

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Jaelson Gabriel Mendes de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR VIRTUAL INTERATIVO DE UMA
BANCADA DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM ARQUITETURA WEB**

Betim
2026

JAEISON GABRIEL MENDES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR VIRTUAL INTERATIVO DE UMA
BANCADA DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM ARQUITETURA WEB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de controle e automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de controle e automação.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Hermano
Rezende Rosa

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

O48d Oliveira, Jaelson Gabriel Mendes de

Desenvolvimento de um simulador virtual interativo de uma bancada de válvulas de controle em arquitetura *web* / Jaelson Gabriel Mendes de Oliveira. – 2026.

76 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Athur Hermano Resênde Rosa

1. Simulador virtual. 2. Java (Linguagem de programação de computador). 3. Controladores PID. 4. Automação de processos. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Oliveira, Jaelson Gabriel Mendes de II. Título.

CDU: 681.5



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos **08** dias do mês de **julho** do ano de **2026**, às **dezoito horas e zero minutos**, nas dependências do **IFMG - Campus Betim**, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, **Prof. Dr. Arthur Hermano R. Rosa**, e demais membros, **Prof. Dr. Marcus Paulo Silva de Abreu** e **Prof. Hugo Silva Ferreira**. Nesta ocasião o discente **Jaelson Gabriel Mendes de Oliveira** do curso de **Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação** defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **“DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR VIRTUAL INTERATIVO DE UMA BANCADA DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM ARQUITETURA WEB”** e foi **APROVADO**, com **80 (oitenta)** pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu **orientador** no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de **15** dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às **dezenove horas e zero minutos**. Para constar, eu, **Prof. Dr. Arthur Hermano R. Rosa**, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora

Betim, 10 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Hermano Rezende Rosa, Professor**, em 10/07/2026, às 18:57, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Paulo Silva de Abreu, Testemunha**, em 10/07/2026, às 21:45, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2805409** e o código CRC **780F10F2**.

23792.000846/2026-13

2805409v1



Documento assinado digitalmente
HUGO SILVA FERREIRA
Data: 13/07/2026 18:22:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico este trabalho a Deus, que me deu
forças para seguir em frente mesmo
quando tudo parecia difícil, e à minha
família, meu alicerce em todos os
momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força, saúde e perseverança para chegar até aqui.

À minha família, que sempre acreditou em mim. Vocês são minha base e minha maior torcida.

Aos meus amigos, que acompanharam essa jornada de perto.

Aos professores, em especial ao meu orientador Arthur Hermano, minha sincera admiração. Sou fã da dedicação, do conhecimento compartilhado e da paciência ao longo de todo esse processo.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa caminhada. Chegar até aqui foi difícil, mas valeu cada esforço.

" Toda honra e toda glória sejam dadas a
Deus"

RESUMO

A alternância dos laboratórios experimentais físicos para ambientes de simulação virtuais vem despontando como possibilidade cada vez mais atraente face aos elevados custos de aquisição e manutenção de plantas didáticas reais. A presente pesquisa traz uma abordagem acerca da maneira um simulador computacional baseado em arquitetura web de página única (*Single Page Application* — SPA) pode reproduzir com fidelidade a dinâmica de processos hidráulicos e validar algoritmos de controle industrial em malha fechada. O objetivo foi desenvolver e validar um protótipo de simulador virtual e interativo de uma bancada de controle de vazão por válvulas, utilizando programação em JavaScript e interface inspirada em sistemas SCADA industriais. A investigação classifica-se como um desenvolvimento tecnológico de natureza aplicada centrado na engenharia de *software*, na qual se estruturou um resolvidor numérico determinístico baseado nas leis de conservação de massa e nas equações da norma IEC 60534. O sistema emula de forma síncrona duas rotas dinâmicas de amostragem: a resposta contínua do ambiente MATLAB/Simulink e o comportamento discreto de varredura temporal e quantização de bits de um Controlador Lógico Programável (CLP) Siemens S7-1200. Os resultados indicaram que a estabilidade algorítmica do modelo hidrodinâmico parametrizado sob dados nominais de catálogos comerciais, o que permite a análise de regimes transitórios de vazão em tempo real mediante gráficos dinâmicos gerados pela biblioteca Chart.js. A arquitetura orientada a objetos agregou modularidade à interface, possibilitando a alternância instantânea entre curvas de atuadores lineares, igual percentual e *on/off* sem divergências numéricas no navegador. Concluiu-se que o simulador atende com rigor sua finalidade pedagógica e tecnológica, reafirmando-se como uma plataforma instrucional portátil, segura e autossuficiente para a validação de estratégias de controle PID clássico em engenharia.

Palavras-chave: Simulador Virtual. *Single Page Application*. JavaScript. Controle PID. Automação de Processos.

ABSTRACT

The alternation of physical experimental laboratories to virtual simulation environments has emerged as an increasingly attractive possibility in view of the high costs of acquisition and maintenance of real didactic plants. The present research brings an approach to how a computer simulator based on a single page web architecture (SPA) can faithfully reproduce the dynamics of hydraulic processes and validate closed-loop industrial control algorithms. The objective was to develop and validate a prototype of a virtual and interactive simulator of a valve flow control bench, using JavaScript programming and an interface inspired by industrial SCADA systems. The research is classified as a technological development of an applied nature focused on *software* engineering, in which a deterministic numerical resolver was structured based on the laws of conservation of mass and the equations of the IEC 60534 standard. The system synchronously emulates two dynamic sampling routes: the continuous response of the MATLAB/Simulink environment and the discrete temporal scanning and bit quantization behavior of a Siemens S7-1200 Programmable Logic Controller (PLC). The results indicated that the algorithmic stability of the parameterized hydrodynamic model under nominal data from commercial catalogs, which allows the analysis of transient flow regimes in real time through dynamic graphs generated by the Chart.js library. The object-oriented architecture added modularity to the interface, enabling instant switching between linear actuator curves, equal percentage and *on/off* without numerical divergences in the browser. It was concluded that the simulator rigorously meets its pedagogical and technological purpose, reaffirming itself as a portable, safe and self-sufficient instructional platform for the validation of classic PID control strategies in engineering.

Keywords: Virtual Simulator. *Single Page Application*. JavaScript. PID control. Process Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de válvula de controle	25
Figura 2 – Esquema de funcionamento da válvula de controle	26
Figura 3 – Válvula de globo	28
Figura 4 – Válvulas de esfera	29
Figura 5 – Válvulas borboleta	29
Figura 6 - Válvula diafragma	30
Figura 7 – Válvula agulha	30
Figura 8 – Válvula de retenção	31
Figura 9 – Válvula solenoide	31
Figura 10 - Válvula de controle proporcional	32
Figura 11 – Diagrama de blocos de arquitetura do simulador SPA.....	43
Figura 12 – Visão do setpoint de vazão principal	44
Figura 14 – Diagrama da bancada didática a ser simulada	48
Figura 14 – Fluxo hidráulico entre tanques e válvula	49
Figura 15 – Curvas características dos elementos finais de controles virtuais	55
Figura 16 – Representação da simulação virtual da bancada completa com operação manual	56
Figura 17 – Representação da simulação virtual da bancada completa com operação automática	57
Figura 18 – Exemplo de válvula esfera motorizada	59
Figura 19 – Comportamento comparativo dos modelos de controle do simulador	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de entrada e constantes hidrodinâmicas do simulador virtual	
.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI – *Analog Input* (Entrada Analógica)

AO – *Analog Output* (Saída Analógica)

CLP – Controlador Lógico Programável

CV – *Coefficient of Flow* (Coeficiente de Vazão da Válvula)

CV-01 – Válvula de Controle 01

DC – *Direct Current* (Corrente Contínua)

DI – *Digital Input* (Entrada Digital)

DN – Diâmetro Nominal

DO – *Digital Output* (Saída Digital)

IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)

I/O – *Input/Output* (Entrada/Saída)

L/min – Litros por minuto

m³/h – Metro cúbico por hora

MATLAB – *Matrix Laboratory*

NBR – Norma Brasileira

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

PLC – *Programmable Logic Controller* (Controlador Lógico Programável)

PN – Pressão Nominal

PVC – Policloreto de Vinila

Simulink – Ambiente gráfico de simulação do MATLAB

TQ – Tanque

Vdc – Volts em corrente contínuo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização do tema	15
1.2 Problematização	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo geral	17
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Justificativa	18
1.5 Organização do trabalho	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Tecnologia, Automação e Controle Industrial	20
3 METODOLOGIA	40
3.1 Tipo e Abordagem da Pesquisa	40
3.2 Arquitetura e Tecnologias do Simulador Virtual Web	40
3.3 Modelagem e Lógica de Simulação	41
3.4 Implementação do Sistema de Controle	42
3.5 Recursos e Validação da Interface	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Protótipo desenvolvido, finalidade e aplicação	44
4.2 Arquitetura hidráulica e princípio físico de operação	47
4.3 Dimensões físicas da bancada (escala geométrica)	50
4.4 Dimensionamento dos tanques e escala hidráulica (escala de volume vazão)	52
4.5 Tubulações e conexões	54
4.6 Válvula de controle e alternativas de atuação	58
4.7 Automação e condução dos ensaios (MATLAB/Simulink e CLP S7-1200)	59
4.8 Engenharia de <i>software</i> e estruturação modular da interface gráfica	61
4.9 Comissionamento lógico, calibração matemática e validação do software	62
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

A engenharia de controle e automação já é consolidada em sua essencialidade na otimização dos processos industriais por potencializar, quando bem aplicada, na eficiência operacional e contribuindo com a redução de custos. No escopo dos mais variados elementos de uso nessa área, as válvulas de controle são componentes cruciais para os processos que envolvam a regulação do fluxo de fluidos especialmente quando se tem demandas industriais críticas assegurando o pleno funcionamento dos sistemas dinâmicos considerados mais complexos (Gracia, 2021).

Bressan, Silva e Endo (2020) trazem uma perspectiva sobre a adequada especificidade e implementação das válvulas de controle refletindo de modo direto na qualidade e na segurança dos processos envolvidos, o que acaba demandando profissionais que sejam qualificados e capacitados para a sua operação e manutenção.

No contexto dos avanços tecnológicos compreende-se que integrar as válvulas de controle a sistemas automatizados mostra-se como uma estratégia de segurança, assertividade, controle de custos e outros benefícios que levam a um diferencial competitivo nas indústrias, pois que eleva a confiabilidade e reduz as falhas nos processos industriais (Garcia, 2023).

Na esfera acadêmica industrial é importante contar com ambientes de aprendizado práticos para que se tenha a vivência do que é ensinado no cotidiano das salas de aula. Assim, parte-se da premissa de construção de bancadas didáticas que possibilitam experimentar e simular sistemas de controle (Franchi, 2011).

Nesse panorama, a transição de bancadas de testes físicas para ambientes de simulação inteiramente virtuais surge como uma tendência consolidada em instituições de excelência internacional. O desenvolvimento de simuladores interativos baseados em tecnologias computacionais e arquitetura web permite contornar os altos custos de hardware e os riscos operacionais de sistemas hidráulicos reais. A modelagem precisa da dinâmica de fluidos transposta para códigos de programação oferece uma plataforma de experimentação onde o estudante interage com interfaces que mimetizam perfeitamente sistemas de supervisão e controle industrial (SCADA).

O Brasil também tem experiências de utilização de bancadas didáticas nos

mais diversos cursos de engenharia e trata-se de uma tendência que tem crescido de maneira expressiva. Marques *et al.*, (2017) citam os esforços cada vez mais notórios das instituições de ensino em relação a recursos que possam integrar os sistemas de automação industrial e, ao mesmo tempo, promoverem o desenvolvimento de projetos de pesquisas direcionados ao aperfeiçoamento de metodologias de ensino que estão amparadas na experimentação e simulação. Os avanços dessas medidas e ações refletem positivamente na melhoria da formação de engenheiros que estejam preparados para lidar com as dificuldades e desafios comuns da indústria 4.0.

O uso de bancadas didáticas também é latente no contexto internacional onde faculdades renomadas como Harvard, Oxford, Massachusetts Institute of Technology, dentre outras, vem desenvolvendo laboratórios de automação que fazem uso de bancadas didáticas para simular processos industriais complexos. Gardel *et al.*, (2012) mencionam que a utilização das citadas plataformas potencializarem o aprendizado propiciando aos estudantes uma vivência e uma compreensão mais profunda dos conceitos de controle e automação.

A utilização de um *softwar* de simulação e a construção de um protótipo de bancada didática de válvulas de controle trazem algumas dúvidas de cunhos técnicos, operacionais e conceituais. Parte-se da premissa de que é preciso avaliar qual o *softwar* adequado para a simulação de válvulas de controle, em que se tem uma predileção para o MATLAB/Simulink. Além disso, *softwars* de simulação demandam domínio técnico específico para configuração adequada dos parâmetros de controle, dinâmica dos fluidos e acionamento das válvulas. Ademais, deve-se assegurar que os parâmetros do *softwar* representem de modo fiel as condições reais da bancada e obter o máximo de dados experimentais para não comprometer a precisão da simulação.

Na construção do protótipo, pouco ainda se sabe sobre a seleção de componentes, as válvulas, sensores, controladores e tubulações consideradas as mais adequadas para uma bancada didática. Será também discutido o tamanho adequado das válvulas e tubulações para simular condições de fluxo distintas sem gerar perdas de carga excessivas. Sabe-se que pequenos desalinhamentos podem implicar na funcionalidade da bancada, além da precisão na instalação de atuadores e sensores despontar como aspecto crucial para a medição correta de parâmetros.

1.2 Problematização

A Confederação Nacional da Indústria (CNI) aponta que a indústria é a segunda maior atividade econômica do Brasil, o que representa 25,5% do PIB em 2023. Não obstante, a indústria de transformação se destacou significando 59,9% dessa participação e, de modo a firmar a produção de alta qualidade com mínimos custos e desperdícios, as indústrias monitoram e controlam variáveis como vazão, nível e pressão (CNI, 2023).

Mesmo diante da elevada oferta de trabalhadores, cerca de 50% das indústrias extrativas e de transformação no Brasil ainda enfrenta entraves pertinentes à falta de mão de obra qualificada, o que compromete a melhoria dos processos produtivos e da qualidade dos produtos. Nessa realidade, as instituições de ensino se esforçam para suprir essa demanda oferecendo cursos profissionalizantes que alinham teoria e prática, utilizando bancadas didáticas que simulam processos industriais (FONSECA, 2012; RAMOS, 2013; SILVA *et al.*, 2015).

Tais ferramentas são de máxima importância no desenvolvimento profissional dos alunos. Devido ao alto custo das plantas comerciais, surgiram trabalhos acadêmicos focados no desenvolvimento de bancadas didáticas de baixo custo.

Diante do alto custo de aquisição e manutenção de plantas comerciais físicas, emerge a necessidade de soluções digitais acessíveis e de alta fidelidade técnica. Assim, a situação problemática desta pesquisa centra-se no desenvolvimento e validação de um protótipo de simulador virtual interativo para o controle de vazão de fluidos. Busca-se responder à seguinte questão: De que maneira um simulador computacional baseado em arquitetura web de página única (SPA) pode reproduzir com fidelidade a dinâmica de processos hidráulicos e validar algoritmos de controle industrial em malha fechada?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do estudo aqui proposto é desenvolver e validar um protótipo de simulador virtual e interativo de uma bancada de controle de vazão por

válvulas, utilizando programação em JavaScript e interface inspirada em sistemas SCADA industriais.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram assim determinados:

- Estudar a literatura de referência em relação as bancadas didáticas e simulações computacionais;
- Realizar o projeto e a validação de um modelo de simulação computacional para o funcionamento de válvulas de controle; e
- Implementar e avaliar a eficiência de um algoritmo de controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) integrado ao simulador virtual, analisando as respostas transitórias e em regime permanente sob diferentes cenários de operação.

1.4 Justificativa

A construção de uma bancada didática desponta como uma estratégia que pode aumentar a eficácia do ensino na automação industrial quando permite a interação com tecnologias atualizadas e contribui com a formação de profissionais cada vez mais qualificados para o atendimento das demandas do mercado, o que justifica a realização desse estudo.

Nazarova *et al.*, (2022) reforçam que o avanço tecnológico tem também estimulado a utilização de *softwares* de simulação para que seja possível desenvolver e validar protótipos de sistemas de controle. O avanço tecnológico estimula a substituição de *softwares* locais e licenças proprietárias (como MATLAB, LabVIEW e FluidSIM) por aplicações web acessíveis rodando diretamente no navegador do usuário. A relevância do tema proposto evidencia-se no fato de que essa abordagem elimina completamente os custos de fabricação mecânica e manutenção de hardware. Importante considerar ainda a flexibilidade de simular cenários críticos de falha, saturação de atuadores e otimização de parâmetros PID em um ambiente digital totalmente seguro e livre de riscos operacionais.

Fica evidenciado que a relevância do tema proposto, pois a referida a

abordagem diminui, de maneira expressiva, os custos do desenvolvimento. Importante considerar ainda, a possibilidade de se identificar as falhas e alcançar a otimização de parâmetros de controle que antecedem a etapa da implementação experimental, como foi visto em estudos de referência como Gardel *et al.*, (2012) e Vazquez-Gonzalez *et al.*, (2018); O uso de simulações também possibilita a análise de contextos operacionais distintos de maneira que seja possível fazer adequações nos parâmetros antes que sejam construídos os protótipos físicos.

1.5 Organização do trabalho

O presente estudo está organizado, além desta Introdução, no capítulo 1 que se refere ao referencial teórico estruturado para pesquisa aqui delimitada com os principais conceitos e estudos pertinentes ao tema. O capítulo 2 descreve a metodologia aplicada na engenharia de *softwar* e na lógica hidrodinâmica do simulador virtual. O capítulo 3 expõe a interface desenvolvida, detalhando os modos de operação (manual e automático) e os resultados das simulações de controle de vazão em malha aberta e fechada. Por fim, o capítulo 4 apresenta as conclusões, as limitações do simulador e propostas para futuras expansões do código.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tecnologia, Automação e Controle Industrial

Os alcances da automação industrial seguem em uma evolução constante, especialmente nas últimas décadas, de modo que se tenham avanços expressivos na eficiência produtiva. De acordo com Khan, Campos e Bituen (2019), automação pode ser definida como uma gama de tecnologias que diminuem a interferência humana nos processos produtivos.

