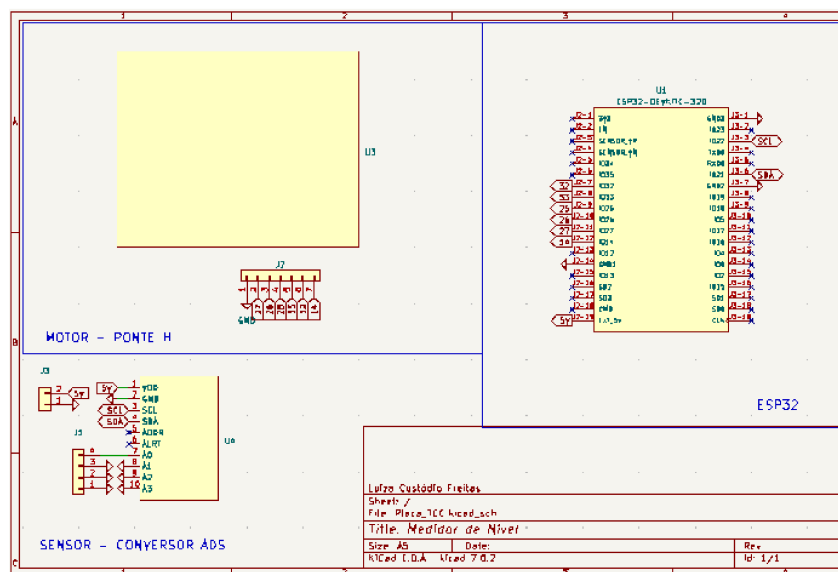
Figura 13 – Montagem inicial em protoboard para validação do circuito.



Fonte: Autoria própria (2025).

Com base nesse arranjo previamente testado, foi elaborado o esquemático da PCB, apresentado na Figura 14, no qual se observam as interligações entre o sensor diferencial, o conversor A/D externo, a ponte H e o microcontrolador.

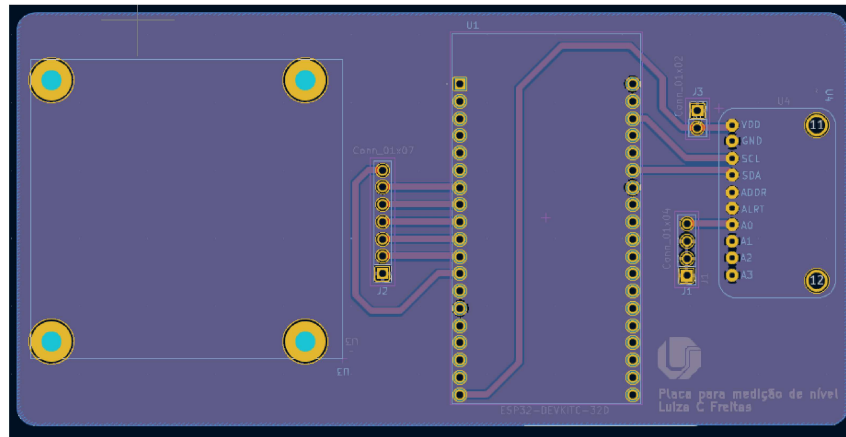
Figura 14 – Esquemático do circuito eletrônico.



Fonte: Autoria própria (2025).

No layout realizado no software KiCad e apresentado pela Figura 15, formentou-se as trilhas de sinais entre os componentes e o microcontrolador com rotas otimizadas que favorecem estabilidade e confiabilidade da aquisição de dados e um plano de terra na parte inferior da placa.

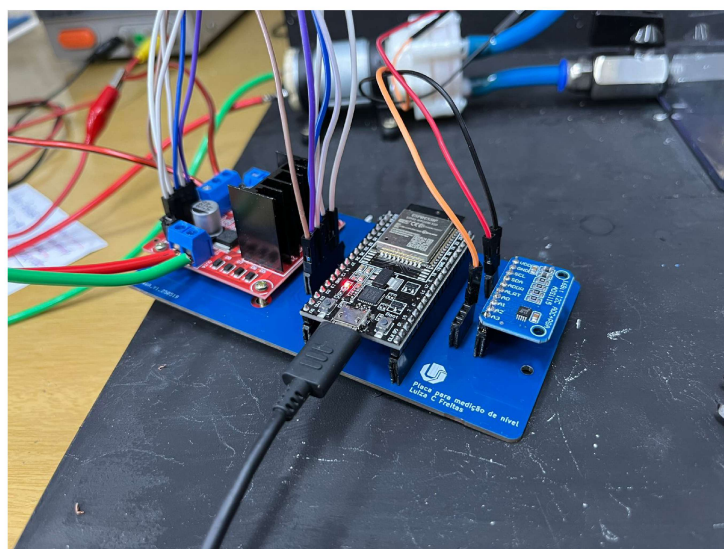
Figura 15 – Layout da PCB.



Fonte: Autoria própria (2025).

Após o projeto e fabricação, obteve-se a PCB mostrada na Figura 16, que evidencia a montagem física do sistema em um arranjo compacto e funcional. Esse resultado final integra em uma única plataforma os circuitos de aquisição, processamento e atuação, validando a transição de uma montagem experimental em protoboard para uma solução definitiva e robusta.

Figura 16 – PCB construída e montada para o sistema experimental.



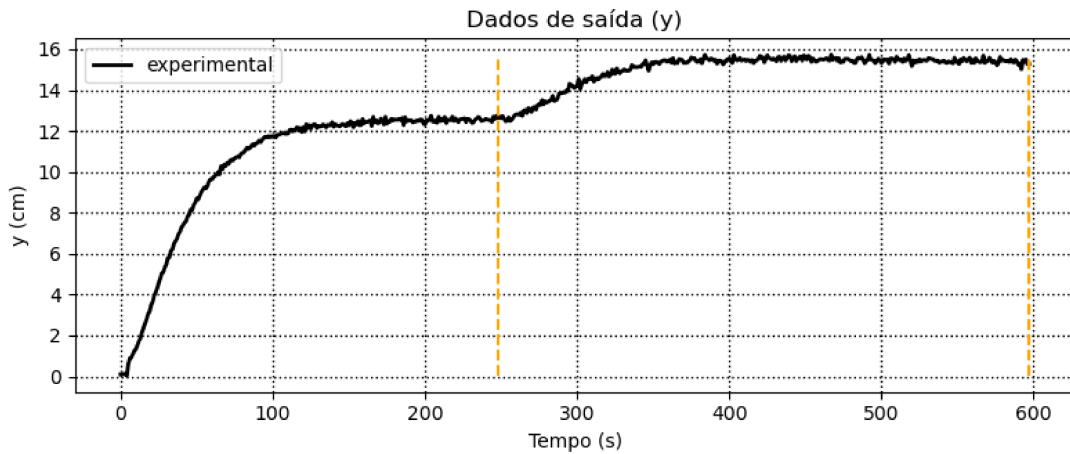
Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Identificação do Sistema

Após a conclusão da montagem e das conexões eletrônicas da bancada experimental, foram realizados ensaios em malha aberta com o objetivo de identificar o comportamento dinâmico do sistema de dois tanques. Para isso, aplicaram-se dois sinais em degrau distintos à bomba d'água, definidos por valores de PWM gerados pelo microcontrolador. O PWM utilizado possui resolução de 8 bits (0–255), o que permite expressar o acionamento da bomba diretamente em termos de *duty cycle*. Nesse contexto, o valor do primeiro degrau de 205 corresponde a aproximadamente 80% de acionamento, enquanto o do segundo degrau de 220 equivale a cerca de 86%.

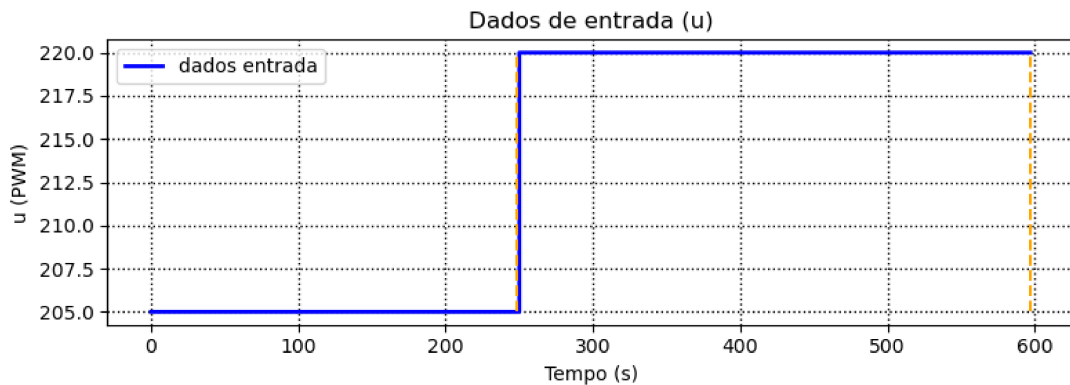
Cada degrau foi mantido por 250 s, registrando-se a resposta temporal do nível no segundo tanque ao longo dos dois ensaios. A Figura 17 apresenta o comportamento da variável de saída frente aos degraus aplicados, também ilustrados na Figura 18.

Figura 17 – Resposta do sistema em malha aberta.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 18 – Sinais em PWM aplicados no sistema.