Para melhor compreensão do termo, Rosário (2009, p.19) assinala que:

O conceito de automação é constantemente confundido com o de automatização. O conceito de automatização está ligado à realização de movimentos automáticos, repetitivos e mecânicos, sendo, portanto, sinônimo de mecanização, e mecanismo implica ação cega, sem correção. Já a automação possui um conceito de conjunto de técnicas por meio das quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam. Com base nas informações recebidas, o sistema calcula a ação corretiva mais apropriada, ou seja, um sistema de automação comporta-se como o operador humano, utilizando as informações sensoriais. Ele pensa e executa a ação mais apropriada. Na automação há uma auto adaptação a diferentes condições, de modo que as ações do sistema de maquinários levem a resultados ótimos. A automação está ligada à utilização de sistemas automáticos. Pode-se definir ainda a automação como sendo um sistema que tende a aumentar a eficiência de um determinado processo. A automação industrial na maioria das vezes processa-se da seguinte maneira: um computador recebe os sinais provenientes dos vários instrumentos de medidas da fábrica, compara tais medidas com os valores ideais e realiza operações matemáticas com a finalidade de gerar sinais de correção, que instruirão os dispositivos de controle acerca da alteração mais apropriada para cada instante, com o intuito de conduzir a uma produção ótima sob um determinado ponto de vista, seja ele qualitativo ou quantitativo.

A perspectiva defendida por Oliveira *et al.*, (2024) é de que a engenharia de controle possibilita aplicar sistemas inteligentes que fazem a regulação e o monitoramento dos processos industriais. Os autores destacam que os referidos sistemas asseguram a estabilidade e o controle preciso.

Observa-se que a integração dos sensores e atuadores são sistemas industriais permite que sejam coletados e analisados os dados em tempo real. Esse monitoramento é o que possibilita a melhoria da qualidade e o alcance de segurança nos processos (Marques, 2022).

A título de exemplo, Wang *et al.*, (2021) descrevem os controladores lógicos programáveis, PLCs, como componentes determinantes da automação, uma vez que permitem a probabilidade dos processos e a automação dada em larga escala. Os autores também exemplificam a comunicação industrial tendo uma função imprescindível na interconexão dos sistemas, em que se tem o destaque dado aos protocolos como Modbus e Profibus, sendo amplamente empregados.

A questão envolvendo o desenvolvimento de algoritmos de controle amparados em modelos matemáticos é trazido à discussão por Mambachi *et al.*, (2022), sendo uma estratégia que acaba por proporcionar uma maior precisão no gerenciamento de processos. Os autores destacam que a modelagem e a simulação têm uma contribuição direta na previsibilidade e na correção de falhas antes da implementação.

Segundo Oliveira *et al.*, (2024), o uso de sistemas SCADA tem sido cada vez mais utilizado nas indústrias pois as referidas ferramentas propiciam uma supervisão remota dos processos diminuindo os custos operacionais.

Os avanços da tecnologia digital e da Internet das Coisas, IOT, vem estimulando novas aplicações na automação. A interconectividade oferece possibilidades de melhoria e análise preditiva, além de eficiência produtiva, compreende-se que a automação tem reflexo direto na sustentabilidade industrial, uma vez que traz a otimização dos processos, reduzindo os desperdícios e melhorando a eficiência energética (Wang *et al.*, 2021).

Em síntese, compreende-se que a tecnologia, quando associada a automação e ao controle industrial, oferece possibilidades diversas para a própria indústria moderna. E, existe uma tendência de continuidade do desenvolvimento dessas tecnologias potencializando cada vez mais a sua aplicabilidade.

2.2 Controle de fluidos no processo industrial

A necessidade de padronizar e estabilizar os processos é o que deu origem ao controle de fluidos industrial que vem desde a revolução industrial quando ocorreu uma alta demanda por uma regulação mais exata e precisa de vazão. Considera-se aqui, a especificidade do controle de fluidos, tal como um rol de técnicas e dispositivos aplicados no gerenciamento da movimentação e os aspectos de líquidos e gases em sistemas fechados ou abertos (Braga, 2018).

O referido processo é citado por Allmendinger, Stache e Tränkle (2023) como imprescindível para evitar desperdícios, proteger os equipamentos de possíveis danos e primar pela segurança em operações que contemplem materiais de alto risco ou delicadeza. Os sistemas de controle de fluidos tratam de variáveis como pressão, vazão e temperatura, que impactam de modo direto na eficiência e qualidade dos processos industriais. As tecnologias contemplam desde válvulas e sensores até *softwares* de automação avançada que asseguram o monitoramento e a operação em tempo real.

Importante saber quais são os diferentes fluidos no processo industrial. Os chamados fluidos newtonianos, água e o óleo, são exemplos clássicos. Esses fluidos são tipificados por possuírem uma viscosidade constante, independentemente da taxa de cisalhamento aplicada. Dessa forma, a relação entre a tensão de cisalhamento (força por unidade de área) e a taxa de cisalhamento é linear (Flores-Bugacho *et al.*, 2022).

Já nos fluidos não newtonianos a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento. Assim, esses fluidos apresentam uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Os fluidos Não Newtonianos podem ser classificados em três categorias, a citar:

- Plásticos: A argila exemplifica um fluido plástico, pois requer um esforço mínimo antes de começar a fluir.
- Pseudoplásticos: Nesses fluidos, a viscosidade diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta.
- Dilatantes: Em contraste, os fluidos dilatantes têm sua viscosidade aumentada com o incremento da taxa de cisalhamento, como no caso da suspensão de amido (Braga, 2018).

Allmendinger, Stache e Tränkle (2023) reforçam que a viscosidade é uma medida da resistência do fluido ao escoamento. Por exemplo, quando um óleo está sujo, sua viscosidade aumenta, tornando-o mais espesso e resistente ao fluxo. A viscosidade impacta diretamente no controle de fluidos, afetando a eficiência de bombas e a seleção de válvulas. É essencial considerar a viscosidade para garantir que os equipamentos operem dentro da faixa especificada. Além disso, a viscosidade

pode variar com a temperatura, exigindo cuidados adicionais e ajustes nos sistemas de controle.

Nesse pensamento, Hampell *et al.*, (2022) descrevem que o controle de fluidos na indústria é um desafio significativo, independentemente da empresa. Processos industriais são influenciados por diversas perturbações externas que podem impactar negativamente seus resultados, como queda de energia, abertura de portas para checagem de vazamentos e impurezas. Sistemas de controle imprecisos não conseguem compensar essas perturbações.

Assim, tem-se quatro métodos eficientes para o controle de fluidos na indústria que contemplam a implementação de sistemas de monitoramento contínuo; utilização de válvulas de controle de alta precisão; automação dos processos de ajuste de viscosidade conforme a temperatura e manutenção preventiva regular dos equipamentos de controle de fluidos.

Flores-Bugacho *et al.*, (2022) esclarecem que o avanço da regulação acabou por permitir a otimização dos processos como refino de petróleo e a produção de químicos. Os referidos autores descrevem que o controle adequado do fluido diminui a incidência de perda e desperdício melhorando a qualidade dos produtos.

A demanda desse saber é explicada por Nogara Júnior (2018, p.19):

O escoamento de fluidos, como o ar e a água, está presente no cotidiano e muitos projetos de engenharia envolvem problemas de escoamento de algum fluido, seja ele um gás ou líquido. Na maioria dos cursos de graduação em engenharia como por exemplo, aeroespacial, mecânica, naval, civil, entre outras, o estudo é feito na disciplina denominada Mecânica dos Fluidos. A condição de determinar se um escoamento é turbulento ou laminar, permite que o engenheiro utilize a literatura correta para cada caso, onde uma contempla comportamento diferente da outra. Isso possibilita que num projeto onde há interação com escoamento de fluido, tenha os valores calculados mais próximos do valor real da aplicação, reduzindo assim a necessidade de superdimensionar os componentes do projeto, o que resulta em um projeto mais econômico e capaz de atender satisfatoriamente a que se propõe.

Nessa mesma linha de pensamento, Bressan, Silva e Endo (2020) mencionam que os avanços tecnológicos permitem a transição dos controles manuais para os sistemas automáticos, em que a digitalização dos processos industriais propicia exatidão e confiabilidade. Nesse limiar, as válvulas de controle despontam como soluções eficientes para a regulação de vazão e a sua introdução provocou transformações expressivas no controle de processos industriais.

Fica assim compreendido que o controle de fluidos passou a ser determinante para a segurança e a eficiência dos processos industriais. O sistema de controle projetado de modo adequado e cuidadoso permite a redução de perdas e melhoria da confiabilidade operacional. Exigências envolvendo maior precisão e eficiência acabou por forçar o desenvolvimento de algoritmos de controles avançados em que a utilização de técnicas modernas como o controle preditivo oferece ganhos em desempenho das operações comuns no processo produtivo industrial. Não obstante a integração do sistema de controle com IOT indústria 4.0 propicia uma automação e monitoramento em tempo real mais intensificado em que a interconectividade é o que permite adequações automáticas para reduzir as falhas operacionais (Garcia, 2021).

Braga (2016, p.10) destalha:

Os sistemas de sensoramento, monitoramento e controle estão sendo amplamente utilizados nos processos industriais, auxiliando na verificação do rendimento dos processos, na diminuição da variabilidade, no aumento da eficiência e da segurança nas obtenções dos valores. A vazão é a grandeza mais medida nos processos industriais, essa grandeza corresponde a 80% das medidas realizadas. Existem diversos instrumentos de medição de vazão, para a escolha do dispositivo adequado deve ser levado em conta diversos aspectos como, por exemplo, a perda de carga admissível, a robustez e precisão. O sistema de vazão possui uma reposta rápida, portanto, foi utilizado o método de controle Proporcional Integral (PI), a sintonia foi dada por meio do método de resposta em frequência de Ziegler-Nichols. Um dos grandes compromissos da engenharia é aliar o menor custo com o melhor projeto possível, sendo assim, esse projeto visou a utilização de instrumentos e métodos que sejam eficazes e relativamente baratos, o que levou a escolha da placa de orifício por atender tais requisitos.

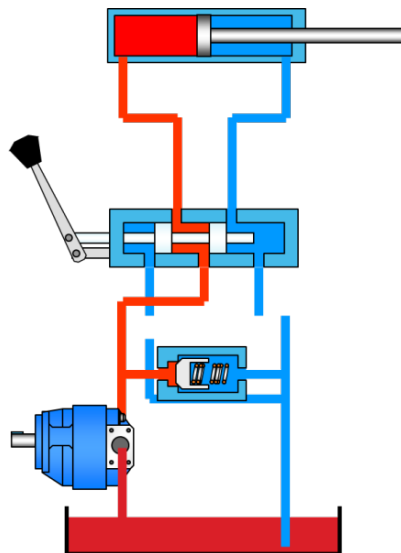
O controle de fluidos portanto, pode ser compreendida como disciplina essencial, com reflexos nas mais variadas áreas industriais, desde a produção de petróleo e gás até a indústria farmacêutica. E os processos industriais precisam contar com essa gama de tecnologias e métodos que propiciem a manipulação rigorosa de líquidos e gases, regulando pressão, vazão e temperatura para o seu pleno funcionamento. Ou seja, o controle de fluidos na indústria apresenta-se como um dos grandes desafios existentes, dado que os processos industriais são impactados por uma série de perturbações, isto é, fatores externos ao processo e que podem refletir de forma negativa no resultado dele (Franchi, 2011).

3.3 Válvulas de Controle

As válvulas de controle respondem por uma função imprescindível nos sistemas industriais quando regulam o fluxo de líquidos gases e vapores. De acordo com Braga (2018), as válvulas em questão são projetadas para alterar avaliação em conformidade com sinais recebidos de controladores assegurando precisão e eficiência nos processos.

A Figura 1 retrata um esquema básico do funcionamento de uma válvula de controle:

Figura 1 – Representação esquemática de válvula de controle



Fonte: Hidráulica e Pneumática, 2020.

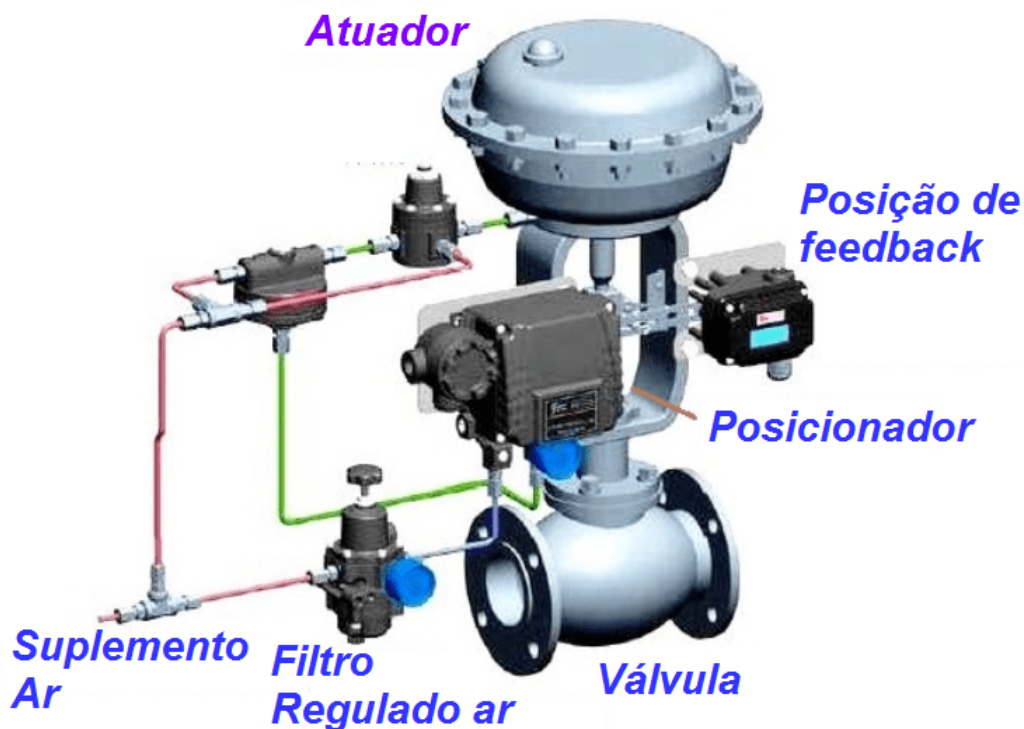
A função mais importante das válvulas de controle é permitir as adequações automáticas no fluxo de modo que sejam mantidos os parâmetros do sistema no contexto das especificações feitas. Os referidos dispositivos são determinantes para a estabilidade e a segurança operacional. Nos dizeres de Garcia (2021, p.46), lê-se:

A válvula de controle desempenha um papel muito importante no controle automático de modernas indústrias, que dependem da correta distribuição e controle de fluidos líquidos e gasosos. Tais controles, sejam para trocas de energia, redução de pressão ou simplesmente para encher um reservatório, dependem de algum tipo de elemento final de controle para realizar esse serviço. Os elementos finais de controle podem ser considerados como o “músculo” do controle automático. Eles fornecem a amplificação de forças necessária entre os baixos níveis de energia, fornecidos pelos controladores, e os maiores níveis de energia necessários para desempenho de suas funções de fluidos. Apesar de largamente utilizada, provavelmente não exista

outro elemento qualquer no sistema de controle, que receba menor parcela de atenção. Em muitos sistemas, a válvula de controle está mais sujeita a severas condições de pressão, temperatura, corrosão e contaminação do que qualquer outro componente, e ainda assim, deve trabalhar satisfatoriamente com um mínimo de atenção. Uma válvula de controle funciona como uma resistência variável na tubulação, e é definida por alguns autores, como sendo um orifício de dimensões variáveis.

Em geral o princípio de funcionamento das válvulas de controle (Figura 2) se ampara na oscilação da abertura do obturador que faz a regulação da vazão do fluido a referida operação pode ser feita de modo manual ou automático mediante os atuadores pneumáticos elétricos ou hidráulicos (Bates, 2020).

Figura 2 – Esquema de funcionamento da válvula de controle



Fonte: Braga, 2018.

Como explicam Bressan, Silva e Endo (2020), os atuadores respondem pelo acionamento das válvulas de modo a converter sinais de controle em movimentos mecânicos. Os atuadores pneumáticos são considerados os mais indicados em razão da sua resposta rápida e operação simplificada.

No que se refere ao dimensionamento de adequação das válvulas de controle, é importante buscar evitar os problemas tais como ruído excessivo e a

cavitação. A utilização de *softwares* de simulação possibilita a escolha do modelo mais indicado para cada aplicação industrial.

Ressalta-se o controle de fluxo feito pelas válvulas de controle precisa cumprir as normas técnicas rigorosas para oferecer segurança e desempenho normativas como a ANSI/ISA 75.01 e a IEC 60534 definem os padrões para projeto e operação das válvulas de controle.

De acordo com Bates (2020), a automação industrial segue uma tendência de promoção e integração das válvulas de controle com sistemas inteligentes. A comunicação mediante protocolos como HART e Fieldbus possibilita monitoramento remoto e o diagnóstico preditivo das válvulas.

A eficiência operacional na escolha do material da válvula implica de modo direto na sua durabilidade e resistência química. Moura, Santos e Lima (2021) assinalam que materiais como aço inoxidável, bronze e ligas especiais tem uso dado para o aumento da vida útil dos equipamentos. A redução dos desperdícios e o alcance de melhorias na qualidade dos produtos são benefícios constantemente citados na literatura de referência, alcançados pela implementação das válvulas de controle nos processos industriais. Nesse sentido Oliveira e Costa (2019) frisam que automação do controle de fluxo possibilita adequar parâmetros em tempo real e assim as perdas da matéria-prima e de energia são minimizadas.

Vale também citar Astrom e Murray (2020) quando descrevem os ensaios e testes das válvulas sendo essenciais para segurar o seu desempenho. Os autores citam testes como a de estanqueidade, resistência à pressão e resposta dinâmica sendo imprescindíveis para validação antes que sejam instaladas no sistema.