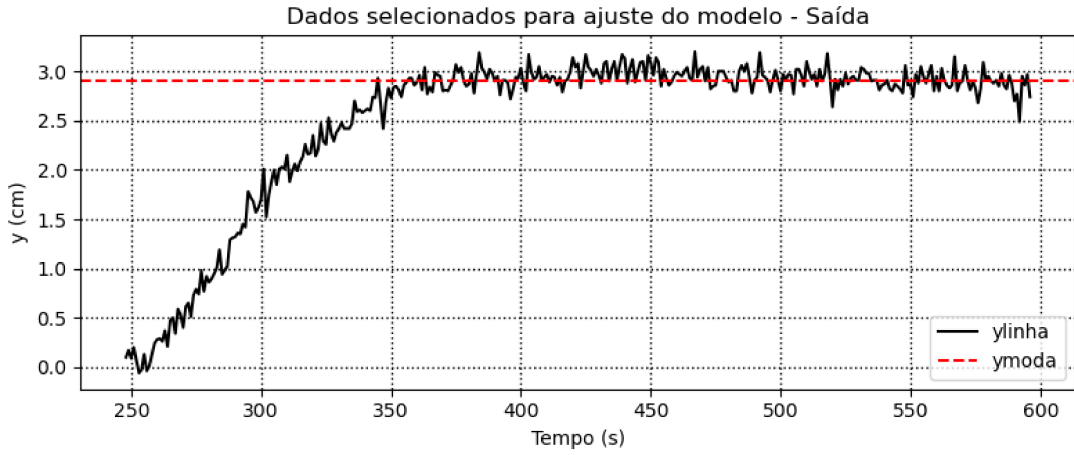
Fonte: Autoria própria (2025).

Os valores estacionários medidos em cada degrau foram:

$$y_{ss,1} = 12,53cm \quad \text{e} \quad y_{ss,2} = 15,44cm.$$

A identificação foi conduzida em variável desvio, tomando como referência o segundo ensaio e subtraindo-se o efeito estacionário do primeiro. Essa abordagem elimina as condições iniciais e concentra a análise na parcela dinâmica associada ao incremento de 15 PWM em torno do ponto de operação de 205 PWM, garantindo maior precisão na estimação dos parâmetros. A Figura 19 apresenta a resposta incremental obtida, já expressa em variáveis de desvio.

Figura 19 – Resposta em variável de desvio para o segundo degrau.



Fonte: Autoria própria (2025).

Com os dados incrementais em mãos, procedeu-se à identificação de um modelo de primeira ordem com tempo morto. A estimação dos parâmetros foi formulada como um problema de minimização do erro quadrático entre os valores experimentais $y_{\text{exp}}(t_i)$ e a resposta do modelo $y_{\text{mod}}(t_i; K, \tau, \theta)$, segundo a função objetivo:

$$J(K, \tau, \theta) = \sum_{i=1}^N [y_{\text{exp}}(t_i) - y_{\text{mod}}(t_i; K, \tau, \theta)]^2. \quad (3.2)$$

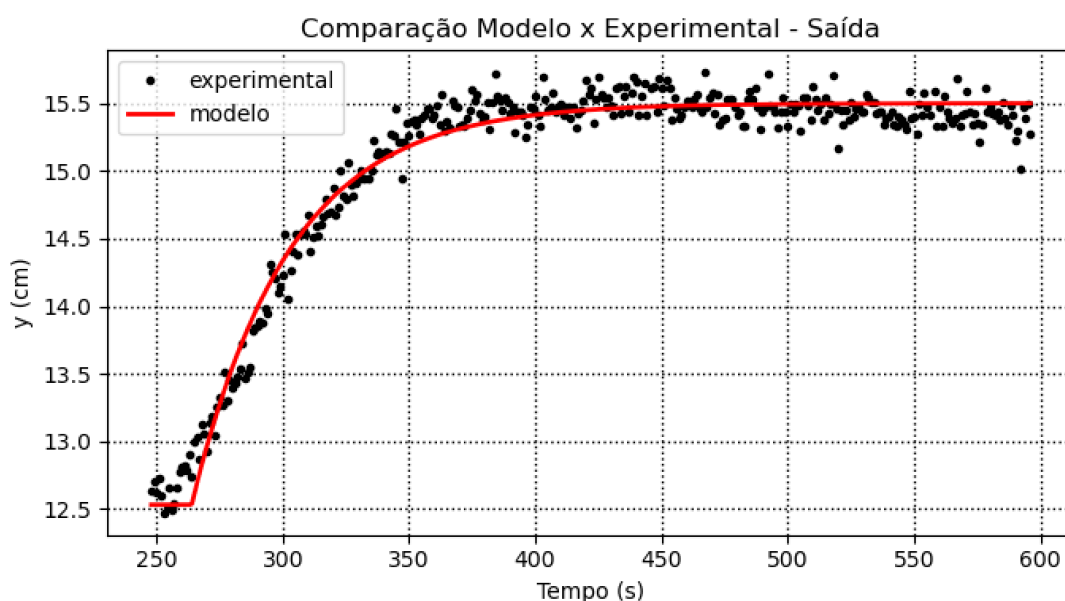
A minimização foi realizada utilizando o algoritmo `minimize`, disponível na biblioteca `scipy.optimize` da linguagem Python. Esse procedimento ajusta iterativamente os parâmetros do modelo de forma a reduzir o erro global entre os dados experimentais e a resposta simulada, proporcionando uma identificação mais robusta e menos suscetível à influência de ruídos em comparação com métodos gráficos tradicionais.

Os parâmetros identificados foram:

$$K = 0,1940, \quad \tau = 38,5462 \text{ s}, \quad \theta = 15,9158 \text{ s}.$$

Por fim, o modelo foi validado por meio da comparação entre a resposta incremental experimental e a resposta ao degrau calculada utilizando os parâmetros estimados. A Figura 20 apresenta essa comparação, evidenciando a boa aderência do modelo FOPDT identificado em relação aos dados experimentais, o que confirma sua adequação para representar a dinâmica do sistema em torno do ponto de operação adotado.

Figura 20 – Validação do modelo FOPDT identificado.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.3 Projeto do Controle Proporcional Integral Derivativo

A modelagem dinâmica aproximada do sistema utilizando a técnica da resposta ao degrau foi realizada e, assim, identificados os parâmetros de ganho, constante de tempo e atraso de cada tanque. Com isso, foram aplicadas as equações de sintonia do método de controle por modelo interno (IMC – *Internal Model Control*), conforme proposto por [Seborg, Edgar e Mellichamp \(2010\)](#).

No presente estudo, foi adotado um controlador sintonizado por IMC do tipo PI (Proporcional Integral), optando-se por anular a ação derivativa. A ação derivativa, ao responder à taxa de variação do erro, tende a amplificar o ruído e pequenas flutuações do sinal, o que é indesejável em sistemas hidráulicos de resposta lenta, onde o ganho em desempenho é mínimo e o risco de instabilidade aumenta. Assim, para processos de natureza lenta como o proposto neste trabalho, a inclusão do termo derivativo não traz benefícios significativos e pode comprometer a suavidade da resposta.

O projeto do controlador PI seguiu as equações gerais, segundo o IMC, expressas

abaixo:

$$K_c = \frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)} \quad (3.3)$$

$$\tau_I = \tau \quad (3.4)$$

em que K_c é o ganho proporcional, τ_I a constante de tempo integral, τ a constante de tempo do processo, θ o tempo morto e τ_c o parâmetro de filtro do IMC, responsável por ajustar o compromisso entre desempenho e robustez.

Seguindo a recomendação de [Seborg, Edgar e Mellichamp \(2010\)](#), adotou-se neste trabalho o valor $\tau_c = \tau/2$, de modo a proporcionar uma resposta suficientemente rápida sem comprometer a estabilidade do sistema. A partir dessa escolha, os parâmetros do controlador foram calculados como:

$$K_c = \frac{38,5462}{0,1940(\frac{38,5462}{2} + 15,9158)} = 5,6464 \quad (3.5)$$

$$\tau_I = 38,5462s \quad (3.6)$$

Assim, o controlador PI final foi expresso na forma:

$$G_c(s) = 5,6464 \left(1 + \frac{1}{38,5462s} \right) \quad (3.7)$$

Essa estrutura tende a garantir boa rejeição a perturbações e eliminação do erro em regime permanente, mantendo a estabilidade e o desempenho desejado para o sistema de dois tanques em série.

3.4 Projeto do Controle Preditivo Baseado em Modelo

Após a aplicação do controle PID e coleta de dados, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem Python para implementar também o Controle Preditivo Baseado em Modelo na bancada com dois tanques em série. Conforme explicado na Seção 2.2.3, no controle MPC um modelo matemático do sistema é utilizado para prever a evolução futura das variáveis controladas e resolver, em tempo real, um problema de otimização a cada passo de amostragem, levando em conta restrições de atuação e limites físicos do sistema.

Para alcançar tal objetivo, foram utilizados os parâmetros obtidos pela identificação do modelo FODT a partir da resposta ao degrau realizada anteriormente. Os coeficientes de ganho estático $K = 0,194$, constante de tempo $\tau = 38,546$ s e tempo morto $\theta = 15,916$ s serviram de base para a formulação do modelo discreto, utilizando o método de amostragem de ordem zero (*Zero Order Hold* — ZOH) com período de amostragem de $T_s = 1,0$ s.

Dessa forma, obteve-se a função de transferência discretizada com atraso explicitado pelo termo z^{-16} :

$$G(z) = \left(\frac{0,004968}{1 - 0,9744 z^{-1}} \right) z^{-16}. \quad (3.8)$$

A partir dessa discretização, obteve-se a sequência de coeficientes da resposta ao degrau s_i , representando o comportamento incremental da planta ao longo de N amostras. O diagrama em blocos da Figura 21 apresenta a estrutura sequencial do algoritmo de controle preditivo DMC desenvolvido em Python utilizado neste trabalho, onde, após a obtenção dos coeficientes de resposta ao degrau do modelo discreto, procedeu-se à formulação do controlador DMC, considerando um horizonte de predição P e um horizonte de controle M .

A escolha de P foi feita com o objetivo de abranger a dinâmica transitória do processo, garantindo que o produto entre o horizonte de predição e o tempo de amostragem fosse, pelo menos, igual ao tempo de acomodação do sistema, determinado a partir da resposta ao degrau em malha aberta:

$$P T_s \geq T_{\text{settling}} \quad (3.9)$$

Com base nessa análise, foi definido o horizonte de predição $P = 80$, valor suficiente para representar o comportamento dinâmico do sistema até a sua acomodação completa. Por sua vez, o horizonte de controle M foi escolhido como uma fração do horizonte de predição, de forma a balancear desempenho e esforço computacional. Assim, adotou-se:

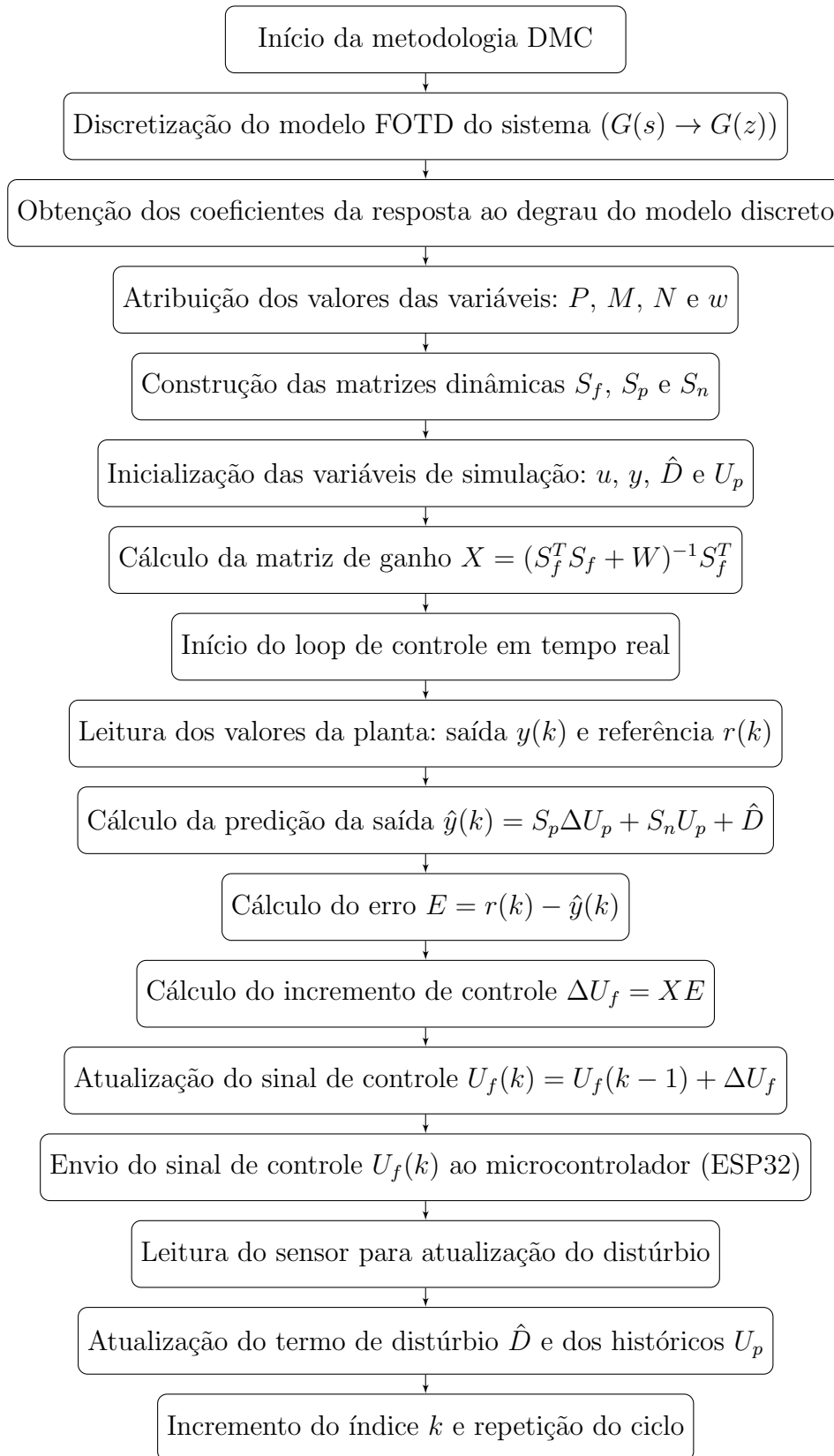
$$0,1P \leq M \leq 0,2P \quad (3.10)$$

Dessa forma, a configuração de P e M assegura que o controlador possua capacidade de antecipar a resposta do sistema e aplicar ações de controle suficientemente eficazes, sem comprometer a estabilidade nem sobrecarregar o cálculo da otimização quadrática.

A matriz de ganho $(S_f^T S_f + W)^{-1} S_f^T$ foi calculada antes da execução do laço principal de ação de controle, sendo a matriz diagonal $W = wI$ a penalização aplicada às variações de controle. O algoritmo permitiu a alteração de w entre diferentes testes experimentais, a fim de avaliar o efeito desse peso sobre a resposta do sistema.

Após essa etapa inicial, a rotina de controle é executada continuamente no loop de tempo real. Em cada iteração, os valores da planta são lidos, a saída medida $y(k)$ e a referência $r(k)$, permitindo atualizar o estado do sistema. Em seguida, o modelo preditivo calcula a saída estimada $\hat{y}(k)$ a partir das contribuições dos incrementos passados de controle, do termo estacionário associado à dinâmica do processo e do distúrbio estimado.

Figura 21 – Diagrama do funcionamento do algoritmo DMC implementado em Python.



Fonte: Autoria própria (2025).

O erro é então utilizado para determinar a sequência ótima de incrementos de controle ΔU_f , embora apenas o primeiro elemento dessa sequência seja aplicado ao atuador, conforme a estratégia de horizonte retrocedente do DMC. Após o envio do novo valor de controle ao microcontrolador, uma nova leitura do sensor é realizada para atualizar o termo de distúrbio $\hat{d}(k)$ e os históricos utilizados na predição subsequente, completando o ciclo antes do incremento do índice temporal.

Um ponto a ser observado é que DMC permite a inclusão de restrições explícitas na otimização, as quais não foram implementadas nesta etapa, pois não houve testes destinados a explorar cenários de violação de limites. Todas as análises foram conduzidas dentro de valores previamente estabelecidos como seguros, assegurando que o controlador operasse em uma faixa compatível com o comportamento hidráulico e estrutural da planta. Além disso, o foco deste primeiro momento esteve na aplicabilidade prática do controlador, buscando validar seu funcionamento em condições reais e seguras, sem a necessidade de aprofundar a formulação com restrições.

Ainda assim, visando garantir a estabilidade e a segurança operacional da unidade experimental, definiu-se uma faixa de saturação para o sinal de controle, restringindo o PWM ao intervalo entre 100 e 255. Essa escolha baseou-se nos limites físicos da planta: valores inferiores a 100 não produzem vazão devido às limitações de tensão de alimentação da bomba, enquanto valores superiores a 255 excedem a capacidade do microcontrolador. Dessa forma, assegurou-se que toda a operação permanecesse dentro da região segura prevista para o atuador e para o sistema.

3.5 Interface ScadaBR

Com o intuito de monitorar e interagir de forma dinâmica com os dados provenientes da unidade experimental de dois tanques em série desenvolvida neste projeto, foi implementado um sistema supervisório utilizando o software *open source* ScadaBR, proporcionando assim uma visão integrada e em tempo real do comportamento da planta.

O desenvolvimento do supervisório no ScadaBR abrange desde a configuração da comunicação com a placa controladora até a criação da interface gráfica interativa. O software, instalado em um servidor local, foi configurado para operar em rede com o microcontrolador ESP32, responsável também pela execução do controle PID embarcado, cujo código foi desenvolvido em C/C++ e utiliza os parâmetros de sintonia previamente definidos conforme o método IMC. A implementação do PID teve como objetivo, além do controle de nível, validar o correto funcionamento da comunicação entre o supervisório e o controlador, garantindo o envio e recebimento confiável de informações, facilitando os testes iniciais de integração do sistema. O controle realiza o ajuste automático do nível do segundo tanque com base no erro entre o valor medido e o *setpoint*, o qual pode ser

atualizado remotamente pelo supervisor.

A comunicação entre o ESP32 e o sistema SCADA foi implementada por meio do protocolo Modbus TCP/IP, amplamente utilizado pela sua robustez e simplicidade. Neste projeto, o ESP32 atua como servidor Modbus, disponibilizando as variáveis de processo por meio de registradores, enquanto o ScadaBR atua como cliente, requisitando periodicamente os dados para exibição e armazenamento. Quanto ao barramento, o tráfego de dados ocorre através de rede Wi-fi, sendo transmitidos pacotes TCP/IP contendo informações de *setpoint*, nível atual e sinal de vazão PWM da bomba d'água. Esse arranjo garante uma comunicação confiável e em tempo real entre a camada de automação e o sistema supervisor.

O primeiro passo para essa integração foi a criação de uma fonte de dados (*Data Source*) do tipo Modbus TCP/IP, na qual foram definidos o endereço IP do ESP32, a porta de comunicação e o intervalo de atualização dos dados, conforme ilustrado na [Figura 22](#).

Figura 22 – Configuração do *Data Source* Modbus TCP/IP no ScadaBR.

A imagem mostra a janela de configuração 'Propriedades do Modbus IP' do software ScadaBR. A interface é em português e contém os seguintes campos e opções:

- Nome:** esp32
- Export ID (XID):** DS_967705
- Período de atualização:** 1 segundo(s)
- Quantização:** ☐
- Timeout (ms):** 2000
- Retentativas:** 2
- Apenas quantidades contíguas:** ☐
- Criar pontos de monitor de escravo:** ☐
- Máxima contagem de leitura de bits:** 2000
- Máxima contagem de leitura de registradores:** 125
- Máxima contagem de escrita de registradores:** 120
- Tipo de transporte:** TCP
- Host:** 10.0.67.200
- Porta:** 502
- Encapsulado:** ☐
- Criar ponto monitor de conexão:** ☐
- Níveis de alarme de eventos:**
 - Exceção de data source:** Nenhum alarme
 - Exceção de leitura de data point:** Nenhum alarme
 - Exceção de escrita em data point:** Nenhum alarme

Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida, foram configurados os *Data Points*, representando as variáveis trocadas entre o controlador e o supervisor — nível do segundo tanque, *setpoint* configurável e

vazão PWM — que serviram de base para a visualização das grandezas do processo e para o controle remoto via interface gráfica, conforme apresentado na [Figura 23](#).