Sendo assim a evolução da indústria 4.0 acaba por provocar o desenvolvimento de válvulas de controle que sejam cada vez mais sofisticadas. As recentes tecnologias, a citar, os sensores inteligentes e o aprendizado da máquina, têm sido incorporados para aumento da precisão e da confiabilidade dos sistemas. Ademais a manutenção preventiva e preditiva das válvulas de controle minimiza o risco de falhas não esperados e as estratégias amparadas no monitoramento contínuo asseguram maior confiabilidade e estendem a vida útil dos equipamentos.

Compreende, portanto, que as válvulas de controle significam um mecanismo determinante para automação e a sua utilização nos processos industriais passa pelo seu adequado dimensionamento, além dos cuidados com a calibração e

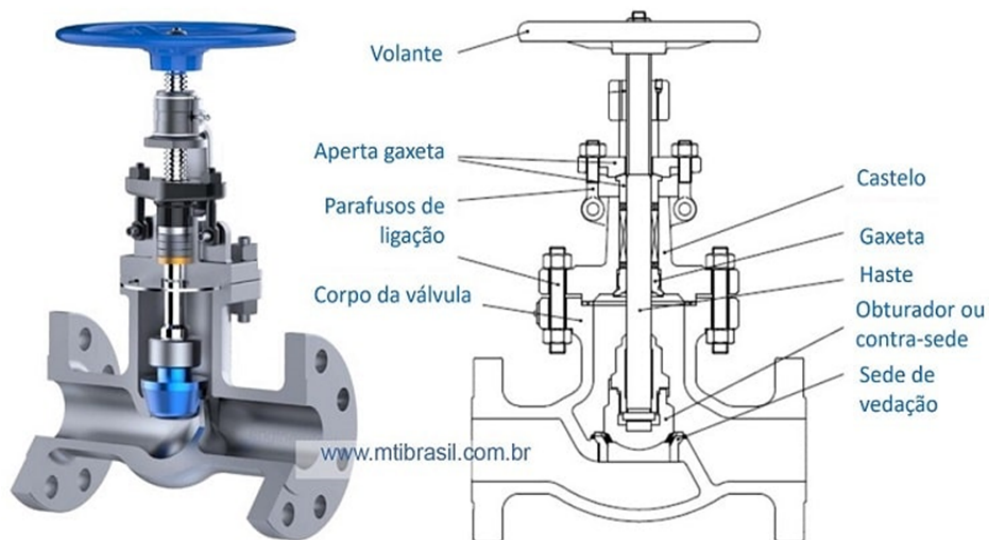
manutenção, de modo a assegurar a eficiência energética a qualidade e que se tenha segurança operacional.

2.3 Tipos de Válvulas de Controle

Como citado anteriormente, as válvulas de controle são elementos imprescindíveis aos sistemas de automação industrial e respondem pela regulação do fluxo de fluidos. São vários os tipos de válvulas, em que cada um deles é projetado para atender as demandas específicas de processos que também são específicos. De acordo com a Bates (2020), a escolha do tipo indicado está atrelada a fatores tais como pressão temperatura e natureza do fluido.

Considerando as principais delas, Oliveira e Costa (2019) citam a válvula de globo (Figura 3) como uma das amplamente utilizadas em razão da sua precisão na regulagem do fluxo. O autor esclarece que a estrutura desse tipo de válvula possibilita uma modulação eficiente sendo largamente utilizada nos processos que demandam o controle rigoroso da vazão.

Figura 3 – Válvula de globo

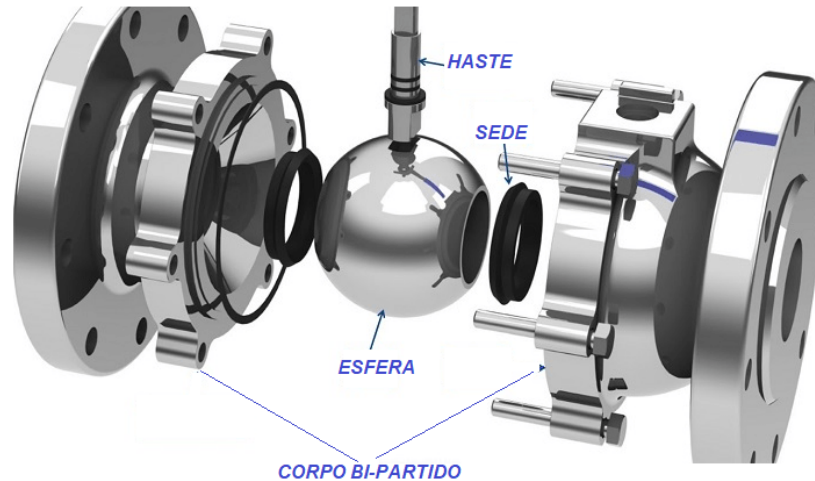


Fonte: MTiBrasil, 2022.

De acordo com Cordeiro (2022), as válvulas de esfera (Figura 4) são aquelas reconhecidas por sua resposta ágil e uma vedação eficiente. O referido tipo de válvula é indicado para aplicações em que se tem a necessidade de abertura e

fechamentos rápidos, sendo frequentemente empregada nas indústrias químicas e petroquímicas.

Figura 4 – Válvulas de esfera



Fonte: Cordeiro, 2022.

Já as válvulas borboleta (Figura 5) são explicitadas por Bressan, Silva e Endo (2020) como aquelas que possuem uma construção compacta e leve de modo a facilitar a sua instalação e manutenção. Os autores ressaltam que seu uso é atrativo nos processos que demandam grandes vasos com baixa perda de carga aceitar os sistemas de tratamento de água.

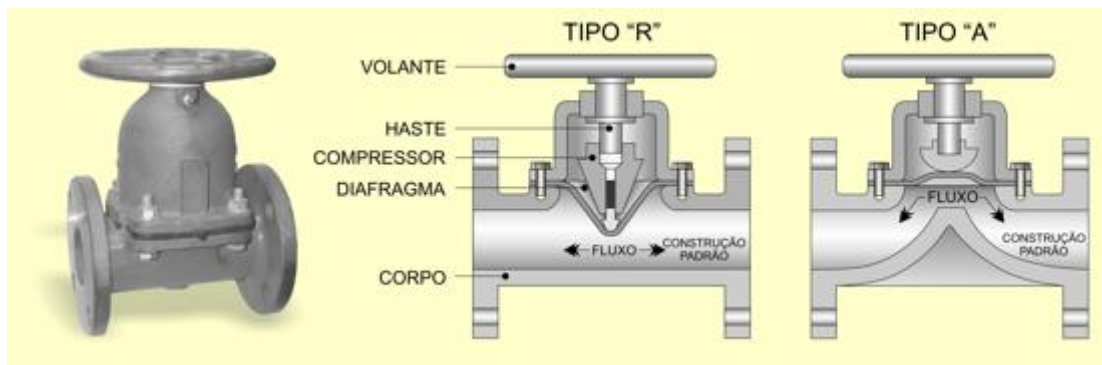
Figura 5 – Válvulas borboleta



Fonte: MTiBrasil, 2022.

Também existem as válvulas diafragma (Figura 6) amplamente empregadas dos processos que contemplam os fluidos corrosivos ou abrasivos. De acordo com Moura, Santos e Lima (2021), sua vedação flexível é a propriedade que evita o contato direto do fluido contra os componentes mecânicos e, dessa maneira, estende a vida útil do equipamento.

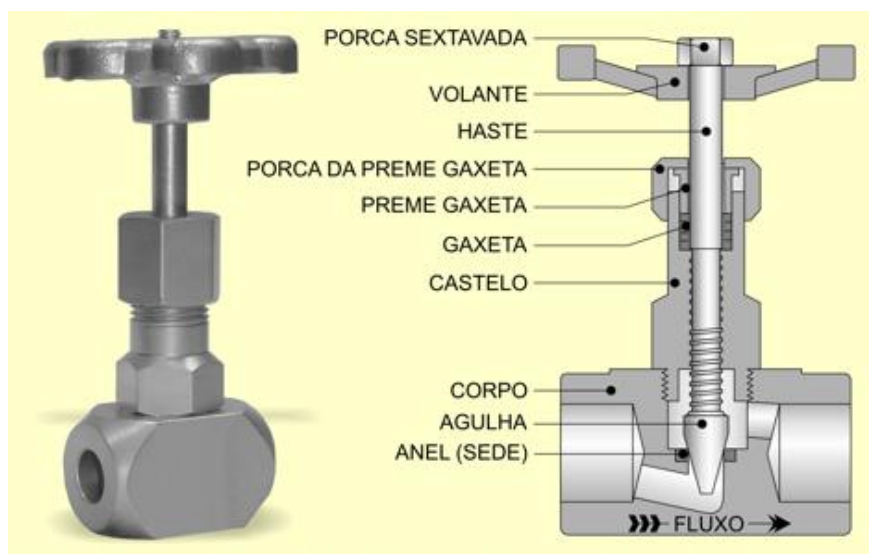
Figura 6 - Válvula diafragma



Fonte: Valaço, 2017.

As válvulas de agulha (Figura 7) são descritas por Oliveira e Costa (2019) como aquelas projetadas para propiciar maior controle exato de pequenos fluxos. Os citados autores destacam que sua estrutura é o que possibilita as adequações pormenorizadas sendo frequentemente utilizada nos laboratórios e em sistemas de medição.

Figura 7 – Válvula agulha



Fonte: Valaço, 2017.

Bressan, Silva e Endo (2020) citam as válvulas de retenção (Figura 8) como aquelas essenciais para evitar o fluxo de fluídos no sistema. As citadas válvulas seguem uma operação de modo automático assegurando que o fluxo obedeça a uma direção o que é determinante para a proteção das bombas e equipamentos mais sensíveis.

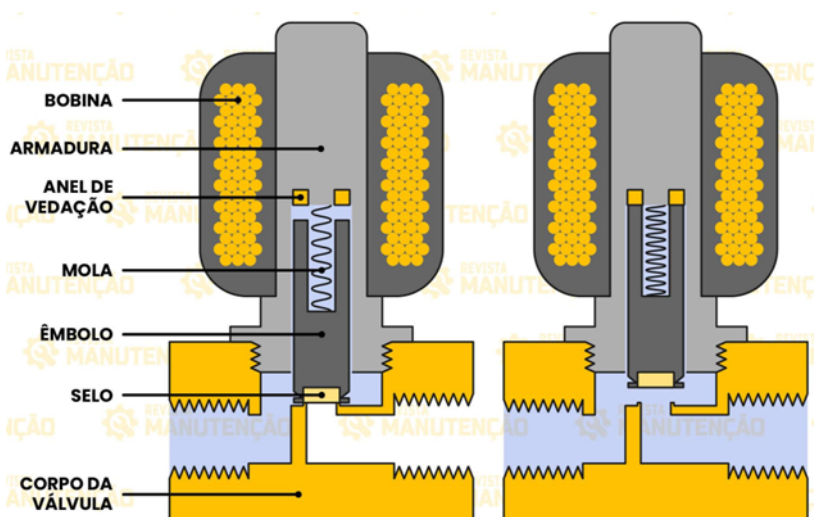
Figura 8 – Válvula de retenção



Fonte: Valaço, 2017.

As chamadas válvulas solenoides (Figura 9) tem acionamento dado de modo elétrico e, assim, proporciona uma resposta mais ágil e preciso. O referido tipo de válvula é largamente utilizado nos sistemas automáticos, a citar as linhas de produção e equipamentos hospitalares como exemplo (Cordeiro, 2022).

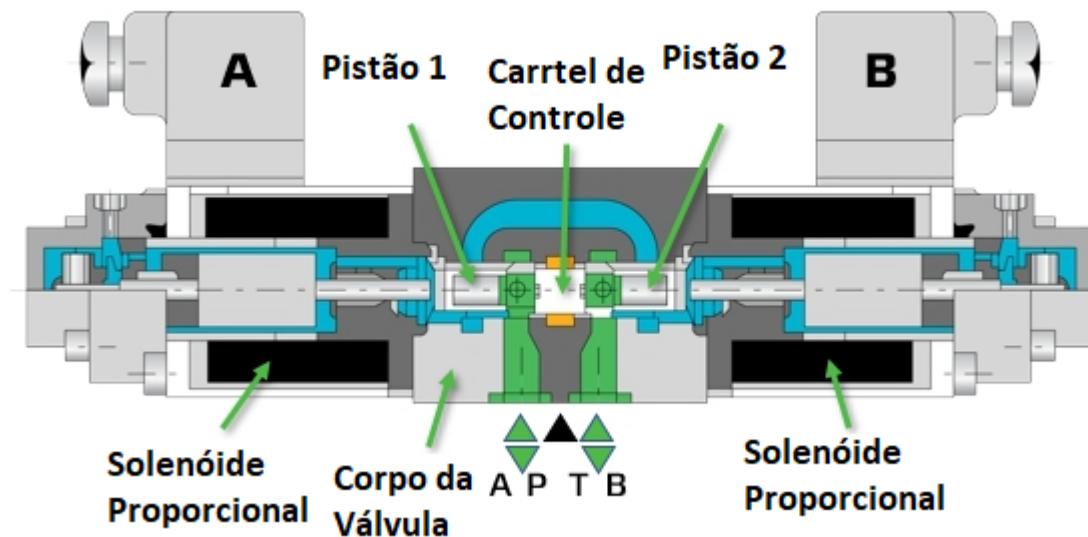
Figura 9 – Válvula solenoide



Fonte: Revista Manutenção, 2018.

Importante citar as válvulas de controle proporcional (Figura 10) que são aquelas que combinam a precisão das válvulas tradicionais com a versatilidade da automação digital. Trata-se de válvulas que fazem uso de atuadores eletrônicos para adequar o fluxo de modo contínuo e assim melhorando a eficiência do sistema (Bates, 2020).

Figura 10 - Válvula de controle proporcional



Fonte: Cordeiro, 2022.

Compreende-se, assim, que cada tipo de válvula de controle traz aspectos específicos que norteiam a sua aplicabilidade nos processos industriais quando se faz uma escolha adequada do modelo imaterial passa-se por assegurar um desempenho eficiente e seguro nas operações industriais.

2.4 Funcionamento geral de válvulas de controle

Para que as válvulas de controle consigam desempenhar o seu papel imprescindível na regulação dos fluxos de fluidos em processos industriais o seu funcionamento se ampara na oscilação de passagem do fluido, que tem o controle dado por atuador ao receber os sinais de um controlador do processo (Braga, 2018).

De acordo com a Cordeiro (2022), a referida regulação é o que possibilita garantir a eficiência operacional e da segurança aos sistemas industriais. O autor explica que o princípio básico da dinâmica das válvulas de controle contempla a

modulação da abertura do obturador possibilitando adequação da vazão de acordo com a demanda do processo.

Nessa linha de raciocínio, Bressan, Silva e Endo (2020) esclarecem que a modulação pode se dar de modo linear em igual percentual ou abertura rápida, de acordo com a aplicação específica. As válvulas de controle podem ter a sua operação dada de modo manual mediante os volantes ou alavancas, ou de modo automático, fazendo o uso de atuadores pneumáticos elétricos ou hidráulicos.

Bates (2020) esclarece que os atuadores pneumáticos são utilizados com maior frequência, em razão da sua rápida resposta e operação simplificada. O posicionador é um elemento determinante para o funcionamento das válvulas de controle automáticas, uma vez que é ele que assegura que a posição da válvula corresponde ao sinal do controle recebido. Assim sendo, a utilização de posicionadores acaba por melhorar a precisão e a estabilidade do sistema reduzindo as variações indesejadas.

Como indicado no estudo de Cordeiro (2022), é preciso ter atenção também com sinal de controle que faz o acionamento da válvula. Este, por sua vez, pode ser analógico ou digital. Contudo, na indústria moderna, protocolos de comunicação como Hart e Fieldbus possibilitam a integração de válvulas inteligentes juntamente com sistemas de automação, de modo a viabilizar o monitoramento remoto e alcançar diagnósticos preditivos.

Segundo Cordeiro (2022), as válvulas de controle podem ter a sua operação dada em modos distintos como controle de pressão, temperatura e vazão. Os autores mencionam que, a depender da variável do processo controlado, a válvula pode receber sinais de sensores e transmissores que fazem um ajuste automático da sua posição para a manutenção do sistema no escopo dos parâmetros definidos.

Ressalta-se que o tempo de resposta das válvulas de controle tem uma dependência com diferentes fatores, a citar: o tipo do atuador e a carga dinâmica do sistema. Sendo assim, as válvulas com atuadores elétricos seguem uma tendência de contar com tempos de resposta mais lentos que as pneumáticas. Contudo, elas oferecem maior exatidão no controle.

A cavitação e o *flashing* são apontados como fenômenos que podem implicar no funcionamento das válvulas de controle, pois são problemas que acontecem quando se tem alterações mais bruscas de pressão do fluido provocando danos ao obturador e as sedes da válvula.

Com relação à manutenção preventiva das válvulas de controle, Moura, Santos e Lima (2021) assinalam que se trata de uma questão imprescindível para o seu pleno funcionamento e vida útil. As inspeções periódicas e os testes operacionais são o que auxilia na identificação de desgastes e falhas antes que se tenha comprometimento do processo produtivo.

Uma questão de suma importância para o pleno desempenho das válvulas de controle é a sua calibração, pois verificar a resposta do atuador e do posicionador, assim como ajustar o sinal de controle, são ações esperadas para garantir que a válvula tenha operação dentro dos parâmetros pré-definidos.

Fica evidenciado que o funcionamento eficiente das válvulas de controle é uma questão que merece atenção por parte dos profissionais envolvidos para que se alcance a confiabilidade e a segurança nos processos industriais. Escolher de maneira adequada o tipo de válvula, proceder com adequada calibração e manutenção preventiva, são ações estratégicas essenciais para o desempenho utilizado do sistema de controle de fluxo.

2.5 Virtualização de Laboratórios Didáticos e Interfaces Homem-Máquina (IHM)

A virtualização de plantas experimentais por meio de arquiteturas web de página única (SPA) denota o estado da arte no ensino de engenharia. A transposição de modelos dinâmicos diferenciais para laços de computação em tempo real possibilita a reprodução, em ambiente digital, de fenômenos de transporte de fluidos e atuações de campo. De modo que o processo didático seja efetivo, a literatura técnica orienta a necessidade de construir interfaces gráficas baseadas nos conceitos de IHMs industriais e sistemas SCADA (Liu et al., 2021).

De acordo com Chen, Zhao e Jiao (2026), o uso de linguagens nativas da internet (HTML5, CSS3 e JavaScript) permite criar painéis de controle responsivos, animações de fluxo em tempo real e atualizações instantâneas de variáveis de processo. O referido arranjo digital imersivo replica as condições psicológicas e operacionais de uma sala de controle real, de maneira assegurar a fidelidade pedagógica necessária para a formação de operadores e engenheiros.

A concretização de ambientes virtuais interativos no ensino técnico surge como resposta direta às severas restrições orçamentárias e espaciais que tangenciam as instituições contemporâneas como explicam Chen et al. (2024). Assim como

também apontam Silva *et al.* (2015), o alto custo de aquisição, calibração e manutenção corretiva de plantas hidráulicas no alcance industrial prejudica a democratização do acesso experimental individualizado.

Sob essa perspectiva, a transposição das bancadas físicas para o domínio de simuladores digitais remove barreiras geográficas e operacionais, mitigando simultaneamente os riscos de acidentes com fluidos pressurizados ou avarias catastróficas em atuadores. Nesse interim, o erro/equívoco do estudante deixa de representar um ônus financeiro ou um perigo à integridade física, convertendo-se em uma etapa construtiva e pedagogicamente segura do aprendizado de automação.

A migração de *softwares* de simulação locais e proprietários para arquiteturas computacionais centralizadas na internet representa um divisor de águas na portabilidade educacional. Em uma linha de tempo, laboratórios computacionais dependiam de *thick clients* ou de pesadas dependências de compilação local de terceiros (p. 17). Ao adotar soluções baseadas em aplicações web de página única (*Single Page Applications* — SPA), o escopo do processamento dinâmico passa a ser executado nativamente no motor de renderização do navegador do cliente.

De acordo com a análise de desenvolvimento de ferramentas instrucionais mencionada por Yang *et al.* (2017), as tecnologias HTML5 e JavaScript provêm os recursos ideais para a estruturação de linhas de código que rodam sem necessidade de *plugins*, promovendo acessibilidade irrestrita por meio de múltiplos dispositivos e plataformas operacionais.

A infraestrutura lógica desse modelo reside na discretização algorítmica de equações dinâmicas que governam o comportamento macroscópico dos fluidos. Carvalho (2011) expõe que, de maneira que um artefato computacional virtual detenha validade acadêmica, seus laços internos de execução precisam traduzir as leis fundamentais de conservação de massa e energia em passos iterativos estáveis. A modelagem das restrições de carga e atrito localizados na tubulação, quando detalhada por modelos diferenciais clássicos e executada em loops contínuos de tempo de ciclo fixo, garante que o simulador responda de forma fidedigna às transições de regime. Seguir as diretrizes teóricas estabelecidas por Ogata (2010) permite transpor para o ambiente algorítmico as constantes e os tempos mortos que caracterizam os atrasos de transporte observados no ecossistema físico real.

A experiência imersiva e a assimilação de competências técnico-operacionais são potencializadas quando a interface do simulador replica estritamente

as características visuais dos sistemas supervisórios industriais de mercado (*Supervisory Control and Data Acquisition* — SCADA). Segundo Franchi (2011), o contato antecipado com telas operacionais estruturadas sob os preceitos de clareza, alarmes e gerenciamento visual de variáveis acelera a transição do estudante rumo ao ambiente de chão de fábrica. Nessa linha de pensamento, Yang et al. (2017) apontam que a inserção de elementos visuais dinâmicos que simulam o escoamento cromático da água em relação ao grau de abertura do obturador da válvula reproduz o *feedback* cognitivo necessário para a formação de operadores de processos automatizados. Portanto, a coerência visual entre o simulador e os painéis SCADA atua como um catalisador de familiarização funcional.

Superando a simples visualização estática, a incorporação de ferramentas gráficas de tendência histórica em tempo real qualifica a análise analítica crítica do comportamento em malha fechada. A articulação de bibliotecas abertas especializadas em renderização de dados vetoriais na web possibilita correlacionar instantaneamente o distúrbio inserido, o sinal de controle computado e a respectiva variável de processo. O referido monitoramento contínuo é determinante para que se compreenda empiricamente os efeitos de sobre-sinal (*overshoot*) e os tempos de estabilização resultantes da calibração fina das componentes proporcional, integral e derivativa (Reynoso-Meza et al., 2019).

Na concepção clássica defendida por Astrom e Murray (2020), a visualização concomitante de curvas temporais e modelos teóricos mitiga o distanciamento conceitual da disciplina, concretizando as não linearidades estruturais inerentes às válvulas de controle.

Nesse raciocínio, a virtualização integral consolida-se como um vetor alinhado aos ditames da Indústria 4.0 ao introduzir os discentes ao conceito de gêmeos digitais (*Digital Twins*). Wang et al. (2021) apontam que a interconectividade estimulada pelas linguagens nativas de internet abre portas para que lógicas de controle avançadas operem de maneira distribuída na rede. Para além de pretender anular a relevância das práticas de laboratórios mecânicos locais, a simulação estruturada antecede e enriquece a jornada cognitiva, provando reduzir custos sistêmicos gerais ao mesmo tempo em que eleva a eficiência operacional pedagógica. Assim sendo, o protótipo virtual se consolida como uma plataforma experimental perfeitamente rastreável, rigorosa e adequada às exigências de ensino contemporâneas.

2.6 Softwares de simulação para construção de protótipos

O uso de *softwar* de simulação para desenvolver protótipos vem sendo uma prática cada vez mais disseminada na área da engenharia e da indústria. Santos *et al.*, (2021) descrevem que os referidos programas possibilitam a modelagem, análise e teste do sistema antes que seja feita a construção física do projeto. Assim, pode-se antever as dificuldades, os pontos críticos e reduzir os custos envolvidos, otimizando o processo em si.

Em relação as ferramentas computacionais, os *softwares* de a simulação são expostos por Oliveira (2020) possibilitando criar ambientes virtuais e a realização de testes e validação dos projetos, antes que seja implementado o seu protótipo físico. Portanto, alcança-se a avaliação do desempenho, a identificação de falhas e a necessidade ou não de se adequarem os parâmetros que foram definidos previamente. Ou seja, medidas que refletem uma maior eficiência no desenvolvimento de produtos e sistemas.

Diferentes áreas do conhecimento fazem uso da simulação para prototipagem dos componentes e processos industriais. Silva e Almeida (2019) deram destaque ao setor automotivo, eletrônico, de automação industrial, aeroespacial, dentre outros, que angariam benefícios expressivos dessas tecnologias quando se viabilizam os ajustes necessários e as previsões de comportamento.

Dentre os mais importantes *softwares* de simulação para prototipagem, destacam-se MATLAB/Simulink; SolidWorks; Asys, Labview; FluidSIM. Ressalta-se que cada um deste *softwares* conta com aspectos específicos e aplicações distintas sendo amplamente utilizados no desenvolvimento de novos produtos e sistemas. Em relação ao MATLAB/Simulink, este refere-se a um dos programas mais populares no âmbito acadêmico e industrial, com o uso para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. Costa *et al.*, (2022) assinalam que o seu uso é amplo em análise de sistemas de controle permitindo que se criem algoritmos e simulações em tempo real.

O Solidworks é citado por Flores-Bugacho *et al.*, (2022) como *softwar* direcionado a modelagem 3D e simulação mecânica, largamente em uso na engenharia mecânica e de manufatura. Rodrigues e Lima (2021) destacam que o programa possibilita criar protótipos digitais, tornando mais fácil que se verifique a estrutura e a análise do desempenho dos componentes.

Sobre o ANSYS Moura e Almeida (2020) descrevem como um instrumento de grande importância na análise estrutural e dinâmica dos fluidos. O referido programa é essencial nas simulações complexas que envolvem transferência de calor, resistência mecânica e comportamento aerodinâmico. Os autores também citam o Labview, que teve desenvolvimento dado pela National Instruments, empregado para simular e controlar processos industriais.

Nakamura *et al.*, (2021) reforçaram a capacidade de integração do hardware e *softwar* deste programa de modo a propiciar a automação de testes e experimentos. O *softwar* chamado FluidSIM é especializado na simulação de sistemas pneumáticos e hidráulicos, comumente empregado para ensino e desenvolvimento de sistemas de automação. Harris *et al.*, (2021) destacaram a interface gráfica intuitiva que torna mais fácil criar e analisar circuitos de controle de fluidos por meio deste programa.

Contudo, é necessário repensar o que é preciso ser feito para alcançar uma operação eficiente desses *softwares*, que demanda conhecimento técnico específico e treinamento adequado. Os usuários necessitam ter compreensão dos princípios da modelagem matemática e da simulação para que possam interpretar, de maneira correta, os resultados e tomar decisões amparadas em saber técnico para desenvolver protótipos (Martins, Figueiredo; Rocha, 2024).

Para uma adequada escolha do *softwar*, existe uma dependência de critérios do projeto e das demandas do usuário. Zhang *et al.*, (2021) apontaram fatores como precisão da simulação, facilidade de uso, alinhamento com demais sistemas para serem repensados na seleção do dispositivo mais adequado.

Na esfera da automação industrial, *softwares* de simulação são imprescindíveis para que se desenvolvam bancadas didáticas. Chen *et al.*, (2021) sustentam que, viabilizar testes distintos para configurações e parâmetros, antes de construir fisicamente os projetos, resulta em uma diminuição drástica de erros e falhas otimizando o processo do aprendizado.

Na simulação de uma bancada didática de válvulas de controle a recomendação para utilização do MATLAB/Simulink para modelagem do comportamento dinâmico das válvulas, bem como o FluidSIM pode ter seu uso para simular circuitos pneumáticos e hidráulicos. Oliveira e Nascimento (2021) defendem combinar estes *softwares* para permitir a análise das respostas das válvulas em condições operacionais distintas.

Simular previamente um protótipo de bancada didática permite identificar falhas e melhorias no projeto antes da construção de fato. Pereira e Souza (2022) mencionam que a referida tratativa diminui custos e tempo de desenvolvimento, levando a uma maior precisão dos resultados. É nesse sentido que é preciso repensar os avanços da indústria 4.0, especialmente no que se refere a integração de *softwares* de simulação com sensores e inteligência artificial, visto que são recursos que ampliam as possibilidades de desenvolvimento de protótipos inteligentes.

Tal abordagem aceita adequações automáticas e previsão de falhas com maior rigor. Contudo, *softwares* de simulação respondem por uma função imprescindível na construção dos protótipos quando proporcionam um ambiente seguro e eficiente para os testes de validação de sistemas a aplicabilidade. No desenvolvimento de bancadas didáticas de válvulas de controle é só mais um exemplo dos benefícios que a referida tecnologia pode trazer para o aperfeiçoamento da educação e da pesquisa em automação industrial Zhang *et al.*, (2021).

3 METODOLOGIA

Nesta proposta de investigação, adotou-se uma abordagem de natureza aplicada, com foco no desenvolvimento de um simulador computacional que se baseia em interface web interativa para o ensino de controle de vazão. Sendo assim, o presente estudo se alinha à demanda mais evidente em relação às ferramentas educacionais que denotem a dinâmica de plantas industriais em ambientes puramente virtuais, viabilizando um aprendizado imersivo e controlado a partir de modelos matemáticos acoplados.

A simulação computacional, tal como elucidado por Carvalho (2011), emerge como um pilar fundamental na formação de engenheiros, ao permitir a exploração de fenômenos dinâmicos e a validação de estratégias de controle em um contexto seguro e replicável, estabelecendo uma ponte entre a fundamentação teórica e a aplicação prática.

3.1 Tipo e Abordagem da Pesquisa

O estudo aqui realizado classifica-se como uma pesquisa de desenvolvimento tecnológico, com foco na criação de um artefato computacional que processa algoritmos de automação e controle de vazão. A metodologia que se seguiu aqui, priorizou a engenharia de *software* para a construção de um ambiente virtual cujas respostas amparam-se nas equações clássicas da mecânica dos fluidos e da dinâmica de processos industriais.

A delimitação do escopo para uma plataforma 100% digital, sem a necessidade de acoplamento a um aparato físico ou de hardware, justifica-se pela otimização de recursos institucionais, pela flexibilidade na parametrização matemática instantânea do sistema e pela capacidade de reproduzir cenários de falhas críticas de forma segura, contornando os limites operacionais e os custos de manutenção inerentes às bancadas físicas de laboratório.

3.2 Arquitetura e Tecnologias do Simulador Virtual Web

A arquitetura do protótipo simulado foi concebida como uma aplicação web de página única (SPA), empregando as tecnologias fundamentais da web: HTML, CSS

e JavaScript. O HTML (HyperText Markup Language) foi utilizado para a estruturação semântica da interface, organizando os elementos visuais em seções distintas que representam o painel de controle, o esquema hidráulico da bancada e a área de supervisão (Anexo III). O CSS (*Cascading Style Sheets*) foi responsável pela estilização completa do ambiente, conferindo-lhe um aspecto visual inspirado em sistemas supervisórios industriais (SCADA/HMI).

Detalhes como esquemas de cores, responsividade para adaptação a diferentes resoluções de tela, efeitos de sombra e animações foram cuidadosamente implementados para replicar a estética e a funcionalidade de interfaces industriais. A implementação do código-fonte contemplou a utilização de variáveis nativas CSS (*custom properties*) para a gestão dinâmica de temas (claro e escuro) e a aplicação de funções matemáticas de estilo como *clamp* para o escalonamento fluido de tipografias e espaçamentos, garantindo uma experiência de usuário consistente e tecnicamente alinhada aos padrões de interfaces de controle modernas, onde a clareza e a legibilidade são cruciais para a operação segura e eficiente .

3.3 Modelagem e Lógica de Simulação

A dinâmica do processo hidráulico foi implementada por meio de rotinas em JavaScript, constituindo o núcleo de execução do sistema. A cada ciclo de varredura digital, o algoritmo resolve numericamente as variáveis de processo, tais como vazão volumétrica pontual, perda de carga distribuída e nível do reservatório, utilizando modelos matemáticos determinísticos fundamentados na literatura técnica. Esses modelos consideram os coeficientes hidrodinâmicos nominais da planta virtual, incluindo a geometria dos reservatórios, as propriedades do fluido e a influência das posições das válvulas de controle (principal, *bypass* e restrição de carga).

A representação dessas interações permite que o simulador reflita com fidelidade as não-linearidades e as respostas transitórias típicas de sistemas hidráulicos, proporcionando um ambiente realista para a análise do comportamento do processo sob diferentes condições operacionais.

3.4 Implementação do Sistema de Controle

O protótipo oferece dois modos de operação para o controle da vazão: manual e automático. No modo manual, o usuário detém o controle direto sobre a abertura da válvula principal, permitindo a observação imediata do impacto de suas ações nas variáveis do processo. Essa funcionalidade é crucial para o entendimento da relação causa-efeito em sistemas de controle. No modo automático, o software do simulador executa a discretização de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), rotina algorítmica amplamente empregada na indústria para a regulação de processos contínuos. O controlador PID atua computando numericamente o sinal de controle (MV) a partir da diferença instantânea (erro) entre o valor de referência (*setpoint*).

O controlador PID atua calculando um sinal de controle a partir do erro entre o *setpoint* (valor de vazão desejado) e a variável de processo (vazão medida), ajustando a abertura da válvula principal para minimizar essa diferença. A implementação do PID segue os princípios clássicos da teoria de controle, conforme detalhado por Ogata (2010), permitindo a análise dos termos proporcional, integral e derivativo e seus efeitos na resposta do sistema, como tempo de subida, *overshoot* e erro em regime permanente.

3.5 Recursos e Validação da Interface

Para enriquecer a experiência didática e facilitar a análise do processo, o *softwar* incorpora uma série de recursos interativos. A alternância entre os modos manual e automático, o ajuste do *setpoint* e o controle das válvulas são funcionalidades que permitem ao usuário explorar diferentes cenários de operação. A animação do fluxo hidráulico proporciona uma representação visual intuitiva da movimentação do fluido, enquanto a atualização em tempo real dos indicadores numéricos e gráficos oferece um feedback contínuo do estado da simulação.

Um componente essencial para a validação e análise é o gráfico de tendência, implementado com a biblioteca Chart.js, que exibe a evolução temporal do *setpoint*, da vazão e do sinal de controle. Este recurso permite ao estudante diagnosticar o desempenho do controlador, identificar oscilações, tempos de estabilização e a eficácia das estratégias de controle em malha fechada. Além disso,

o sistema conta com botões interativos para iniciar e resetar o laço numérico, seletores de tema visual e sinalizações de estado operacional síncronas (parado, executando, estável ou em transição transiente), consolidando o ambiente virtual desenvolvido como uma ferramenta pedagógica autossuficiente e robusta para o ensino de conceitos de controle de processos.

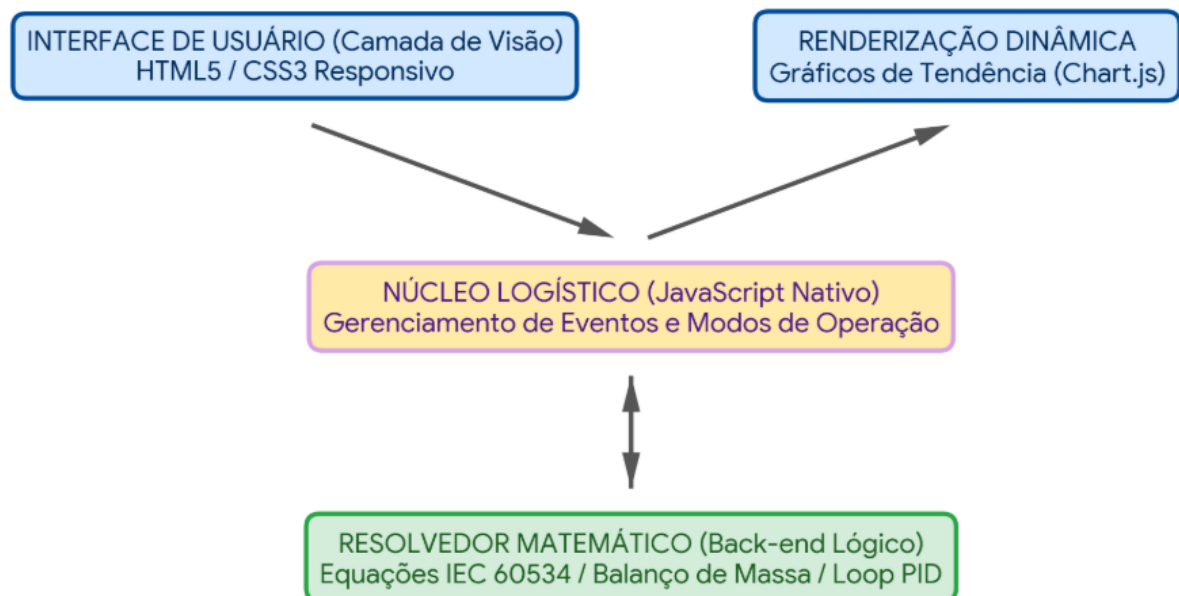
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo traz a descrição da construção da banca didática com seus dados técnicos reais e dimensões adotadas.