Figura 23 – Configuração dos *Data Points* no ScadaBR.



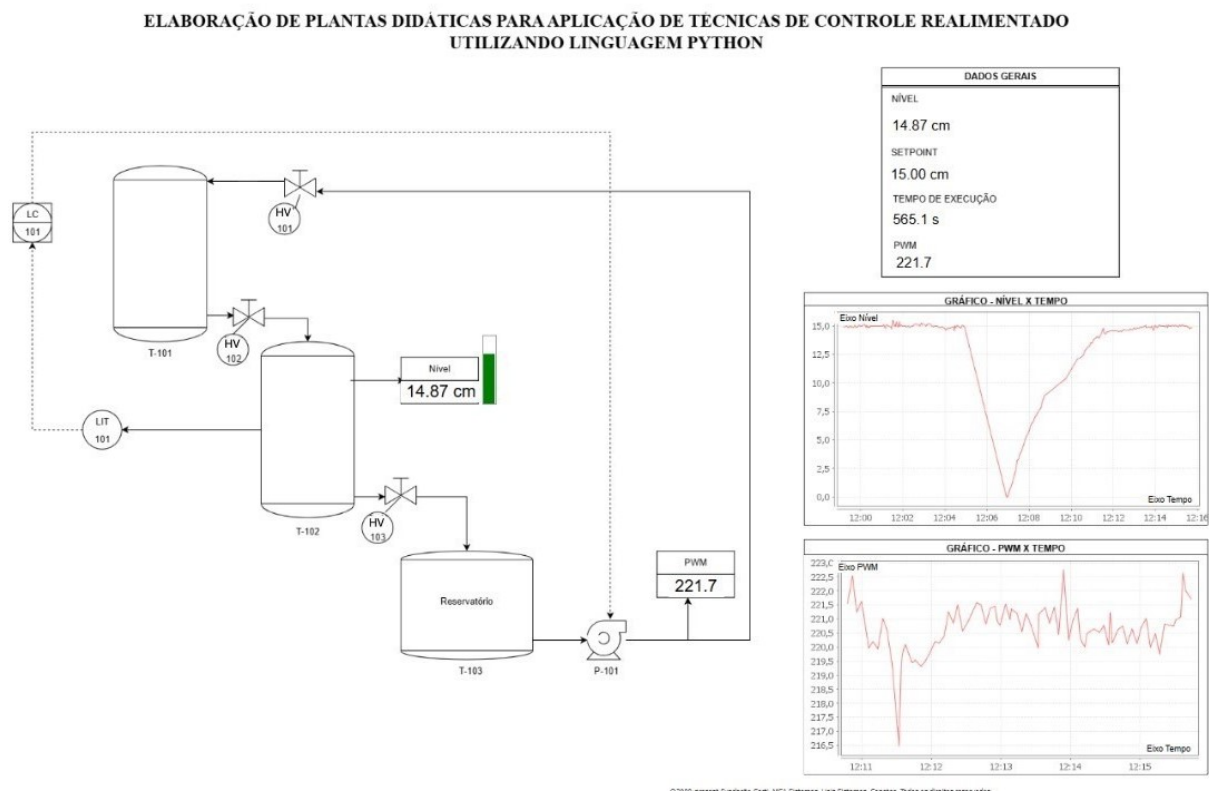
Nome	Tipo de dado	Status	Escravo	Faixa	Offset (baseado em 0)
nivel	Numérico		1	Registrador holding 0	
pwm	Numérico		1	Registrador holding 2	
set_point	Numérico		1	Registrador holding 4	
tempo_exec	Numérico		1	Registrador holding 6	

Fonte: Autoria própria (2025).

A próxima etapa consistiu na criação da visualização gráfica, uma tela interativa baseada no diagrama P&ID da unidade, incluindo elementos como tanques, válvulas, sensor e atuador. Cada componente foi associado aos respectivos *Data Points*, permitindo ao operador visualizar o nível do tanque e o sinal de controle em tempo real. Além disso, foram implementados gráficos de tendência temporal para acompanhamento dinâmico das variáveis críticas, como nível e vazão PWM, conforme apresentado na [Figura 24](#).

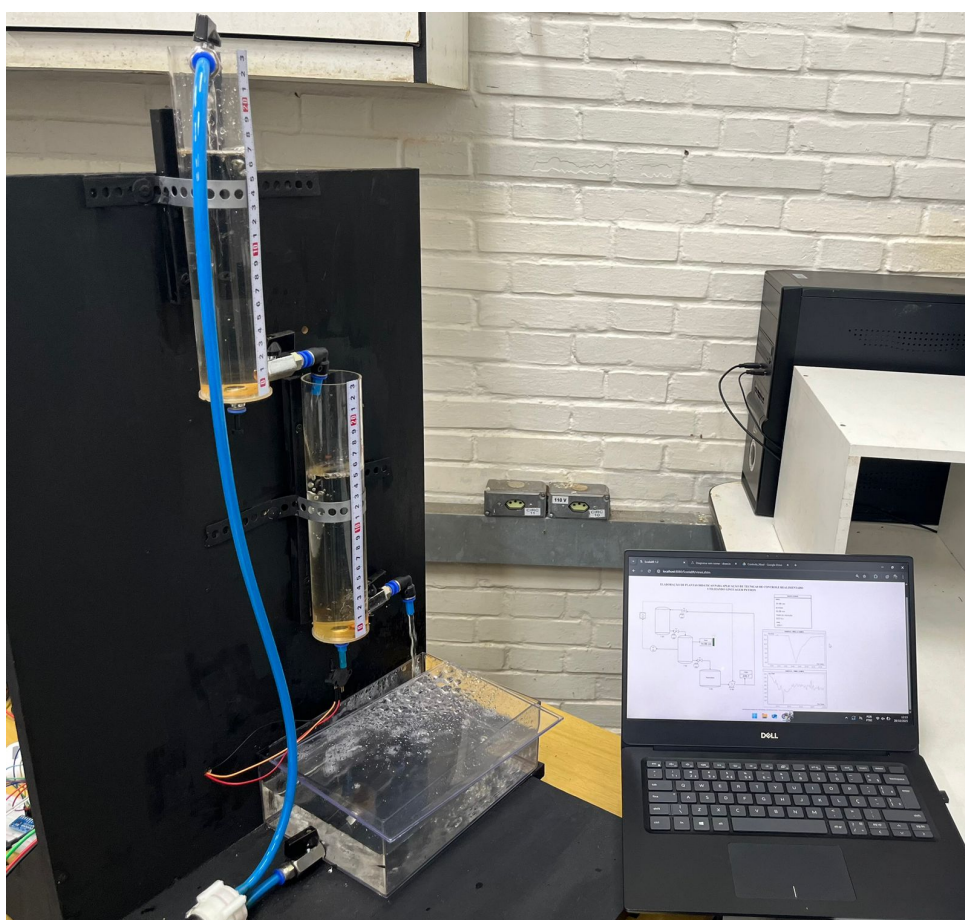
Após a implementação completa, o sistema foi submetido a testes de comunicação, atualização de dados, resposta de controle e confiabilidade do registro histórico. Foram avaliados o tempo de resposta entre o envio e a leitura dos comandos, a estabilidade da conexão Modbus e a precisão dos valores exibidos no supervisão. O ScadaBR demonstrou desempenho satisfatório, com atualização rápida e operação estável durante todo o período de testes, como pode ser observado na [Figura 25](#).

Figura 24 – Tela do sistema supervisório.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25 – Aparato experimental para controle de nível operando com supervisor ScadaBR.



Fonte: Autoria própria (2025).

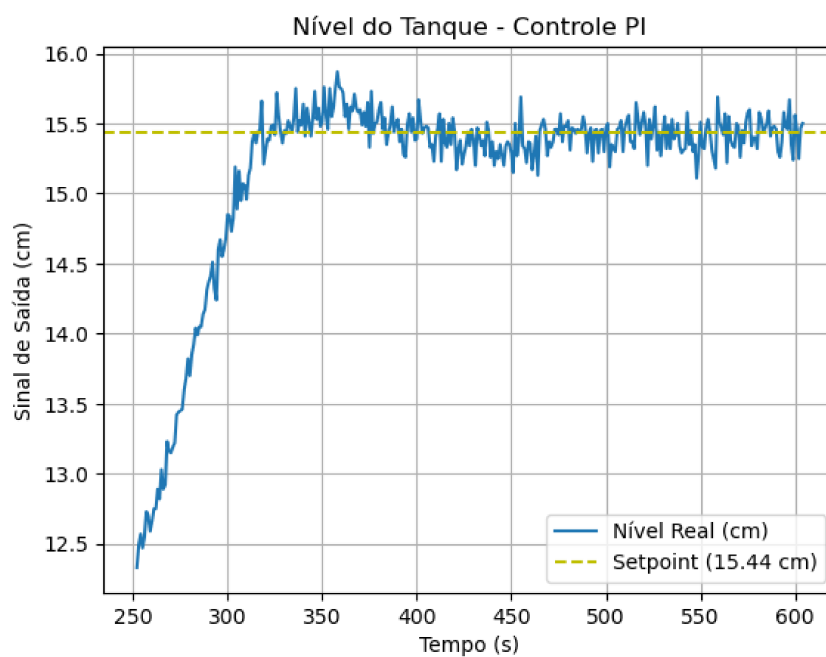
4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação das diferentes estratégias de controle na unidade experimental de dois tanques em série. O objetivo principal desta etapa é avaliar o comportamento dinâmico do sistema a fim de estudar diferentes configurações de controle e validar o uso da unidade experimental como sistema didático aplicável. Durante o período em que os testes eram realizados, o sistema supervisorio em ScadaBR também estava em desenvolvimento, motivo pelo qual não foi empregado como ferramenta de aquisição de dados nesta fase. Optou-se pela coleta direta via microcontrolador, que assegurou sincronização precisa com o ciclo de controle e maior confiabilidade temporal para as análises. Ainda assim, o supervisorio permanece plenamente funcional e poderá ser integrado em trabalhos futuros para coleta de dados da planta.

Em primeiro momento, o controle PID foi implementado de forma embarcada no microcontrolador ESP32, onde foi aplicado um degrau em malha aberta até aproximadamente 180 s, com o objetivo de observar a resposta natural do sistema. Em seguida, o controle foi ativado para manter o nível do segundo tanque no primeiro ponto de referência, de aproximadamente 12,53 cm, até 250 s. A partir desse instante, o *setpoint* foi alterado para 15,44 cm, de modo a avaliar o desempenho transitório e estacionário do controlador. Os resultados foram coletados via serial e tratados em Python para análise qualitativa e quantitativa do sistema controlado.

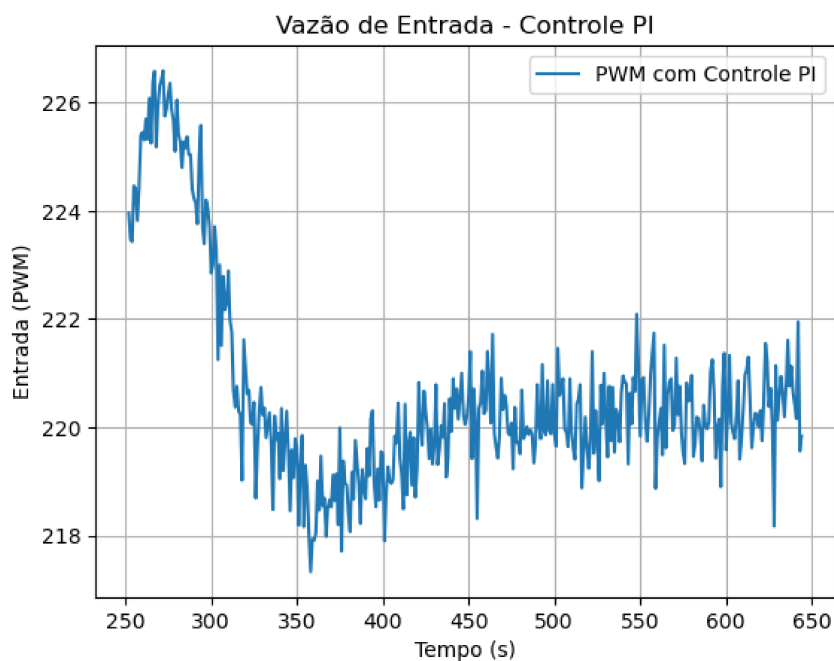
A Figura 26 mostra a resposta experimental obtida do nível do segundo tanque, e é possível também observar na Figura 27 o comportamento da entrada em PWM sendo controlada a cada amostra de 1 s.

Figura 26 – Saída do sistema com controle PID.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 27 – Entrada do sistema com controle PID.



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise qualitativa indica que o controlador PID foi capaz de realizar a transição de referência e estabilizar o nível do segundo tanque com bom desempenho, apresentando

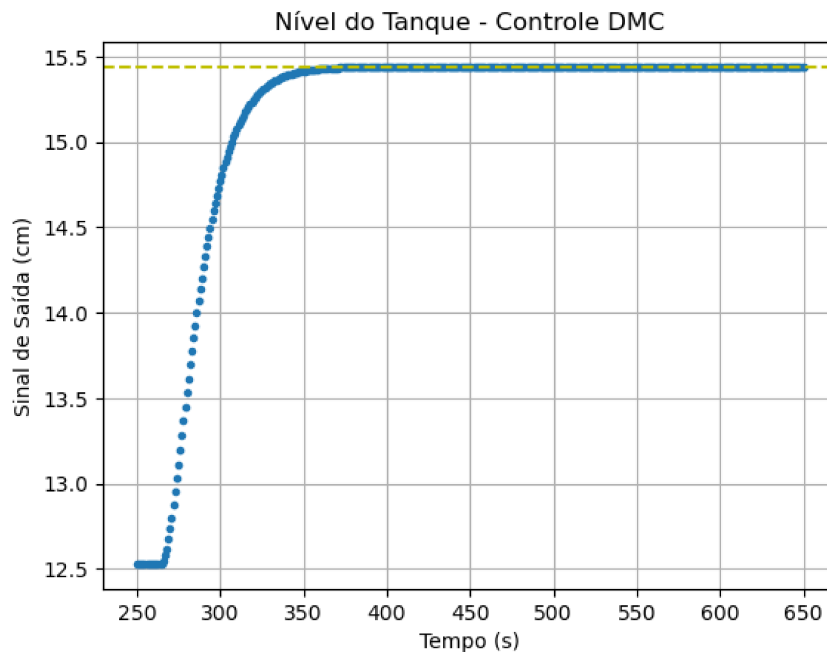
resposta rápida e erro estacionário reduzido. Entretanto, é possível notar a presença de um pequeno sobressinal na transição de referência.

Assim como o processo de controle no PID, o laço principal de controle DMC foi iniciado após a estabilização do nível no primeiro degrau em 180 s com posterior mudança de setpoint em 250 s. Todo o desenvolvimento, a implementação do controlador e o tratamento dos dados foram conduzidos em ambiente Python, utilizando um horizonte de predição fixo de $P = 80$ e dois horizontes de controle previamente definidos, $M = 8$ e $M = 16$.

A primeira etapa do desenvolvimento do controle DMC consistiu na realização de simulações em Python, com o objetivo de validar o comportamento do algoritmo e avaliar o impacto de diferentes configurações de parâmetros de forma segura e sistemática. Esse procedimento permitiu evitar testes diretos iniciais sobre a planta real e possibilitou analisar, de maneira estruturada, a influência das diversas combinações de parâmetros antes da aplicação experimental.

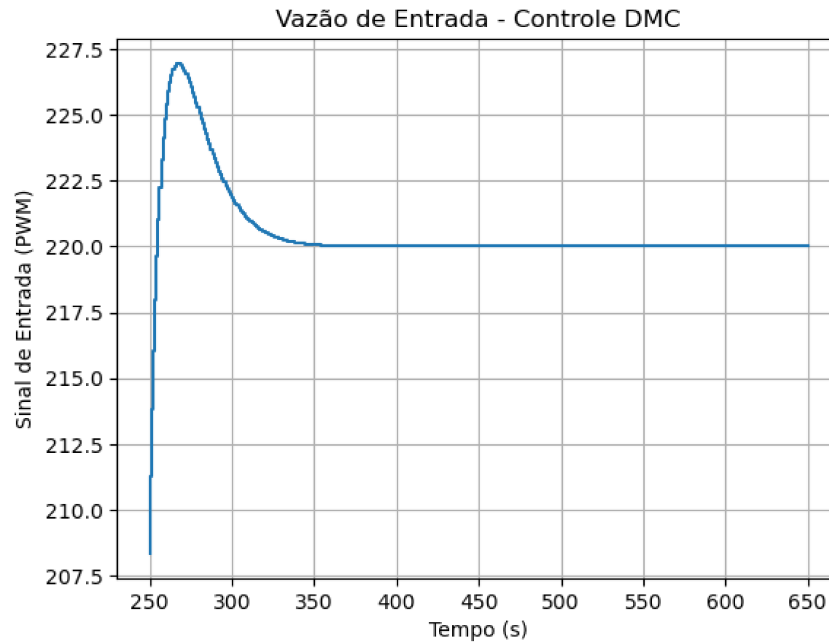
A Figura 28 apresenta a resposta simulada do sistema controlado pelo DMC na primeira configuração, com $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$. Observa-se uma resposta rápida e bem ajustada à referência, com valores nulos para erro estacionário e *overshoot*. Enquanto a Figura 29 mostra a variável manipulada correspondente, nota-se que o controle atua de forma estável, com pequenas variações de comando para manter o nível na referência.

Figura 28 – Saída simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$.



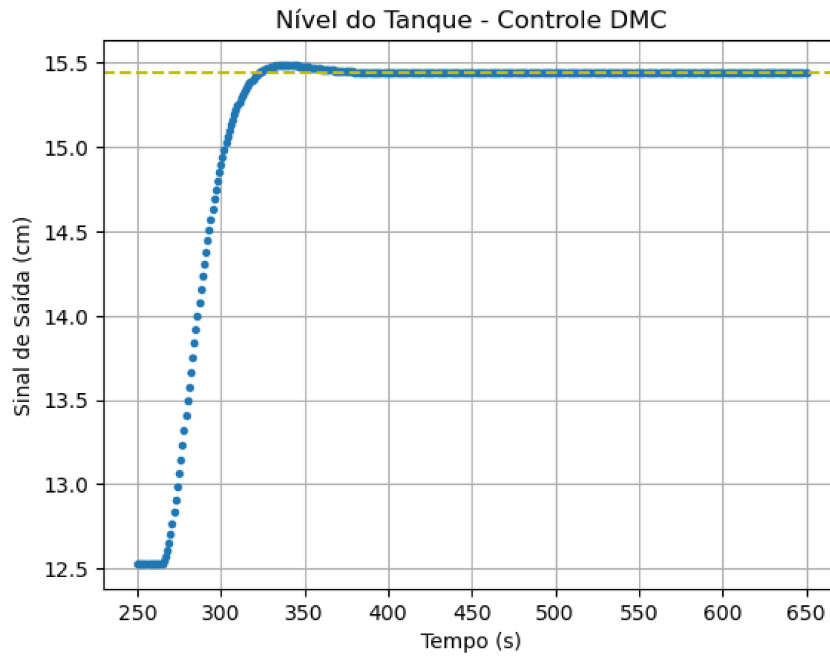
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29 – Entrada simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$.