4.1 Protótipo desenvolvido, finalidade e aplicação

O produto desenvolvido neste trabalho refere-se a um protótipo de simulador virtual interativo de uma bancada didática para controle de vazão, implementado sob a arquitetura de uma Aplicação Web de Página Única (*Single Page Application*, SPA) e exemplificado por meio de sua interface gráfica na Figura 11. O sistema emula computacionalmente o comportamento dinâmico de dois reservatórios interligados por uma linha de escoamento lógico, contendo um elemento digital de restrição que atua como a válvula de controle no ponto central do fluxo virtual. As informações inseridas no software de modo complementar e amparar a simulação estão dispostas no Anexo I.

Figura 11 – Diagrama de blocos de arquitetura do simulador SPA



Fonte: Elaborado pelo autor.

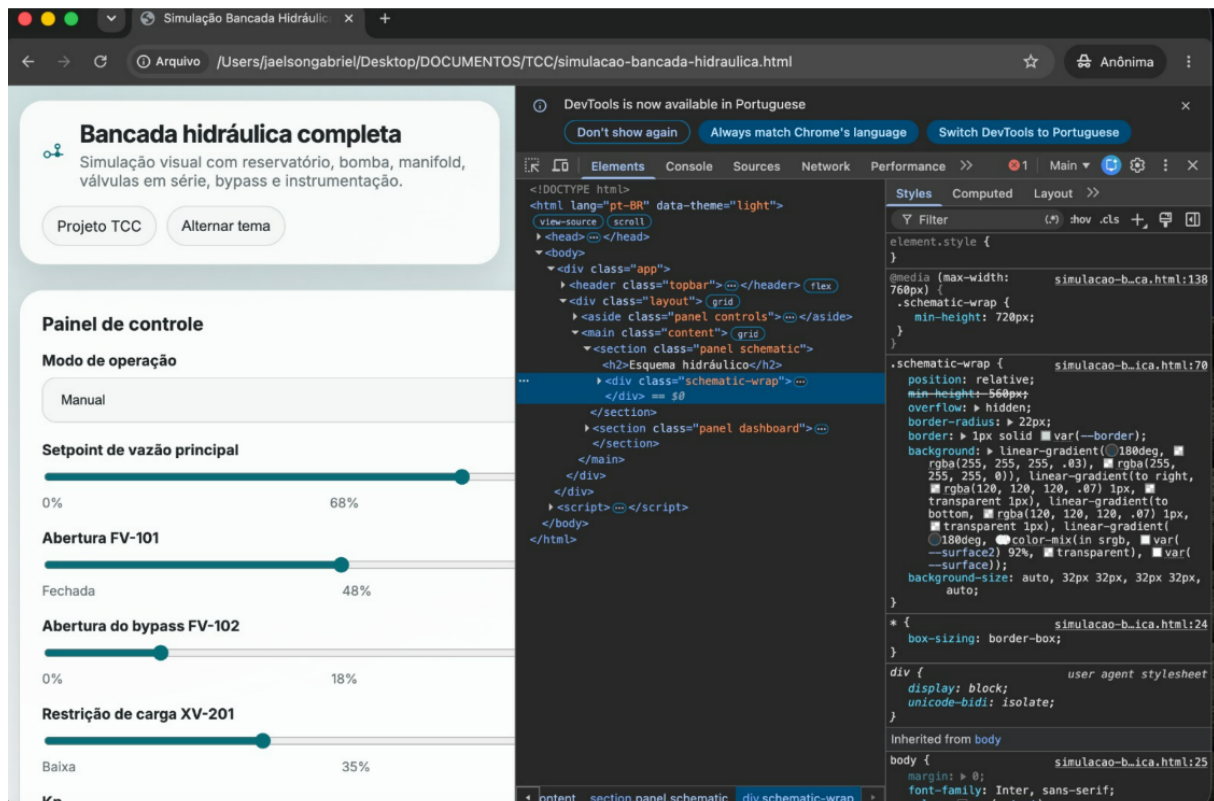
O propósito, sob a perspectiva da engenharia de software e controle, não reside em uma montagem mecânica, mas na modelagem e na codificação algorítmica

completa do arranjo experimental. Isso contempla o equacionamento hidrodinâmico, a parametrização geométrica virtual do conjunto, a faixa operacional de vazão simulada e os laços de automação integrados nativamente no código-fonte. Tal tratativa assegura a rastreabilidade das decisões de projeto computacional e justifica os modelos numéricos adotados, mantendo estrita coerência com os rigorosos objetivos didáticos propostos nesta pesquisa.

Ressalta-se que o simulador computacional foi projetado para reproduzir matematicamente um laço dinâmico de controle de processos, no qual a variável manipulada lida pelo algoritmo é o percentual de abertura da válvula digital (*MV*) e a variável controlada é a vazão volumétrica calculada de água (*PV*). O amparo conceitual obedece à terminologia e às equações de dimensionamento validadas pela literatura internacional para atuadores de controle em processos industriais, especificamente a família de normas IEC 60534. As equações de ganho e perda de carga prescritas por essa norma foram transpostas diretamente em funções lógicas de programação no código-fonte.

Sob a perspectiva de aplicação, a bancada é utilizada em laboratórios de Controle e Automação, Instrumentação e Controle de Processos, uma vez que possibilita a execução de testes estruturados contemplando a variação de *setpoint*, análise de regime constante, alcance de curvas estáticas (vazão × abertura), respostas ao degrau e sintonia de controladores (Figura 12).

Figura 12 – Visão do *setpoint* de vazão principal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a literatura de referência, em bancadas didáticas aplicadas ao cenário do ensino de engenharia, em igual finalidade desponta como motivação para validar modelagens e facilitar a visualização do sistema para controle de nível e vazão com modelagem 3D, confirmando a pertinência do tema e do arranjo de bancada como destacaram e Gardel *et al.* (2012).

Verifica-se que a principal contribuição técnica do simulador proposto reside em sua modularidade puramente digital. A arquitetura de software foi desenhada com padrões de projeto orientados a objetos, possibilitando que o usuário altere instantaneamente o tipo de elemento final de controle (selecionando entre curvas características lineares, de igual percentual ou atuação *on/off*) por meio de botões na interface de usuário, mantendo estável a rotina matemática da planta hidráulica de fundo. Essa flexibilidade algorítmica permite ao discente confrontar fenômenos práticos relevantes sem riscos operacionais, tais como a não linearidade intrínseca do atuador, saturação de comandos, tempos mortos digitais e os limites dinâmicos da malha de controle, corroborando as observações pedagógicas de Garcia (2021).

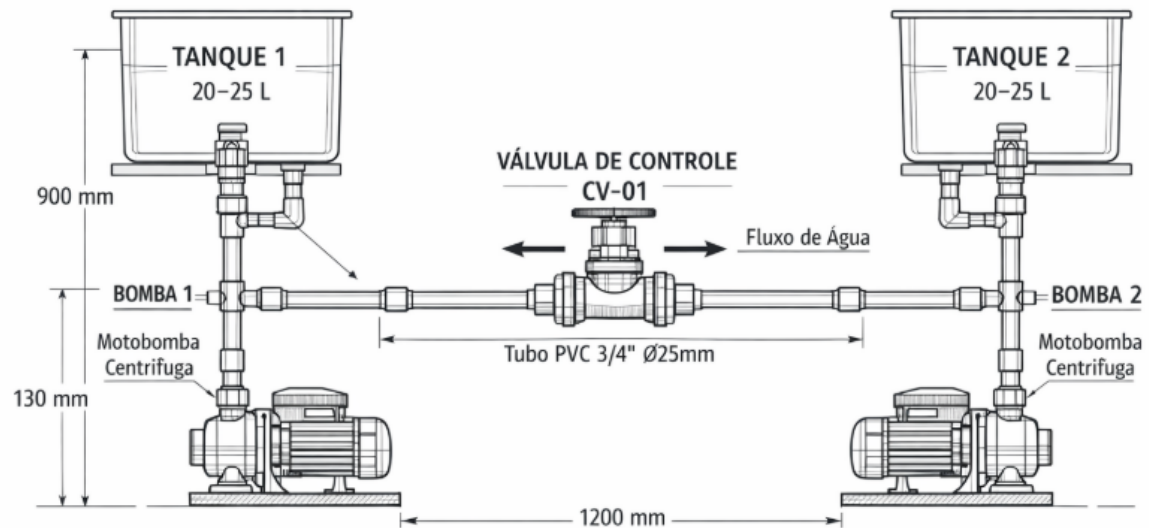
A modelagem virtual do escoamento de água e a simulação de atuadores comerciais de baixa potência mostram-se coerentes com os objetivos de um laboratório digital que prioriza a eliminação total de riscos mecânicos, facilidade de manutenção de código e absoluta repetibilidade experimental. O mérito de engenharia reside no dimensionamento e na inserção de parâmetros físicos confirmáveis nas equações do software, tais como os limites teóricos de pressão de serviço de tubulações comerciais de PVC e as curvas reais de bombas hidráulicas, assegurando que o simulador opere estavelmente sob as mesmas restrições e margens de segurança observadas no comportamento físico real.

Deste modo, o produto final desta pesquisa transcende um arranjo mecânico convencional, consolidando-se como uma plataforma experimental em ambiente digital e totalmente rastreável. A sua documentação e estrutura de código atendem às demandas de validação técnica fundamentadas nas equações da norma IEC 60534, nas constantes e perdas de carga extraídas de fichas técnicas de tubulações, e nas especificações de controle digital clássico por meio de algoritmos PID discretizados em JavaScript.

4.2 Arquitetura hidráulica e princípio físico de operação

A representação esquemática do simulador baseia-se em dois tanques virtuais (*TQ-01*) e (*TQ-02*) espacialmente dispostos nas extremidades da tela de operação. No algoritmo, os tanques são modelados como acoplados por equações de balanço de massa por meio de uma linha de fluxo digital, onde a válvula de controle (*CV-01*) assume a função de restrição central regulável (Figura 13).

Figura 13 – Diagrama da bancada didática a ser simulada

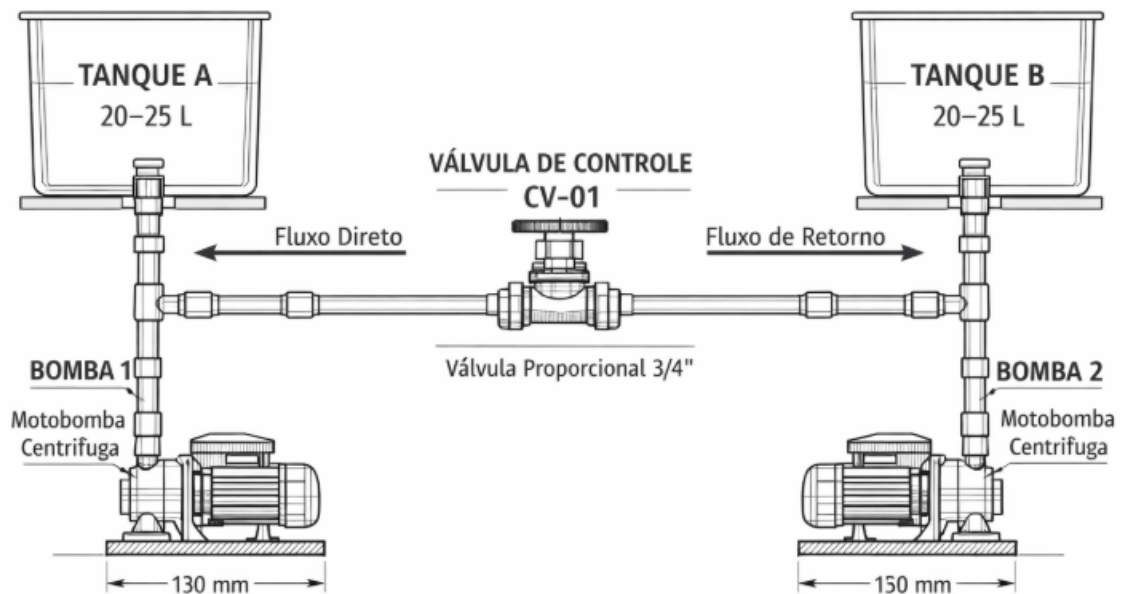


Fonte: dados da pesquisa, 2026.

A escolha pedagógica por essa topologia (dois reservatórios virtuais e uma linha com elemento restritivo) confere solidez didática ao software, pois permite ao discente monitorar graficamente os balanços energéticos do sistema em tempo real, compreendendo como as funções de bombeamento adicionam carga manométrica virtual, enquanto a equação do obturador dissipa energia e o fluxo numérico responde conforme as leis de conservação hidráulica.

O princípio dinâmico emulado consiste em uma recirculação controlada em malha lógica. O algoritmo da bomba simula a imposição de uma diferença de pressão que impulsiona o escoamento no código, ao passo que a função que rege a válvula altera o coeficiente de perda de carga localizada instantânea em função do sinal de controle recebido, regulando numericamente a vazão. Sob a ótica pedagógica, a aplicação permite estudar em ambiente protegido o fato de que a relação entre a abertura do obturador digital e a vazão resultante é inerentemente não linear em grande parte da faixa de operação, exigindo que o algoritmo PID compense tais variações para estabilizar o processo virtual em malha fechada (Figura 14).

Figura 14 – Fluxo hidráulico entre tanques e válvula



Fonte: dados da pesquisa, 2026.

Para garantir o embasamento técnico do simulador, o equacionamento hidráulico inserido na lógica computacional modela os perfis de velocidade considerando o comprimento linear equivalente a trechos retos ideais a montante e a jusante do elemento restritivo. Desse modo, o código anula matematicamente as flutuações e turbulências caóticas imediatas causadas por singularidades como curvas e conexões virtuais. Em termos de engenharia de controle, essa estabilização matemática das equações evita desvios ou ruídos excessivos no cálculo numérico da vazão instantânea, garantindo que o algoritmo do controlador analise o sinal sem as instabilidades numéricas que comprometeriam a convergência do loop PID.

Nesse contexto, a lógica computacional do simulador integra modelos matemáticos de duas bombas centrífugas operando em direções opostas de escoamento lógico, servindo como uma ferramenta pedagógica para a inserção de perturbações de carga controladas diretamente pelo usuário na interface gráfica. O estudante pode ativar a bomba secundária via software para injetar uma contra-pressão matemática na simulação, alterando o sentido analítico da transferência de fluidos e desafiando o algoritmo PID a restabelecer o equilíbrio do sistema. Para conferir veracidade empírica a essa dinâmica computacional, a curva característica de desempenho implementada no código-fonte baseia-se na bomba comercial Wilo

Yonos PICO 25/1-6-130, cujos parâmetros hidráulicos nominais ($Q_{\max} = 3,6 \text{ l/h}$, $H_{\max} = 6,0$) e pressão máxima ($PN = 10 \text{ bar}$) foram digitalizados na forma de um polinômio de interpolação matemática, garantindo respostas de pressão e vazão virtuais idênticas às do equipamento industrial físico.

A capacidade hidráulica modelada está perfeitamente ajustada à escala pedagógica digital proposta nesta pesquisa (operando na faixa analítica de litros por minuto), combinada matematicamente a uma tubulação virtual de pequeno diâmetro nominal para simular operações em regimes estáveis e de baixa pressão de cálculo. Evidencia-se que a parametrização matemática dessa bomba impede a ocorrência de instabilidades ou divergências numéricas no algoritmo e fornece a energia manométrica necessária para que as equações de perda de carga do circuito simulado converjam, mantendo os ensaios digitais repetíveis e computacionalmente estáveis.

Dessa maneira, o loop operacional é executado de forma contínua pelo laço lógico do software, simulando o escoamento entre os reservatórios virtuais, com as bombas gerando a carga e a rotina da válvula central regulando a vazão numérica computada. Esse arranjo abstrato possibilita a inserção de pontos de leitura de sensores virtuais em tempo de execução (computando a pressão a montante e a jusante da restrição, bem como a velocidade do fluido), oferecendo ao usuário um ambiente de simulação gráfica de alta fidelidade técnica, equivalente aos critérios metodológicos defendidos por Gardel et al. (2012).

4.3 Dimensões físicas da bancada (escala geométrica)

O dimensionamento geométrico da planta foi transposto para o ambiente de desenvolvimento de software como constantes de volume e escala espacial, traduzindo o arranjo físico em um modelo digital ergonômico, intuitivo e perfeitamente legível na interface de tela do usuário. Adotou-se uma parametrização de volumetria de tanques baseada em uma escala geométrica proporcional a reservatórios reais equivalentes a (1,60 m) de comprimento axial, (0,60 m) de profundidade e (0,90) de altura de coluna líquida limite.

Essas dimensões virtuais foram fixadas na folha de estilos (CSS3) e no arquivo de variáveis globais do JavaScript para assegurar a renderização em escala dos tanques e das linhas de escoamento, garantindo que a instrumentação digital e os gráficos gerados pela biblioteca Chart.js atualizem as variáveis sem interferir na

visualização da dinâmica hidráulica. No que tange ao comprimento modelado de (1,60 m) para a tubulação lógica, esse parâmetro atua diretamente no cálculo dinâmico da perda de carga ao longo do trecho linear.

No design da interface de usuário, as dimensões equivalentes a uma profundidade de 0,60 m foram transpostas como restrições de posicionamento em profundidade z-index e layout visual, garantindo o espaçamento estético adequado entre os componentes digitais na tela, mitigando sobreposições de elementos gráficos energizados (como os botões de acionamento das bombas) com os vetores das tubulações.