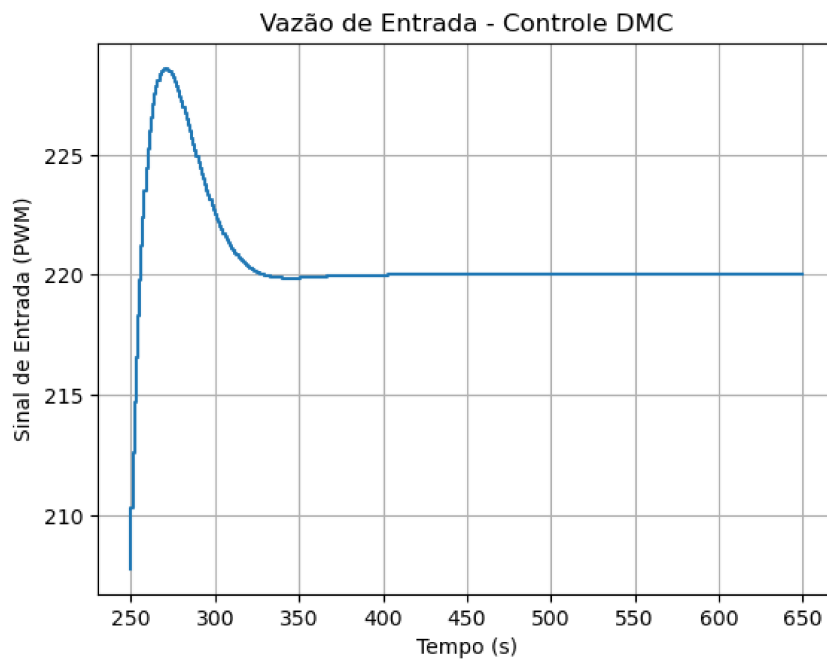


Fonte: Autoria própria (2025).

Agora, a Figura 30 mostra o comportamento do sistema para a segunda configuração simulada, com aumento do horizonte de controle para $M = 16$, mantendo o mesmo peso $w = 1$. Nota-se um menor tempo de subida, porém com maior *overshoot* e oscilação no regime permanente, que afeta diretamente no aumento do tempo de acomodação. A Figura 31 apresenta o respectivo sinal de controle, onde se observa que o aumento do horizonte M aumenta a variação da entrada, tornando o controle mais agressivo.

Figura 30 – Saída simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$.

Fonte: Autoria própria (2025).

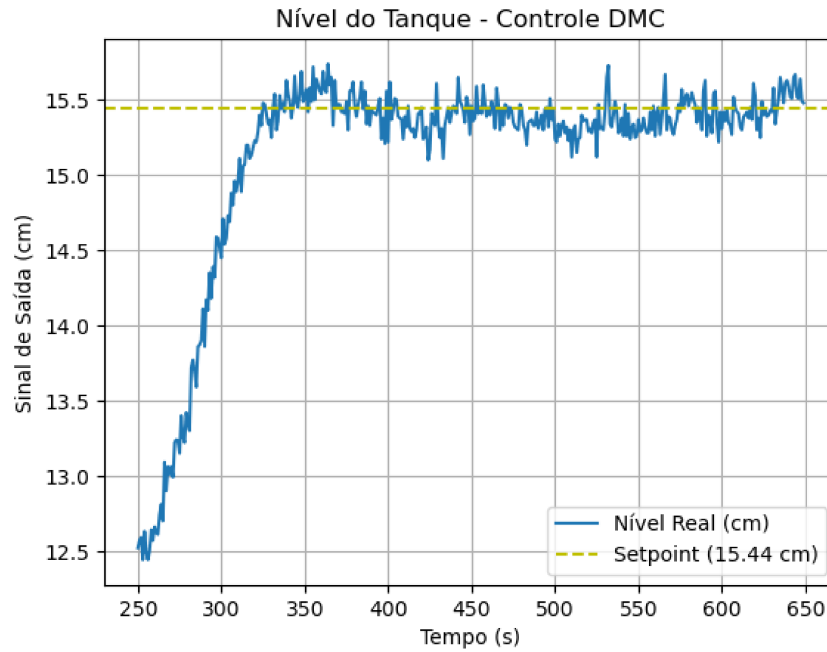
Figura 31 – Entrada simulada do sistema com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$.

Fonte: Autoria própria (2025).

As respostas experimentais obtidas com cada configuração são apresentadas nas Figuras 32 a 35. De modo geral, observa-se boa coerência entre os resultados simulados e

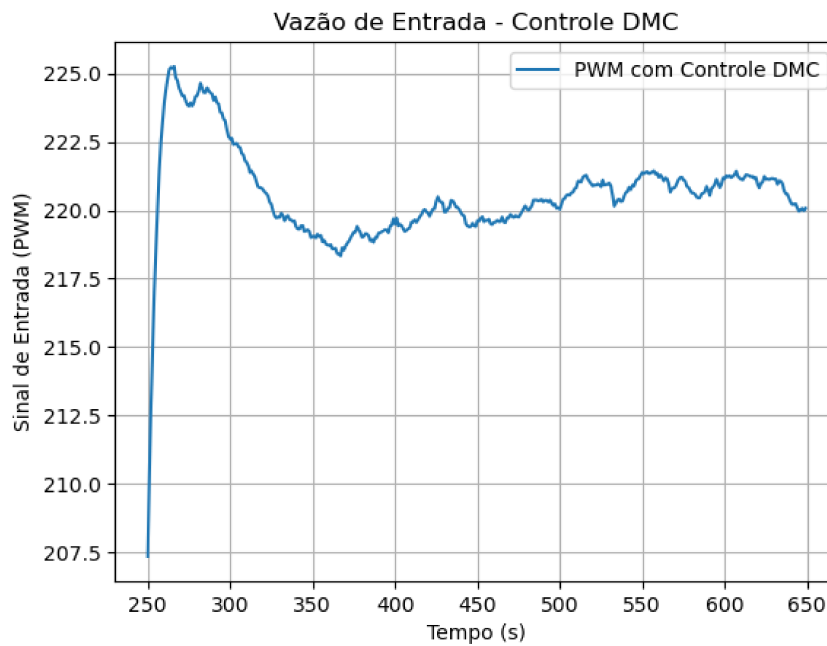
os dados reais, com diferenças atribuídas principalmente à presença de ruídos de medição, perturbações externas e pequenas variações na dinâmica da bomba.

Figura 32 – Saída experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$.

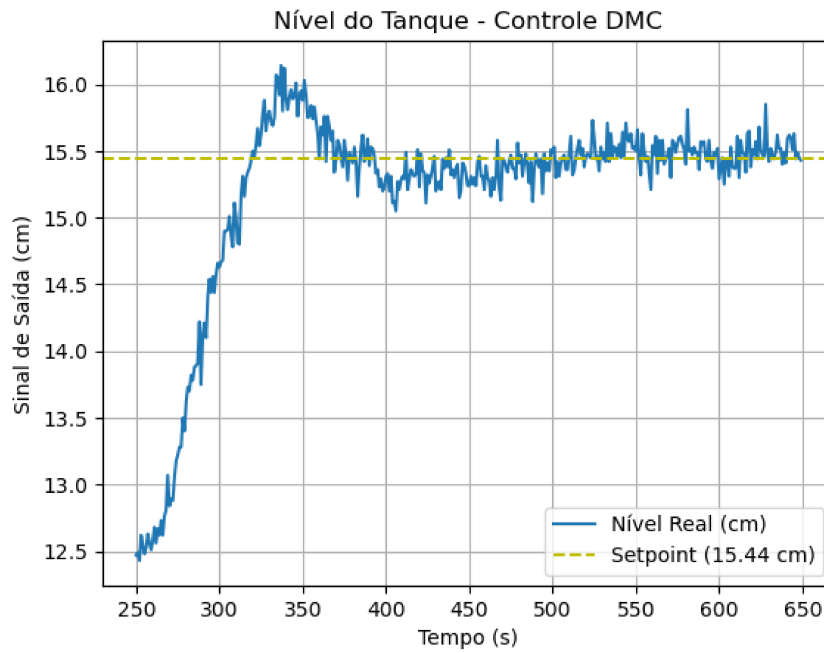


Fonte: Autoria própria (2025).

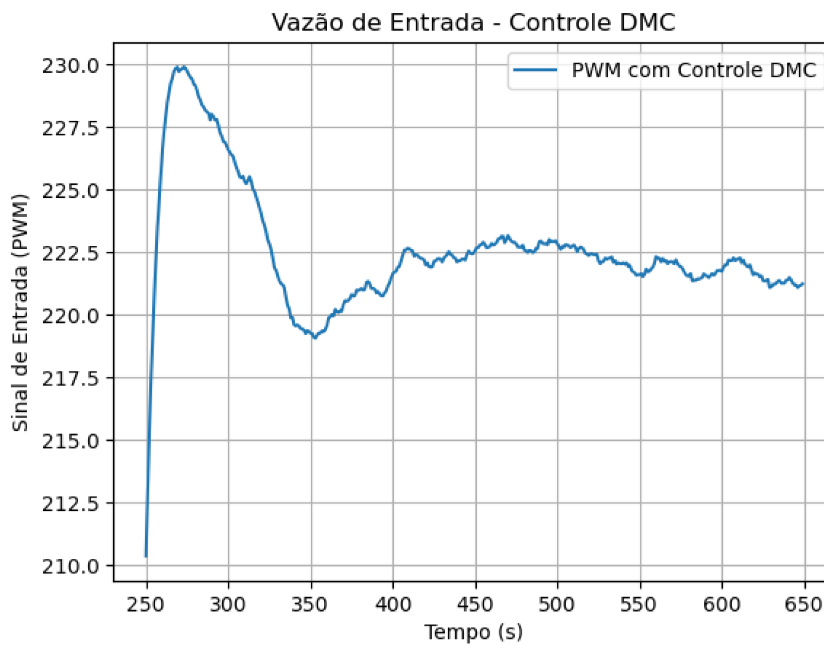
Figura 33 – Entrada experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 1$.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 34 – Saída experimental com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$.