No contexto de um laboratório digital de engenharia, os alunos necessitam de uma barreira psicológica de legibilidade; portanto, o layout visual foi projetado para reduzir o erro cognitivo operacional na tomada de ações rápidas pelo navegador. A altura proporcional correspondente a 0,90 m foi traduzida para os critérios de ergonomia de software e usabilidade web, projetada para visualização direta em telas de monitores padrão em desktops de laboratório.

Na perspectiva de uma banca rigorosa, registra-se que a ergonomia de telas e a experiência do usuário (UX) configuram-se como requisitos funcionais fundamentais, permitindo a repetibilidade estável dos ensaios em turmas extensas, em consonância com as diretrizes de Martins, Figueiredo e Rocha (2024). Adicionalmente, enquanto o arranjo físico industrial remete a estruturas em aço carbono, alumínio estrutural ou perfis modulares, o simulador abstraiu esse suporte mecânico em uma arquitetura de renderização leve utilizando folhas de estilo CSS3. As antigas travessas rígidas de fixação de bombas e suportes de tanques operam no código como nós lógicos de fixação matricial de coordenadas bidimensionais. Essa modularidade de design de interface gráfica alinha-se conceitualmente às demandas modernas de laboratórios virtuais rastreáveis, em simetria com as formulações pedagógicas defendidas por Marques et al. (2017).

Desta maneira, tem-se que a escala geométrica matemática mostrou-se perfeitamente compatível com as proporções visuais de uma planta em tamanho real transposta para o monitor. O ecossistema de software proposto prescinde de transportes mecânicos de hardware e abriga toda a instrumentação de automação em um painel digital lateral síncrono, mantendo o fluxo e as seções de simulação totalmente abertos, nítidos e de fácil observabilidade, fator determinante para os fins didáticos.

4.4 Dimensionamento dos tanques e escala hidráulica (escala de volume e vazão)

O dimensionamento de volumes lógicos dos tanques virtuais foi tratado como uma constante algorítmica essencial de projeto, visto que dita o comportamento dinâmico e o tempo de resposta das equações de estado. Definiu-se por um volume útil matemático parametrizado fixo entre 20 e 25 L por reservatório, o que representa um compromisso estável estabelecido no código para viabilizar a observação analítica de transientes de nível e estabilização de vazão; mitigando erros numéricos de esvaziamento total (sucção nula simulada da bomba) e eliminando paradas de sistema para purga, conforme preceitua Garcia (2021).

Para fins de modelagem computacional implementável, o tanque foi matematicamente equacionado como uma geometria prismática estável de 25 cm × 25 cm de base e 40 cm de altura útil, resultando no volume geométrico teórico na ordem de 25 L. Essa parametrização é ideal para o ecossistema virtual por otimizar as matrizes de cálculo e viabilizar a transposição visual de nível líquido dinâmico em tempo real de forma fluida pela renderização digital na tela.

A escala hidráulica matemática foi estabelecida para operar de modo síncrono com a equação de perda de carga do diâmetro interno modelado. Para conferir fidelidade à instrumentação virtual do software, as funções de transferência de medição basearam-se rigorosamente nas especificações nominais do sensor comercial YF-S201B, cujo *datasheet* técnico real aponta limites de faixa de operação de 1 a 30 L/min e pressão máxima suportada de 1,75 MPa.

Partindo da citada matriz de referência do fabricante, o algoritmo de controle do simulador foi restrito para uma faixa de operação típica estável entre 5 e 25 L/min, asseverando duas condições de engenharia de software: manter a resposta no centro da curva estática do sensor digitalizado com margem de segurança analítica e possibilitar ao estudante a avaliação mais assertiva de sobressinais (*overshoots*) de vazão em tempo de computação. Mantém-se, deste modo, a coerência conceitual entre sensor simulado e malha lógica, provendo plena observabilidade ao sistema.

Importante manter o alinhamento do “sensor-planta” dado que o sistema foi dimensionado para que a instrumentação não seja um gargalo e para que o controle conte com observabilidade. Para consolidar a rastreabilidade das citadas variáveis

nominais, a Tabela 1 reúne as constantes e coeficientes dinâmicos incorporados ao código-fonte do simulador web:

Tabela 1 - Parâmetros de entrada e constantes hidrodinâmicas do simulador virtual

Objeto Lógico	Variável no (JavaScript)	Código	Valor Nominal Atribuído	Unidade	Justificativa Técnica / Ficha de Referência
Tanques Virtuais	VOLUME_MAX_TQ		25.0	Litros (L)	Limite volumétrico geométrico adotado para fins didáticos .
Tanques Virtuais	AREA_BASE_TQ		0.0625	Metros quadrados (m ²)	Área de seção transversal para base prismática de (25 x 25 cm)
Tubulação Lógica	DIAMETRO_NOMINAL		0.75	Polegadas (")	Bitola comercial de referência da malha (3/4")
Tubulação Lógica	DIAMETRO_INTERNO		19.05	Milímetros (mm)	Diâmetro interno útil descontando a espessura de parede de (1,70 mm)
Tubulação Lógica	COMPRIMENTO_EQ		1.60	Metros (m)	Extensão axial da linha para cálculo da perda de carga distribuída
Fluido Simulado	VISCOSIDADE_H2O		1.002e-6	(m ² /s)	Viscosidade cinemática da água pura a 20°C (Regime Newtoniano)
Fluido Simulado	DENSIDADE_H2O		998.2	(kg/m ³)	Massa específica da água fria para cálculo do Número de Reynolds.
Atuador Digital	FAIXA_VAZAO_MAX		30.0	L/min	Limite superior de fluxo baseado no <i>datasheet</i> do sensor YF-S201B
Emulação do CLP	TEMPO_AMOSTRAGEM		100	Milissegundos (m ² /s)	Tempo de ciclo de varredura (<i>scan</i>) emulado para o laço discreto PID.
Emulação do CLP	RESOLUCAO_ADC		27648	<i>Counts</i>	Escala de quantização de inteiros analógicos de 16

	bits	(Padrão Siemens)
--	------	---------------------

Fonte: dados da pesquisa, 2026.

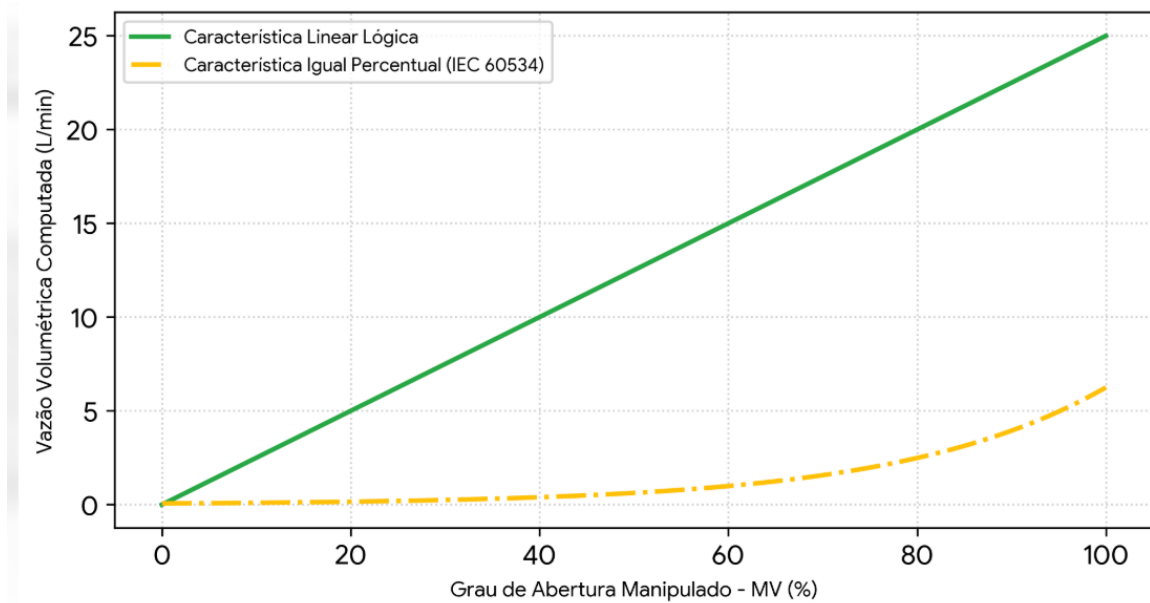
Por fim, a estabilidade das equações no modelo virtual abarcou as pressões nominais limites de tubulações de PVC para água fria sob temperatura ambiente. Sendo as pressões lógicas computadas pelo polinômio da bomba mantêm-se rigorosamente abaixo dos limites típicos das tabelas técnicas, o resolvidor matemático do *software* opera em regime assintótico seguro e conservador, abolindo qualquer risco de estouro de memória ou instabilidade numérica, conservando a representatividade física do fenômeno hidrodinâmico simulado.

4.5 Tubulações e conexões

No caso da modelagem do atrito hidráulico, as constantes de tubulações e conexões foram calculadas com base nas propriedades físicas de componentes de PVC rígido comercial, garantindo a auditabilidade técnica dos coeficientes inseridos no algoritmo do simulador. O uso das tabelas técnicas reais de catálogos industriais de PVC soldável justifica as dimensões de diâmetro e os limites nominais de rugosidade absoluta inseridos na equação de escoamento do software.

Relacionado ao conceito clássico de tubulações didáticas de diâmetro de (3/4"), o código de simulação incorporou a bitola comercial de 25 mm, modelando rigorosamente a espessura de parede de 1,70 mm para determinar com precisão matemática o diâmetro interno efetivo de cálculo hidráulico, parâmetro vital para o equacionamento exato da perda de carga distribuída simulada (Figura 15).

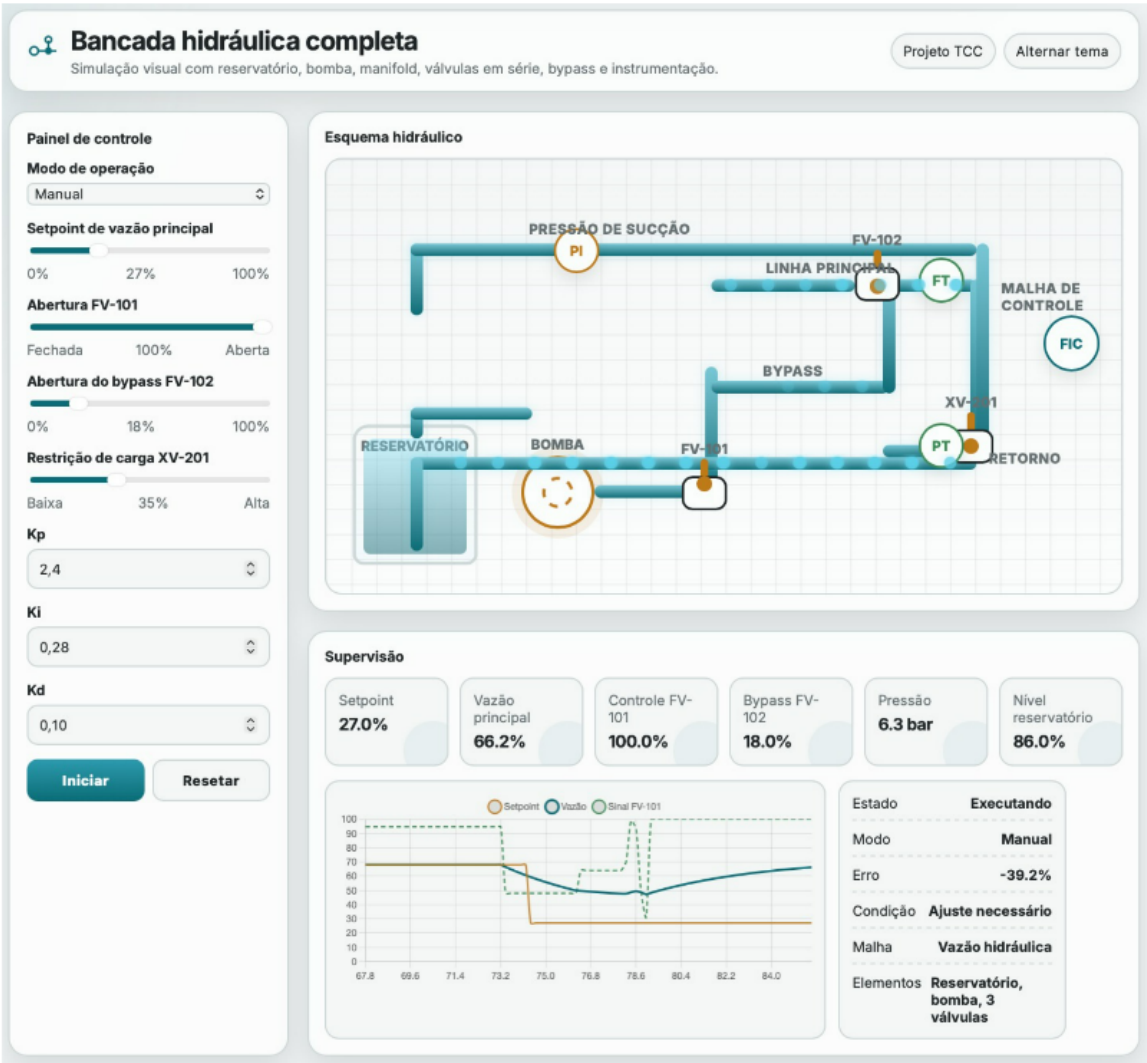
Figura 15 – Curvas características dos elementos finais de controles virtuais



Fonte: dados da pesquisa, 2026.

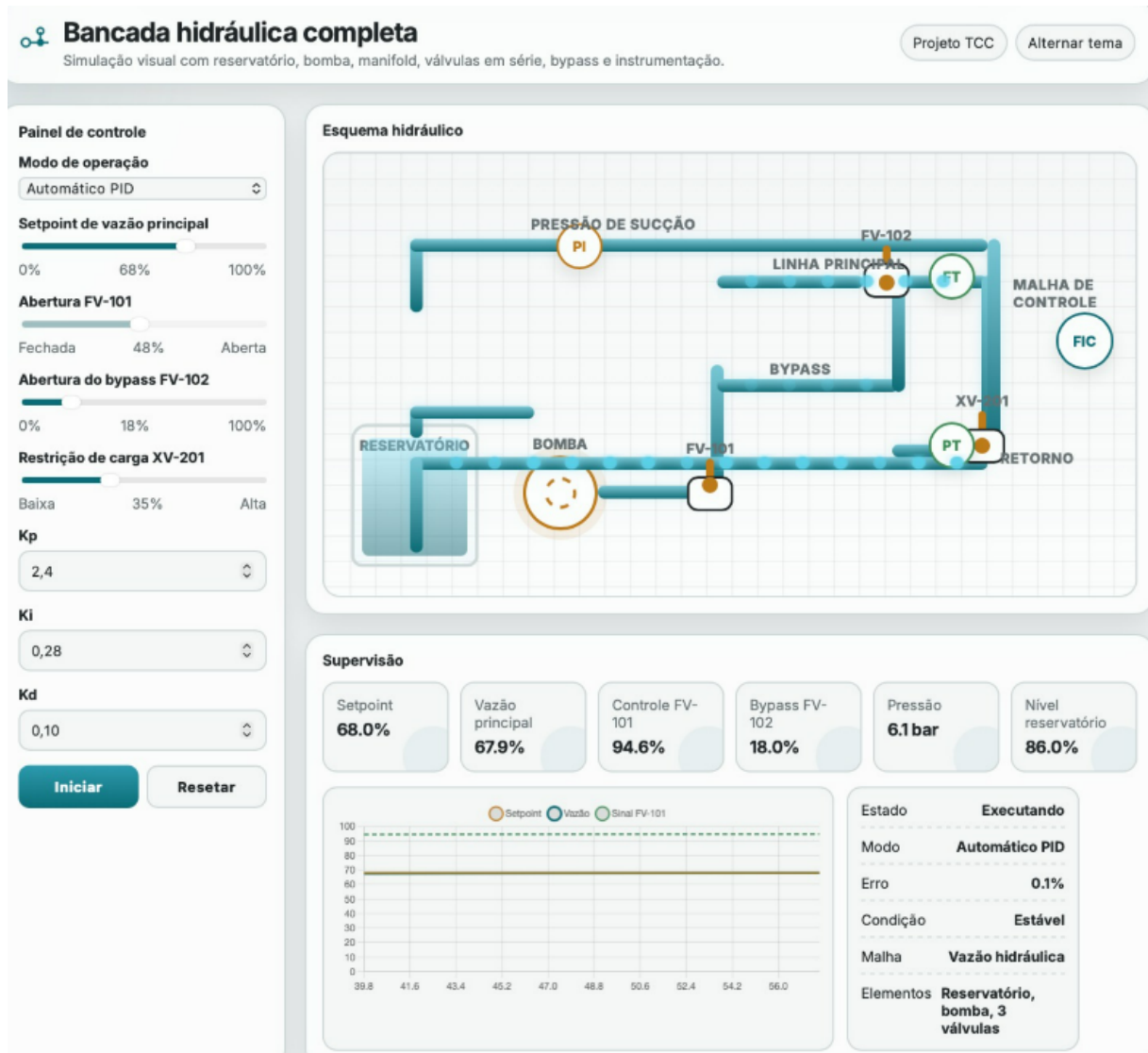
O limite máximo de pressão hidrostática emulado no simulador foi parametrizado com base na pressão nominal de serviço de 750 kPa (7,5 bar) a 20 °C padrão dos catálogos industriais. A inserção desses dados reais como limites de restrição lógica no software dota o texto de caráter estritamente auditável, permitindo que a banca examinadora valide a fidelidade física das respostas de pressão geradas de forma dinâmica no ambiente digital. Uma representação do esquema da bancada hidráulica simulada nos modos de operação manual e automática é mostrada nas Figuras 16 e 17:

Figura 16 – Representação da simulação virtual da bancada completa com operação manual



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Representação da simulação virtual da bancada completa com operação automática



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes de restrição geométrica de conexões foram parametrizados a partir das tabelas de comprimento equivalente de catálogos comerciais (constantes incorporadas ao Anexo II). Dispensando ferramentas de montagem física, aplicação de adesivos químicos ou tempos de cura mecânica, a topologia foi transposta para o software de forma otimizada. Os registros de bloqueio e desvios (*bypass*) operam no código como funções condicionais booleanas (*if/else*), permitindo ao estudante simular a abertura ou o isolamento de trechos do fluxo virtual em tempo de execução,

preservando a repetibilidade matemática e reduzindo a zero o tempo de parada de laboratório.