Fonte: Autoria própria (2025).

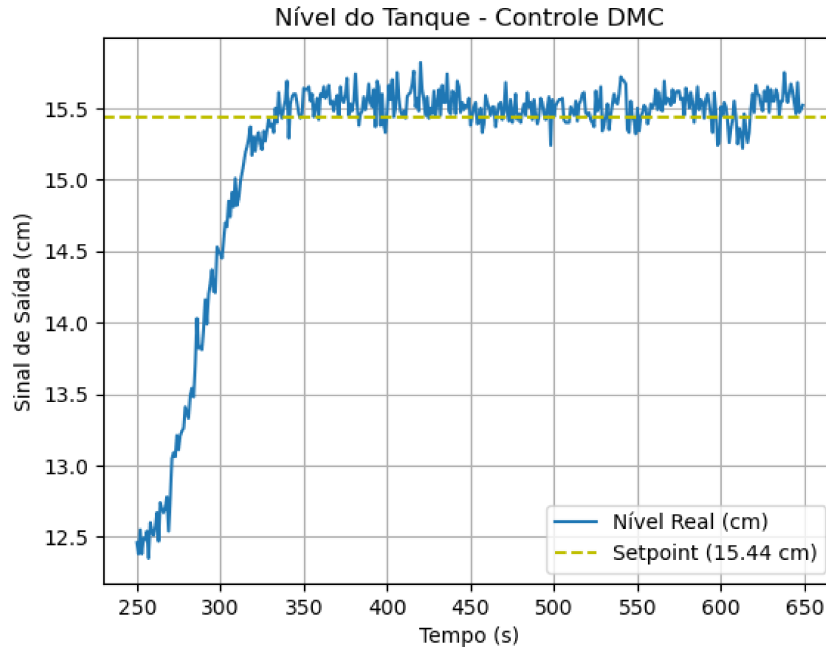
Figura 35 – Entrada experimental com DMC: $P = 80$, $M = 16$ e $w = 1$.

Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se que a configuração $M = 8$ apresenta algumas oscilações durante o regime permanente. Em tentativas de mitigar esse comportamento e, simultaneamente, avaliar o efeito do peso w sobre o esforço de controle, adotou-se o peso $w = 3$ para a ação

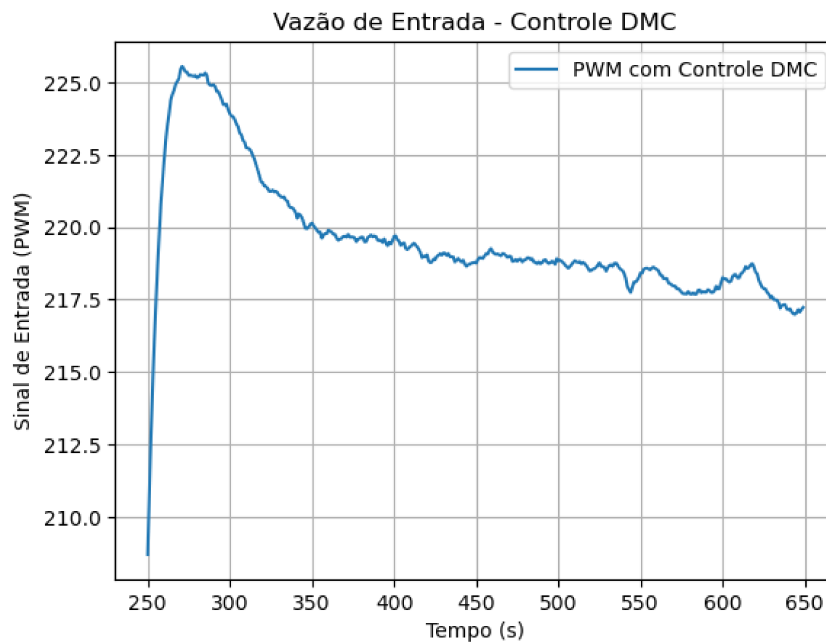
de controle. Nas Figuras 36 e 37 são mostradas, respectivamente, a saída e a variável controlada com peso $w = 3$.

Figura 36 – Saída experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 3$.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 37 – Entrada experimental com DMC: $P = 80$, $M = 8$ e $w = 3$.



Fonte: Autoria própria (2025).

O aumento do peso fez com que o controlador ficasse menos agressivo e consequen-

temente com menores oscilações no regime permanente, pois o termo associado ao esforço de controle passa a ter maior penalização na função custo do MPC, permitindo variações menores e mais lentas na ação de controle.

As métricas quantitativas de desempenho tempo de subida, tempo de acomodação, sobressinal, esforço de controle e índices de erro foram calculadas para cada configuração e estão resumidas na Tabela 3. Esses indicadores permitem comparar objetivamente o efeito de cada parâmetro sobre a resposta do sistema.

Tabela 3 – Métricas de desempenho dos controladores.

Controlador	t_r (s)	t_s (s)	Overshoot (%)	ISE	IAE	ITAE	Esforço (U_{esf})
PID	47,00	220,00	2,78	209,42	131,35	42.422,06	171,34
DMC $M = 8$, $w = 1$	49,00	208,00	1,94	257,90	149,23	47.662,04	55,19
DMC $M = 16$, $w = 1$	45,00	220,00	4,53	266,57	159,86	51.249,84	56,42
DMC $M = 8$, $w = 3$	47,00	194,00	1,94	279,57	156,74	50.313,52	43,48

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados indicam que o controle PID apresentou um bom desempenho em termos de tempo de subida ($t_r = 47$ s), sendo capaz de acomodar o sistema em $t_s = 220$ s após pequenas oscilações transitórias. No entanto, o esforço de controle apresentou variações altas resultando em $U_{\text{esf}} = 171,34$, ou seja, o atuador teve menor eficiência energética e maior desgaste, pode-se vincular este resultado com o fato do PID realizar o cálculo instantâneo do valor de PWM a cada 1 s e o aplicar à bomba d'água de forma também instantânea, sem cálculos otimizados de predição.

Além disso, as métricas de erro do PID mostram que o ISE e o IAE apresentaram valores moderados (ISE = 209,42; IAE = 131,35), refletindo, respectivamente, uma boa atenuação dos erros de maior magnitude e do erro acumulado ao longo da resposta. O valor elevado do ITAE (42.422,06) está associado principalmente ao ruído do sensor, que manteve o erro continuamente diferente de zero durante a operação, fazendo com que pequenas oscilações persistentes fossem penalizadas de forma crescente ao longo do tempo. Ademais, as ações Proporcional e Integral, estão fundamentadas, respectivamente, no erro instantâneo e no seu acúmulo, apresenta resposta menos efetiva diante de perturbações suaves ou erros de baixa frequência, pois reagem de forma limitada nesses cenários. Essa combinação resulta em uma correção mais lenta e prolongada, contribuindo para o aumento do ITAE.

De modo geral, o desempenho obtido para o controle PID é satisfatório para operação do sistema, devido ao processo analisado ser SISO, com dinâmica relativamente lenta e bem comportada. Essas características favoreceram a sintonia obtida pelo método IMC, resultando em resposta estável, com bom tempo de subida e sobressinal reduzido.

Assim, o PID mostrou-se bastante adequado para essa classe de sistemas, confirmando sua eficácia como solução de controle simples, robusta e de fácil implementação.

Já para o caso do controle DMC com $M = 8$ e $w = 1$, observa-se um tempo de subida maior ($t_r = 49$ s) e um tempo de acomodação relativamente menor ($t_s = 208$ s). O overshoot permaneceu baixo (1,94%), sendo um valor melhor dito como matematicamente representativo, já que não é evidente na curva experimental da resposta em questão. Os índices de erro apresentaram valores intermediários (ISE = 257,90; IAE = 149,23), coerentes com uma resposta estável, porém não particularmente agressiva. O ITAE atingiu 47.662,04, sugerindo que houve persistência de erro ao longo do tempo, compatível com o tempo de acomodação alto. O esforço de controle menor ($U_{\text{esf}} = 55,19$) evidenciou uma atuação relativamente suave com o uso do controlador DMC.

No caso com $M = 16$ e $w = 1$, o aumento do horizonte de controle reduziu o tempo de subida para 45 s, tornando a resposta mais rápida. Entretanto, essa aceleração veio acompanhada de maior overshoot (4,53%) e um leve incremento nos índices de erro integral (ISE = 266,57; IAE = 159,86). Como o ISE penaliza fortemente erros de maior magnitude, o aumento desse índice indica que a ação mais agressiva elevou momentaneamente o desvio em relação à referência. O ITAE, que penaliza erros persistentes, foi o maior entre as configurações (51.249,84), indicando que, apesar da resposta rápida, o sistema demorou mais a eliminar completamente o erro. O esforço de controle ($U_{\text{esf}} = 56,42$) também aumentou em relação ao horizonte $M = 8$, comprovando um comportamento mais agressivo.

Por fim, no caso $M = 8$, $w = 3$, observa-se uma resposta moderadamente rápida ($t_r = 47$ s) e, simultaneamente, o menor tempo de acomodação entre todas as configurações ($t_s = 194$ s). O overshoot permaneceu baixo e representativo (1,94%), o que demonstra uma resposta bem amortecida. O aumento do peso também reduziu o esforço de controle significativamente ($U_{\text{esf}} = 43,48$), tornando a ação do controlador mais conservadora. Os índices de erro integral apresentaram altos valores (ISE = 279,57; IAE = 156,74), refletindo que a ação mais limitada priorizou a suavidade em detrimento da precisão. O ITAE (50.313,52) também foi elevado, coerente com uma resposta mais lenta para eliminar erros ao longo do tempo.

De modo geral, a análise dos resultados evidencia que o aumento do horizonte de controle M tende a acelerar a resposta do sistema, resultando em menor tempo de subida. No entanto, observa-se um aumento da oscilação e do esforço de controle, indicando maior agressividade na atuação do controlador. Essas características estão conforme a literatura vigente da teoria de controle preditivo, onde destaca-se que horizontes de controle mais longos permitem maior liberdade de ação, mas também intensificam as variações da variável manipulada e exigem mais esforço computacional.

Já a configuração com peso mais elevado suavizou a ação de controle e diminuiu

o esforço, às custas de maior erro integral e maior persistência de erro ao longo do tempo, especialmente refletida no ITAE. Também foi possível notar que o horizonte de predição elevado ($P = 80$) mostrou-se adequado para capturar a dinâmica lenta da planta, permitindo ao controlador prever e compensar as variações do processo com boa precisão.

Logo, o DMC está coerente com suas bases teóricas e demonstra aplicabilidade na unidade experimental de dois tanques em série. Sua flexibilidade operacional para o sistema SISO em questão também é um ponto positivo observado, visto que suas características podem ser modificadas pela escolha dos parâmetros de projeto, e assim, configurar diferentes comportamentos dinâmicos, permitindo respostas mais agressivas ou mais conservadoras, maior suavização do sinal de controle ou maior prioridade ao seguimento do *setpoint*. Essa adaptabilidade evidencia a vantagem do DMC em aplicações que demandam controle preditivo, limitação de esforço ou operação em condições mais desafiadoras como controle de multivariáveis.

5 Conclusão

Em síntese, o objetivo principal deste trabalho foi plenamente alcançado, uma vez que se realizou o estudo das respostas de um sistema de dois tanques em série sob diferentes estratégias de controle e distintas parametrizações. Todas as etapas inicialmente propostas foram concluídas de maneira satisfatória e coerente com os propósitos do projeto.

Tendo como base inicial do projeto a construção da bancada didática experimental composta por dois tanques em série, a montagem da infraestrutura de suporte e o desenvolvimento eletrônico com sistema de automação baseado no microcontrolador ESP32 integrado com placa de circuito impresso, possibilitou a aquisição de dados do sensor de nível e o acionamento seguro da bomba d'água responsável pela entrada de fluxo no sistema. Esse conjunto permitiu a coleta robusta de dados experimentais e a manipulação precisa do atuador, garantindo a repetibilidade dos testes e o rigor necessário às análises de controle. Além dos aspectos de hardware e controle, o sistema supervisorio desenvolvido com interface gráfica, foi capaz de monitorar o processo em tempo real, fornecendo uma ferramenta para acompanhar o comportamento da planta.

Essa etapa primária de estruturação possibilitou uma posterior implementação de duas estratégias de controle distintas, o controlador convencional PID e o controlador preditivo DMC, utilizando ferramentas e bibliotecas de código aberto, onde reforçou o caráter didático e acessível do projeto. Ambos os controladores foram aplicados e conseguiram efetivamente controlar o nível do segundo tanque do sistema a partir da manipulação da vazão de entrada do primeiro tanque. Os ensaios experimentais realizados e os dados obtidos possibilitaram o estudo de métricas como tempo de resposta, sobressinal, tempo de acomodação e índices quantitativos de erro, permitindo assim, uma avaliação crítica de cada estratégia.

O controlador PID, calculado baseado no método IMC, provou-se de bom desempenho, pois resultou em uma saída efetivamente controlada em torno do ponto de referência com resposta rápida, pequenas oscilações e apresentando resultados moderados para os cálculos de IAE e ISE, significando bom desempenho com regime transitório e baixo índice de variações bruscas. Alguns pontos observados também foram o alto valor de ITAE vinculado ao erro residual de ruído ao longo do tempo e o valor consideravelmente alto de esforço de controle, sendo assim considerado um controle com atuação mais agressiva. Apesar disso, o PID se mostrou efetivo pois conta com facilidade de cálculo dos parâmetros e simples aplicabilidade para sistemas SISO.

Já o controlador preditivo DMC foi testado em diferentes configurações e apresentou desempenho consistente, mantendo a saída próxima ao ponto de referência. As simulações

e ensaios mostraram que o horizonte de controle e o peso da ação da variável manipulada influenciam diretamente o comportamento dinâmico, o controle com horizonte de controle mais baixo e sem peso produziu resposta estável, com erro moderado e esforço de controle equilibrado, enquanto o aumento do horizonte tornou o sistema mais rápido, porém com maiores oscilações e maior overshoot. Já o aumento do peso na ação de controle levou a uma ação menos agressiva e maior acúmulo de erro ao longo do tempo. As métricas de ISE, IAE e ITAE refletiram essas variações, indicando diferentes compromissos entre precisão, suavidade e persistência de erro. De maneira geral, o DMC demonstrou funcionamento confiável para o sistema SISO, com capacidade de adequação por meio de seus parâmetros, reforçando sua aplicabilidade ao processo e sua relevância como ferramenta didática em controle preditivo.

Em suma, a integração entre estrutura física, eletrônica, automação, controle e supervisão consolidou um sistema funcional, modular e altamente adaptável, adequado para estudos acadêmicos, atividades de ensino e como base de pesquisa para futuras aplicações em ambientes industriais.

Porém alguns desafios foram enfrentados neste projeto, um deles esteve associado ao desempenho da bomba quando submetida ao aquecimento, o que afetava a qualidade dos dados coletados e introduzia incertezas adicionais. Para mitigar esses efeitos, os ensaios foram conduzidos em intervalos espaçados e sob controle rigoroso das condições de operação, assegurando que todas as medições utilizadas nas análises fossem obtidas com a bomba em regime estável. O sensor empregado também apresentou ruídos, e sua calibração mostrou-se sensível a variações da pressão ambiente por se tratar de um dispositivo de pressão diferencial; ainda assim, constituiu-se na alternativa viável dentro das limitações do laboratório. Apesar desses entraves, foi possível alcançar resultados consistentes e garantir o funcionamento completo do sistema. Contudo, o tempo dedicado à identificação, correção e estabilização dessas limitações reduziu a disponibilidade para a realização de investigações complementares que poderiam ter ampliado o escopo deste trabalho.

Diante desse contexto, recomenda-se que estudos futuros avancem para a inserção de não linearidades do processo e incorporação de restrições nas variáveis manipuladas e de saída. Esses aspectos possibilitam avaliar a robustez do sistema em situações desafiadoras e explorar o potencial do DMC em cenários complexos. Adicionalmente, sugere-se o aprimoramento do sistema supervisório, especialmente no que se refere à integração completa entre o ScadaBR e o algoritmo em Python, permitindo ao operador escolher entre os modos PID e DMC, ajustar em tempo real parâmetros, além de registrar e coletar automaticamente os resultados. Por fim, sugere-se também a modernização da bancada, com a possível criação de um gêmeo digital, ampliando o potencial de análise e experimentação a partir da digitalização, com possibilidade de testar estratégias de controle de forma segura e acelerada, sem risco ao equipamento físico.

Referências Bibliográficas

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

BAGNI, B. G. et al. Estudo da abordagem de controle preditivo aplicado a um sistema de dois tanques em série. In: *Anais do XXI ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais*. Búzios, RJ: Instituto Federal Fluminense, 2018.

BEQUETTE, B. W. *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 2002.

CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. *Model Predictive Control*. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2013.

CARRO, L.; WAGNER, F. R. *Visão Sistêmica de Sistemas Embarcados*. 2017. Apostila de aula. Disponível em: <https://www.maxpezzin.com.br/aulas/6_EAC_Sistemas_Embarcados/8_SE_Visao_Sistematica.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2025.

COSTA, C. *Apostila de Sistemas Supervisórios*. 2017. Disponível em: <https://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/Apostila_%20Sistema%20Supervis%C3%B3rio.pdf>.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. 12. ed. [S.l.]: Pearson, 2011.

Espressif Systems. *ESP32 Technical Reference Manual (v5.4)*. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

KHALIL, H. K. *Nonlinear Systems*. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2002.

MURTA, J. G. A. *Conhecendo o ESP32 – Introdução (1)*. 2018. Blog Eletrogate. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/conhecendo-o-esp32-introducao-1/>>. Acesso em: 18 ago. 2025.

NISE, N. S. *Controle de sistemas dinâmicos*. 6. ed. [S.l.]: LTC, 2011.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2010.

QIN, S. J.; BADGWELL, T. A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 11, n. 7, p. 733–764, 2003.

QUADRA, E. F. *O que é automação? Quais os tipos e por que é importante para as empresas no mundo moderno?* 2024. Blog: Eliel Felipe Quadra – Consultor de Tecnologia. Publicado em: 18 ago. 2024. Acesso em: 17 ago. 2025. Disponível em: <<https://elielfelipequadra.com.br/o-que-e-automacao.html>>.

ROFFEL, B.; BETLEM, B. H. *Process Dynamics and Control: Modeling for Control and Prediction*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

SCadaBR. *SCadaBR - Sistema Supervisório de Código Aberto*. 2023. <<https://scadabr.org/>>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SCadaBR Community. *Discussões e Aplicações Reais com SCadaBR*. 2021. <<https://sourceforge.net/projects/scadabr/>>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SciPy Developers. *SciPy: Open Source Scientific Tools for Python*. 2023. <<https://scipy.org>>.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. *Process dynamics and control*. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2010.

SILVA, T. F. da; PRADO, M. L. M. Projeto de um controlador pid robusto para um sistema de dois tanques. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, Feira de Santana, BA, v. 1, n. 1, 2013.

SOURCEFORGE. *Manual SCadaBR (English)*. 2022. <<https://sourceforge.net/p/scadabr/wiki/>>. Acesso em: 17 ago. 2025.