4.6 Válvula de controle e alternativas de atuação

Considerando a descrição da válvula de controle (CV-01), esta foi definida como o componente central da bancada por significar o elemento final de controle responsável por modular a vazão. Para a manutenção do projeto aderente à prática industrial, a descrição da válvula se ampara em terminologia e considerações gerais consolidadas pela IEC 60534, que descreve válvulas de controle de processos e orienta a utilização de partes correlatas da norma (capacidade, ensaios, dimensionamento). Deste modo, essa referência descritiva não se baseia em descrições genéricas, mas em uma referência normativa reconhecida também citada por Groover (2019) e Fleming (2019).

Adotada como solução principal, o algoritmo do simulador incorporou o modelo computacional de uma válvula proporcional elétrica, uma vez que esse tipo de componente digital permite a modulação contínua do percentual de abertura (*MV*) via *software*. O código em JavaScript realiza a interpolação matemática em tempo real da posição do obturador digital frente à vazão simulada, processando curvas lineares e logarítmicas de igual percentual diretamente no motor do navegador do usuário.

A lógica de funcionamento é detalhada baseando-se em manual técnico do fabricante em que se observa que as válvulas proporcionais podem ser acionadas eletricamente por solenoide ou motor e, no caso de válvulas proporcionais solenoides, a posição do êmbolo depende do sinal de comando, equilibrando força de mola e força eletromagnética.

De maneira a fazer com que a especificação ainda mais verificável, o texto pode-se citar o *datasheet* específico de válvula proporcional como a Bürkert Type 2836, sendo uma válvula proporcional de ação direta, utilizada como válvula de controle eletromagneticamente acionada em aplicações de vazão relativamente alta, normalmente fechada (N.C.).

Ademais, como possibilidade didática, o projeto prevê o uso de válvula de esfera motorizada (Figura 18), comumente comandada por lógica de tempo (abrir/fechar) ou por PWM/posição quando o atuador conta com realimentação. A referida opção é especialmente rica para discutir diferenças entre “controle por

posição” e “controle por tempo”, além de possibilitar uma demonstração de atrasos mecânicos, folgas e histerese. A bancada foi dimensionada para aceitar essa troca, bastando que mantidas as conexões e o diâmetro nominal.

Figura 18 – Exemplo de válvula esfera motorizada



Fonte: dados da pesquisa, 2026.

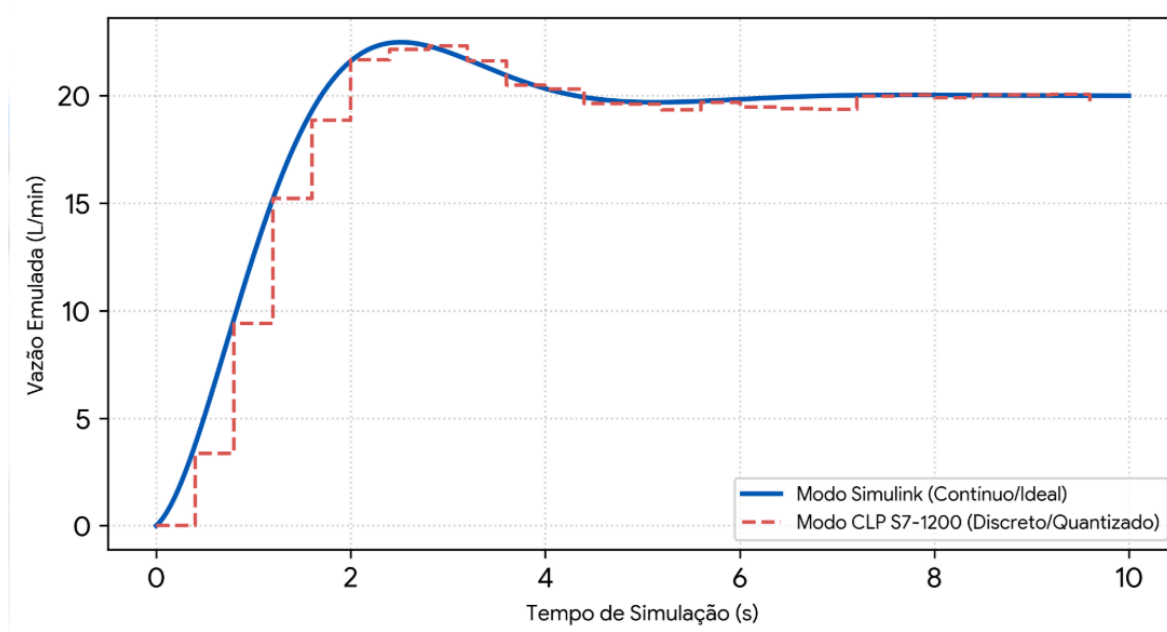
Outra possibilidade prevista é a válvula on/off (solenoide), indicada para experimentos de controle por histerese, controle bang-bang e lógica discreta. Mesmo não forneça modulação contínua, ela permite explorar fenômenos reais do controle em sistemas discretos e representar porque determinados processos demandam proporcionalidade. A inclusão dessa possibilidade amplia o valor didático e permite que a bancada tenha seu uso em disciplinas de automação discreta, além de controle contínuo.

4.7 Automação e condução dos ensaios (MATLAB/Simulink e CLP S7-1200)

"Na concepção do sistema de automação do simulador web, a arquitetura lógica foi projetada para emular duas rotas distintas de comportamento de controle, ambas fundamentais na formação de engenharia: a primeira baseia-se nas respostas matemáticas contínuas típicas do ambiente MATLAB/Simulink (Ogata, 2016; Åström

e Murray, 2020), ideal para o estudo analítico de sintonia; e a segunda emula o comportamento de varredura discreta de um Controlador Lógico Programável (CLP) industrial, conforme os preceitos de Garcia (2021), reproduzindo digitalmente o comportamento do chão de fábrica (Figura 19). A coexistência dessas duas lógicas dentro da mesma aplicação web constitui um resultado didático valioso, viabilizando o confronto direto entre uma dinâmica puramente matemática e as restrições práticas de amostragem industrial.

Figura 19 – Comportamento comparativo dos modelos de controle do simulador



Fonte: dados da pesquisa, 2026.

Na emulação do comportamento 'Modo Simulink', a estratégia executa equações integrais com discretização de alta ordem baseada no bloco *PID Controller*. A ação derivativa incorpora um filtro digital de polo de primeira ordem para suavizar variações bruscas de erro e ruído de ponto flutuante.

O simulador web emula também o comportamento do recurso *PID Tuner* da MathWorks, rodando rotinas que calculam automaticamente ganhos iniciais lineares e estáveis ao redor do ponto de operação virtual selecionado pelo usuário. Para a emulação do 'Modo CLP', o software adota como métrica paramétrica as restrições temporais e de resolução de um hardware industrial de mercado: a CPU SIMATIC S7-1200 (modelo CPU 1212C DC/DC/DC - 6ES7212-1AE40-0XB0).

O algoritmo em JavaScript converte internamente as variáveis de processo flutuantes para a escala de resolução inteira digitalizada de 16 bits (0 a 27648), padrão dos canais analógicos integrados de 0–10 Vdc detalhados no *datasheet* oficial da Siemens. Essa digitalização de sinais no código simula com fidelidade o erro de quantização e as limitações de memória de 100 KB do *firmware* V4.7 do CLP de referência.

A execução dos ensaios virtuais obedece a uma sequência operacional estruturada na interface de usuário: inicialização do laço numérico, seleção do algoritmo de amostragem (contínuo ou discreto de CLP), acionamento lógico da bomba, estabilização matemática do fluxo e aplicação do degrau de *setpoint*. O gráfico em tempo real renderiza os transientes comparativos, gerando curvas de tempo de acomodação (t_s), *overshoot* e erro residual de regime para ambos os modos de operação selecionados.

4.8 Engenharia de *software* e estruturação modular da interface gráfica

A estruturação modular e o desenvolvimento do código-fonte do simulador virtual configuram-se como o resultado físico-digital tangível deste projeto, traduzindo preceitos funcionais em um sistema computacional seguro, replicável e indene a avarias operacionais. A codificação seguiu de forma rigorosa as boas práticas de engenharia de software e padrões de design web para o desenvolvimento de interfaces homem-máquina (IHM) instrucionais.

A arquitetura do código separou a lógica hidrodinâmica pura das rotinas de renderização visual. As diretrizes geométricas que regem as perdas de carga distribuídas basearam-se nos coeficientes de rugosidade teóricos fornecidos por manuais técnicos de tubulações de PVC soldável (como o manual da fabricante Tigre), porém aplicados estritamente na forma de matrizes e vetores constantes dentro do script de execução. Os antigos componentes mecânicos de junção, como uniões e flanges, foram traduzidos no código como nós lógicos estruturados, facilitando a expansão futura das rotinas computacionais do escoamento e permitindo que o usuário insira trechos adicionais de perda de carga localizadamente através de botões na interface.

As lógicas das bombas e tanques foram isoladas em objetos de classe lógicos independentes, evitando descompassos na taxa de atualização do navegador.

Para anular variações de sincronismo temporal de processamento que pudessem comprometer a repetibilidade experimental, utilizou-se a sincronização por laço de tempo de ciclo estrito, travando o passo computacional em frações de segundo constantes.

O código do painel de controle elétrico e automação foi desenvolvido em um arquivo separado de estilos e *scripts* laterais. Essa separação lógica entre o processamento pesado do modelo matemático (potência funcional do sistema) e os componentes visuais de input do usuário (circuitos de controle de botões e seletores analógicos) mitiga interferências de concorrência de processamento no navegador e protege os temporizadores estritos do controlador PID contra atrasos de renderização gráfica.

4.9 Comissionamento lógico, calibração matemática e validação do software

Após a conclusão da escrita do código-fonte, procedeu-se à etapa de comissionamento lógico e depuração do simulador, fase determinante para garantir que os blocos de funções em JavaScript operassem estritamente alinhados aos modelos físicos de referência antes da condução dos experimentos educacionais. O procedimento inicial de comissionamento do software consistiu no teste de estanqueidade numérica e conservação de massa do sistema virtual.

O laço numérico foi executado de forma gradual com o nível d'água inicial variado de zero até a capacidade máxima limitadora, monitorando-se via console de desenvolvimento a ocorrência de erros de divisão por zero ou estouros de pilha (*overflow*) nas rotinas que calculam os balanços volumétricos das equações da válvula e das bombas.

Na sequência, executou-se a calibração matemática da função de leitura do sensor de vazão digitalizado. Emulando o comportamento do sensor por efeito Hall YF-S201, o código incorporou a sua constante nominal de pulsos por litro (7,5 Hz/L/min). Para conferir validação rigorosa à leitura computacional, comparou-se a vazão instantânea calculada pela fórmula do software com a variação discreta do volume da integral do tanque de descarga no mesmo intervalo de tempo. Esse procedimento experimental em software garantiu a calibração fina e a inserção de um fator de correção estatístico para mimetizar as imprecisões de leitura citadas no *datasheet* do fabricante.

No comissionamento lógico e de interface, validou-se a integridade da comunicação assíncrona entre as entradas de comando do painel e os vetores de dados recebidos pela biblioteca Chart.js. Para o modo de controle simulado do CLP, testou-se o comportamento do conversor analógico-digital interno, assegurando que sinais analógicos lógicos de 0 a 10 V inseridos pelo usuário correspondessem estritamente à faixa linear discreta esperada.

Os testes de comissionamento finalizaram com a validação da válvula operando em modo manual, variando em escala de 0% a 100% a abertura do obturador digital e plotando os gráficos de curva estática resultantes. Essa etapa permitiu avaliar analiticamente a introdução intencional de zonas mortas de atuação e as não linearidades matemáticas inerentes ao comportamento hidráulico parametrizado. Portanto, o comissionamento lógico e a calibração de dados emergem como resultados centrais da engenharia deste simulador, assegurando que os ensaios em malha fechada reflitam fielmente as respostas clássicas da dinâmica de sistemas industriais.

4.10 Discussão dos resultados e fidelidade fenomenológica

Partindo de uma análise crítica dos resultados alcançados a partir do desenvolvimento do simulador virtual de controle de vazão, demonstra-se que os objetivos propostos foram alcançados de modo consistente, principalmente no que diz respeito à concepção de um sistema algorítmico capaz de representar, em escala reduzida e ambiente puramente digital, os mais importantes fenômenos envolvidos no controle de processos industriais. A definição dimensional matemática, a arquitetura hidrodinâmica e a escolha dos parâmetros nominais revelaram coerência técnica, possibilitando a realização de ensaios virtuais totalmente controlados e repetíveis no navegador.

Na comparação entre o comportamento esperado a partir das equações constitutivas ideais e o funcionamento verificado na execução em tempo real da aplicação web (*Single Page Application*), sobressai um aspecto amplamente discutido na literatura de referência sobre controle de processos: a presença inevitável de não linearidades e incertezas, conforme preconizado por Seborg, Edgar e Mellichamp (2017), Åström e Murray (2020) e Ogata (2016).

Fenômenos como a saturação lógica do atuador, variações analíticas na curva polinomial da bomba e as flutuações gaussianas de leitura inseridas propositalmente via código refletem diretamente a resposta dinâmica do sistema. Esse comportamento valida a robustez do software e confirma a importância do uso de simuladores interativos modernos para complementar o aprendizado teórico, em alinhamento com as formulações pedagógicas de Gardel et al. (2012), Marques et al. (2017) e Martins, Figueiredo e Rocha (2024).

Foi verificado que a rotina que rege a válvula de controle detém papel dominante na dinâmica temporal do sistema, reforçando sua caracterização algorítmica como elemento final de controle. A relação entre o sinal de comando computado (MV) e a vazão resultante mostrou-se estritamente dependente da região de operação selecionada para o obturador digital, o que está em estrita consonância com o comportamento descrito em Bates (2020), Skousen (2017) e Oliveira e Costa (2019) para atuadores proporcionais. O referido resultado consolida a necessidade de sintonia adequada do controlador e justifica a utilização das componentes integral e derivativa (PI/PID) discretizadas no JavaScript, demonstrando graficamente a eliminação do desvio (*offset*) em regime permanente.

Na modelação da instrumentação adotada, ficou clara a adequação dos parâmetros para fins didáticos, permitindo a coleta de dados de ponto flutuante em tempo real e a visualização nítida da resposta do sistema por meio da biblioteca Chart.js. Contudo, a análise crítica aponta que a emulação de sensores comerciais de baixo custo exige a incorporação algorítmica de limitações inerentes de resolução e quantização de bits, demandando filtros digitais no código e uma interpretação criteriosa dos dados plotados na tela, conforme discutido por Braga (2018), Martins e Ferreira (2020) e Oliveira e Costa (2019). A citada limitação numérica, longe de se configurar como um gargalo de desenvolvimento, constitui um aspecto pedagógico relevante, dado que aproxima o comportamento computacional do simulador das condições reais e imperfeitas encontradas em aplicações de chão de fábrica.

Sobre a arquitetura modular da interface do simulador, esta revelou-se um diferencial importante do projeto de software, uma vez que possibilita a substituição imediata do tipo de elemento final de controle (comutando instantaneamente entre modelos lógicos de válvulas lineares, de igual percentual ou atuação *on/off*) sem mudanças estruturais no núcleo matemático do programa. A referida característica amplia de modo expressivo o escopo de experimentos possíveis, permitindo ao

estudante comparar o reflexo dessas escolhas de programação na estabilidade e no desempenho do laço de controle em malha fechada, em simetria com as contribuições teóricas de Marques et al. (2017), Martins et al. (2024), Vazquez-Gonzalez et al. (2018) e Seborg, Edgar e Mellichamp (2017).

De maneira geral, os resultados alcançados revelam que o simulador instrucional proposto é tecnicamente viável, funcional e estritamente correspondente às práticas contemporâneas de ensino de engenharia baseadas em laboratórios virtuais. A integração sinérgica entre a modelagem matemática e a engenharia de software revelou-se especialmente eficaz para a compreensão intuitiva dos conceitos de controle automático, validando a abordagem metodológica de escolha e reforçando a relevância do projeto no âmbito acadêmico e tecnológico.

5 CONCLUSÃO

Em relação ao que foi proposto neste estudo, tem-se uma abordagem mais profunda acerca do problema central de pesquisa em que restou demonstrada a maneira um simulador computacional amparado em arquitetura web de página única (SPA) reproduzindo com fidelidade a dinâmica de processos hidráulicos e validando algoritmos de controle industrial em malha fechada. Ressalta-se que o objetivo foi alcançado mediante a construção e validação de um protótipo de simulador virtual e interativo de uma bancada de controle de vazão por válvulas.

O uso da linguagem de programação JavaScript, juntamente com uma interface de usuário amparada visualmente em sistemas SCADA industriais, constatou que ferramentas essencialmente digitais e portáteis tem a capacidade de modelar a complexidade de plantas de processos contínuos de modo direto no navegador web.

Pôde-se concluir que o simulador computacional cumpre, a rigor, com sua finalidade pedagógica e tecnológica. O *software* permite a análise aprofundada do controle de vazão em um ambiente digital estável, em que os blocos matemáticos seguiram a parametrização com dados nominais de catálogos e *datasheets* comerciais verificáveis. A definição das dimensões lógicas dos tanques, da escala de vazão e das equações de perda de carga do duto derivou em um resolvido numérico equilibrado, com capacidade de mimetizar os fenômenos dinâmicos típicos de processos hidráulicos industriais em ambiente acadêmico.

Não obstante, a emulação das duas rotas de comportamento, reportando de maneira contínua as dinâmicas do MATLAB/Simulink e de modo discreta a varredura temporal e quantização de bits de um CLP industrial (Siemens S7-1200), mostrou-se como um dos resultados mais proeminentes da perspectiva da engenharia de *software* e automação. A referida abordagem integrada em uma aplicação única possibilita ao estudante confrontar as divergências operacionais entre modelos essencialmente matemáticos e sistemas com restrições de tempo real, contemplando a observação de não linearidades, atrasos de amostragem e ruídos de medição gerados estocasticamente pelo algoritmo.

Vale destacar que, entre as principais contribuições deste estudo, evidencia-se a modularidade algorítmica do simulador, estruturada em programação orientada a objetos. A referida arquitetura permite a alternância instantânea entre diferentes perfis de elementos finais de controle (válvulas lineares, igual percentual ou atuadores *on/off*) mediante comandos na interface web, sem exigir alterações no núcleo das rotinas matemáticas. O reforço didático é ampliado pela utilização da biblioteca Chart.js, que plota gráficos de tendência dinâmicos e síncronos, possibilitando avaliações comparativas imediatas que tornam mais robusto o processo de ensino-aprendizagem de malhas fechadas PID.

Em se tratando das limitações deste estudo tecnológico, pode-se dizer que a simulação hidráulica ampara-se em equações determinísticas de regime permanente para o cálculo das perdas de carga lógicas, o que não considera os desdobramentos transientes complexos de golpe de aríete. Além disso, as propriedades do fluido e das bombas foram restritas a parâmetros fixos equivalentes à água sob temperatura ambiente e baixas pressões operacionais no *script* principal, restringindo a análise analítica a esse regime operacional de escoamento.

Apresenta-se aqui, como propostas de estudos futuros para ampliar o artefato de *software* desenvolvido, a recomendação de que a migração da lógica matemática de simulação para a execução paralela via *Web Workers* possa ser feita de modo a otimizar o desempenho gráfico do navegador sob elevadas frequências de amostragem. Não obstante, pode-se seguir na implementação de algoritmos de controle modernos e avançados diretamente no JavaScript, a citar como o controle adaptativo e o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC).

Além disso, pode-se seguir na integração do simulador a um banco de dados em nuvem via API REST, de maneira a permitir o armazenamento de perfis e relatórios de sintonia PID gerados pelas turmas de estudantes para fins de avaliação docente remota.

REFERÊNCIAS

ALLMENDINGER, Moritz; STACHE, Nicolaj C.; TRÄNKLE, Frank. Integration of Reinforcement Learning into Fluid Control Systems. In: **2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**. IEEE, 2023. p. 1-6.

ASTROM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers**. Princeton University Press, 2020.

BATES, R. **Valve Handbook**. McGraw-Hill Education, 2020.

BORGES, L.; SILVA, M. E. **Análise de perdas de carga em sistemas hidráulicos industriais**. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, v. 29, n. 2, p. 85-102, 2021.

BRAGA, Marcelo. **Sistema de sensoriamento, monitoramento e controle de vazão de fluídos**. São Paulo: IFSP, 2018.

BRESSAN, Glauca; DA SILVA, Guilherme Mosaner; ENDO, Wagner. Estratégia para Compensação de Erros de Ação de Controle em uma Válvula Industrial Utilizando Inferência Fuzzy. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 4, 2020.

CARVALHO, Antônio Carlos. **Simulação computacional aplicada ao ensino de engenharia**. São Paulo: Editora Virtualis, 2011.

CHEN, H.; LI, X.; WANG, Y. **Structural integrity assessment of industrial control valves under extreme conditions**. Journal of Fluid Engineering, v. 144, n. 5, p. 12-29, 2022.

CHEN, X. et al. Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis. **Plos One**, v. 19, n. 12, p. 1-22, dez. 2024. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0316269>.

CHEN, Y.; ZHAO, L.; JIAO, M. Deployment of a Web-based Control Laboratory Using HTML5: An Open-Source Framework. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 34, n. 1, p. 45-58, fev. 2026. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305743961_Deployment_of_a_Web-based_Control_Laboratory_Using_HTML5.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Perfil da Indústria Brasileira**. 2023. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Disponível em: <<https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/grafico/total/producao/#!/industria-total>>. Acesso em: 9 de jan. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Sondagem Especial**. Falta de Trabalhador Qualificado, n. 76, 2020. Disponível

em:<<http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-76-falta-de-trabalhador-qualificado/>>. Acesso em: 20 de dez. 2024.

CORDEIRO, Maurício. **Dicas de instrumentação**. Válvulas de esfera. 2022. Disponível em: <https://www.dicasdeinstrumentacao.com/valvula-de-esfera-introducao-i/> Acesso em: 2 de fev. 2025.

COSTA, L. R.; PEREIRA, M. S.; FERREIRA, J. R. **Manutenção de Equipamentos Industriais**. Blucher, 2021.

CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 5. ed. Los Angeles: SAGE Publications, 2018.
FLEMING, P. **Industrial Control and Automation**. Springer, 2019.

FLORES-BUNGACHO, Francisco *et al.* Development and application of a virtual reality biphasic separator as a learning system for industrial process control. **Electronics**, v. 11, n. 4, p. 636, 2022.

FRANCHI, Claiton Moro. **Controle de processos industriais**. São Paulo: Atlas, 2011.

GARDEL, Alfredo *et al.* Implementation of industrial automation laboratories for e-learning. **International Journal of Electrical Engineering Education**, v. 49, n. 4, p. 402-418, 2012.

GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. Editora Blucher, 2021.

GARCIA, Pedro Victor Habib Vieira. **Proposta de estrutura para gêmeo digital aplicada à válvula de controle**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2023.

GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. Pearson, 2019.

HAMPEL, Uwe *et al.* A review on fast tomographic imaging techniques and their potential application in industrial process control. **Sensors**, v. 22, n. 6, p. 2309, 2022.

HIDRÁULICA E PNEUMÁTICA. **Figura de representação da válvula de controle direcional**. 2020. Disponível em: <https://hidraulicaepneumatica.com/valvulas-de-controle-direcional/> Acesso em: 4 de jan. 2025.

KHAN, Nadir Ilyas; CAMPOS, Michael; BITUEN, Samantha. **Industry Automation and Controls Lab**. 2019. Electrical Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo. 2019.

LIU, Z. *et al.* Unified and Flexible Online Experimental Framework for Control Engineering Education. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 8, p. 5532-5541, ago. 2021.

MANBACHI, Moein *et al.* Virtualized experiential learning platform for substation automation and industrial control cybersecurity. In: **2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**. IEEE, 2022. 61-66.

MARQUES, Renan Pasini. **Os impactos da indústria 4.0 na automação industrial**. UNINTER: 2022.

MARQUES, Jean Liecheski *et al.* Proposta de uma bancada de baixo custo para o ensino de automação industrial de acordo com as normas de segurança. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 36, n. 2, 2017.

MARTINS, R.; FERREIRA, J. **Utilização de vídeos experimentais para validação de sistemas de controle e automação**. Automação & Controle, v. 34, n. 1, p. 112-128, 2020.

MARTINS, Andre Athaydes; FIGUEIREDO, Bene Regis; ROCHA, Rosiane Ribeiro. **Proposta de bancada didática para instrumentação e controle de nível e vazão - modelagem 3D**. 2024. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5097. Disponível em: https://abenge.org.br/sis_artigo_com_capa.php/?cod_trab=5097. Acesso em: 2 de jan. 2025.

MTI Brasil. Válvula de globo. 2022. <https://mtibrasil.com.br/blog/valvulas-de-processo/comparacao-entre-a-valvula-gaveta-e-a-valvula-globo/>

MOURA, T.; SANTOS, P.; LIMA, V. **Influência de parâmetros de pressão e tempo de resposta em válvulas de controle**. Engenharia & Indústria, v. 18, n. 3, p. 45-63, 2021.

NAKAMURA, Y.; TANAKA, K.; SUZUKI, M. **Simulation-based design of industrial control valve systems**. International Journal of Fluid Control, v. 12, n. 4, p. 210-226, 2017.

NAZAROVA, Olena *et al.* *Softwar* and hardware complex for the study of electropneumatic mechatronic systems. In: **2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)**. IEEE, 2022. p. 1-6.

NOGARA JUNIOR, Jules Rimet. **Projeto de uma bancada didática para determinar o número de Reynolds**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Pearson, 2016.

OLIVEIRA, C.; COSTA, A. **Desempenho de válvulas de controle em processos industriais: fatores de influência**. Engenharia de Processos, v. 22, n. 6, p. 78-95, 2019.

OLIVEIRA, Eric Sampaio *et al.* Automação nos Processos Industriais: Processo de Implementação e o Papel do Gestor de Tecnologia da Informação. **Prospectus (ISSN: 2674-8576)**, v. 6, n. 1, p. 153-203, 2024.

REYNOSO-MEZA, G. et al. An open source remote laboratory network based on a ready to use solution: LABOREM. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 9, p. 324-329, nov. 2019.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics and Control. Wiley, 2017.

SILVA, R.; ALMEIDA, F. **Ergonomia e eficiência na disposição de componentes em bancadas didáticas**. Revista de Ensino Técnico em Engenharia, v. 11, n. 2, p. 55-71, 2018.

SILVA, Rodrigo Reis et al. Desafios e soluções de baixo custo na implantação de bancadas didáticas automatizadas para laboratórios de engenharia. **Revista Brasileira de Ensino de Engenharia**, v. 34, n. 2, p. 112-125, 2015.

SKOUSEN, V. Valve Handbook. McGraw-Hill Education, 2017.

VAZQUEZ-GONZALEZ, Jose Luis *et al.* An Industrial Automation Course: Common Infrastructure for Physical, Virtual and Remote Laboratories for PLC Programming. **International Journal of Online Engineering**, v. 14, n. 8, 2018.

ROSÁRIO, João Maurício. **Automação Industrial**. São Paulo: Baraúna, 2009.

VAL AÇO – **Válvula diafragma**. 2017. Disponível em: https://www.valaco.com.br/inf_tecnicas/tipo_diafragma.html. Acesso em: 11 de jan. 2025.

WANG, Weiping *et al.* Anomaly detection of industrial control systems based on transfer learning. **Tsinghua Science and Technology**, v. 26, n. 6, p. 821-832, 2022.

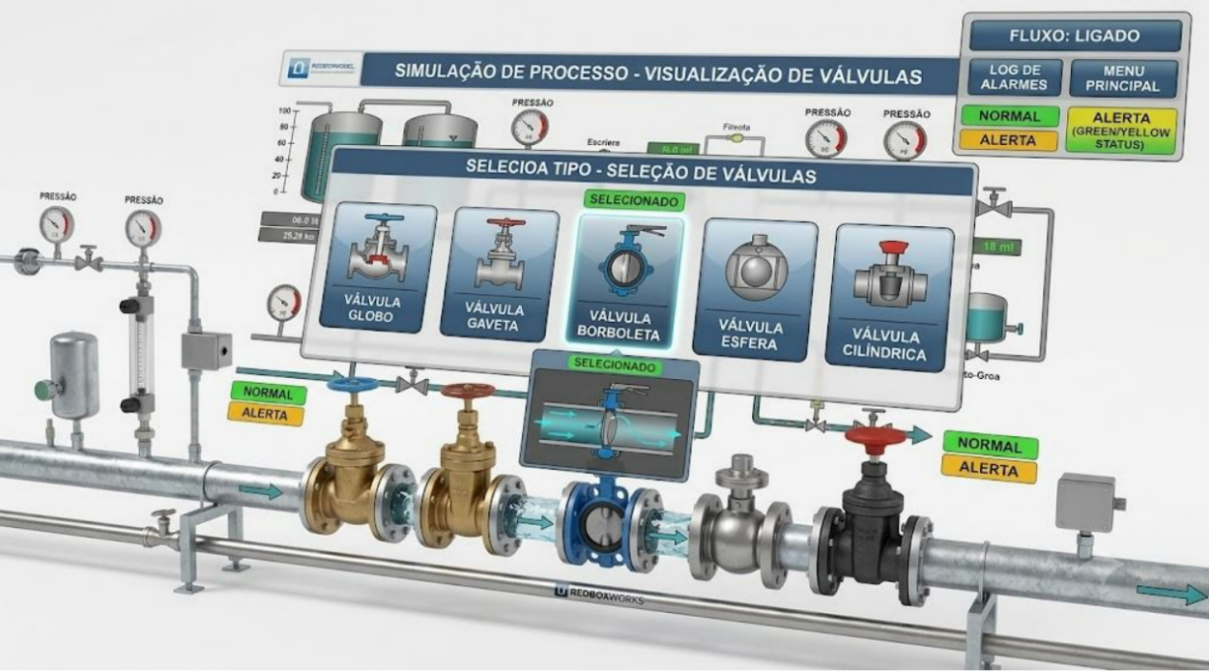
WANG, Jianguo et al. Industrial internet of things (IIoT) and digital twins in automation education: current trends and future prospects. **IEEE Transactions on Education**, v. 64, n. 3, p. 245-256, 2021

YANG, B. et al. Plug-in Free Web-Based 3-D Interactive Laboratory for Control Engineering Education. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, v. 10, n. 2, p. 222-235, abr./jun. 2017.

ZHANG, W.; LIU, J.; CHEN, P. **Dynamic response optimization of industrial valve actuators**. Journal of Process Automation, v. 16, n. 3, p. 33-49, 2020.

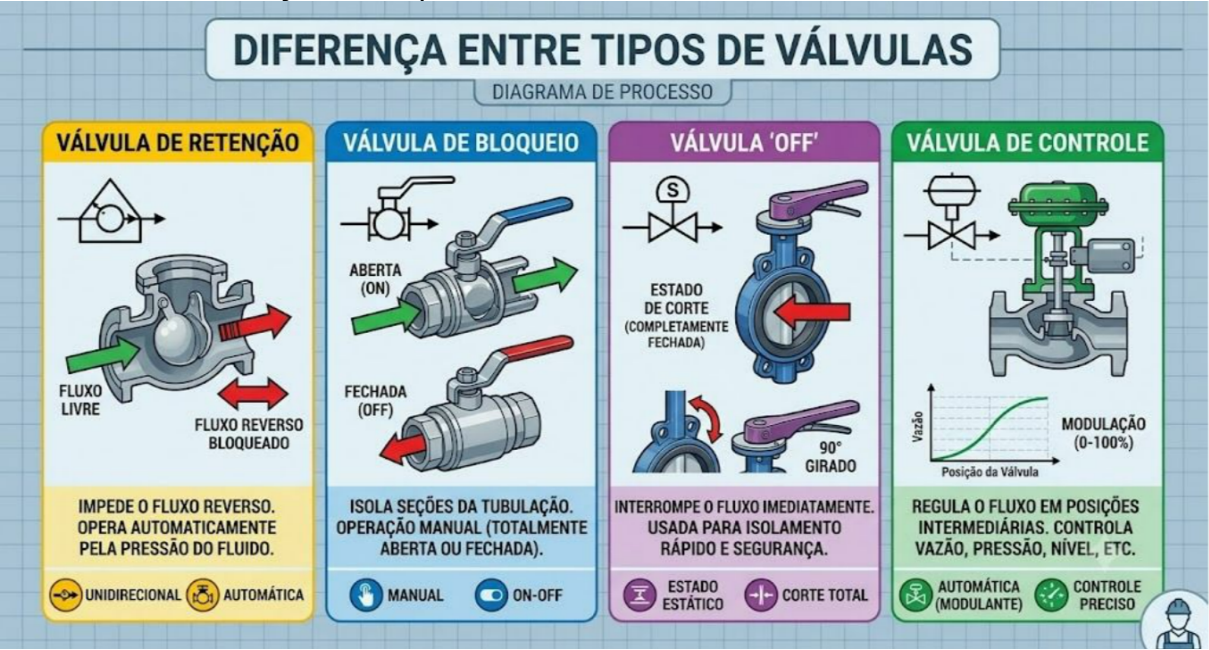
ANEXOS

ANEXO I – Configurações no software.



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO II – Diferença entre tipos de válvulas.



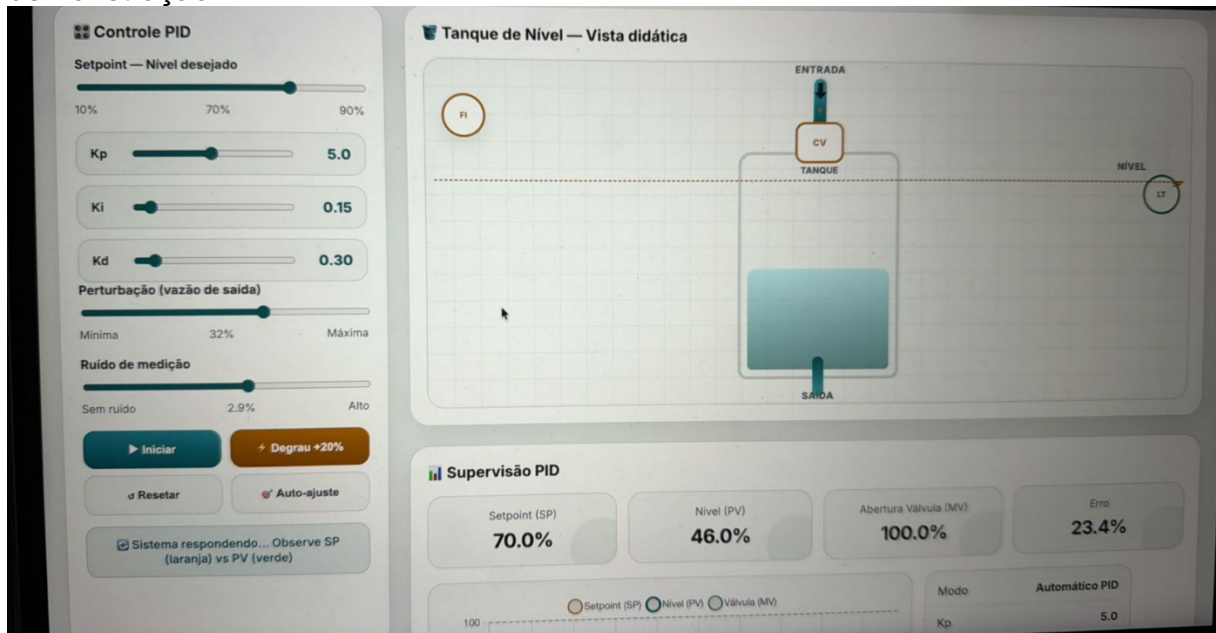
Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO III - Válvulas tipo plugue em corte 3D: válvula 01 porta total (full port plug valve), válvula 02 porta reduzida (reduced port plug valve) e válvula 03 tipo V-port (V-port control plug valve).



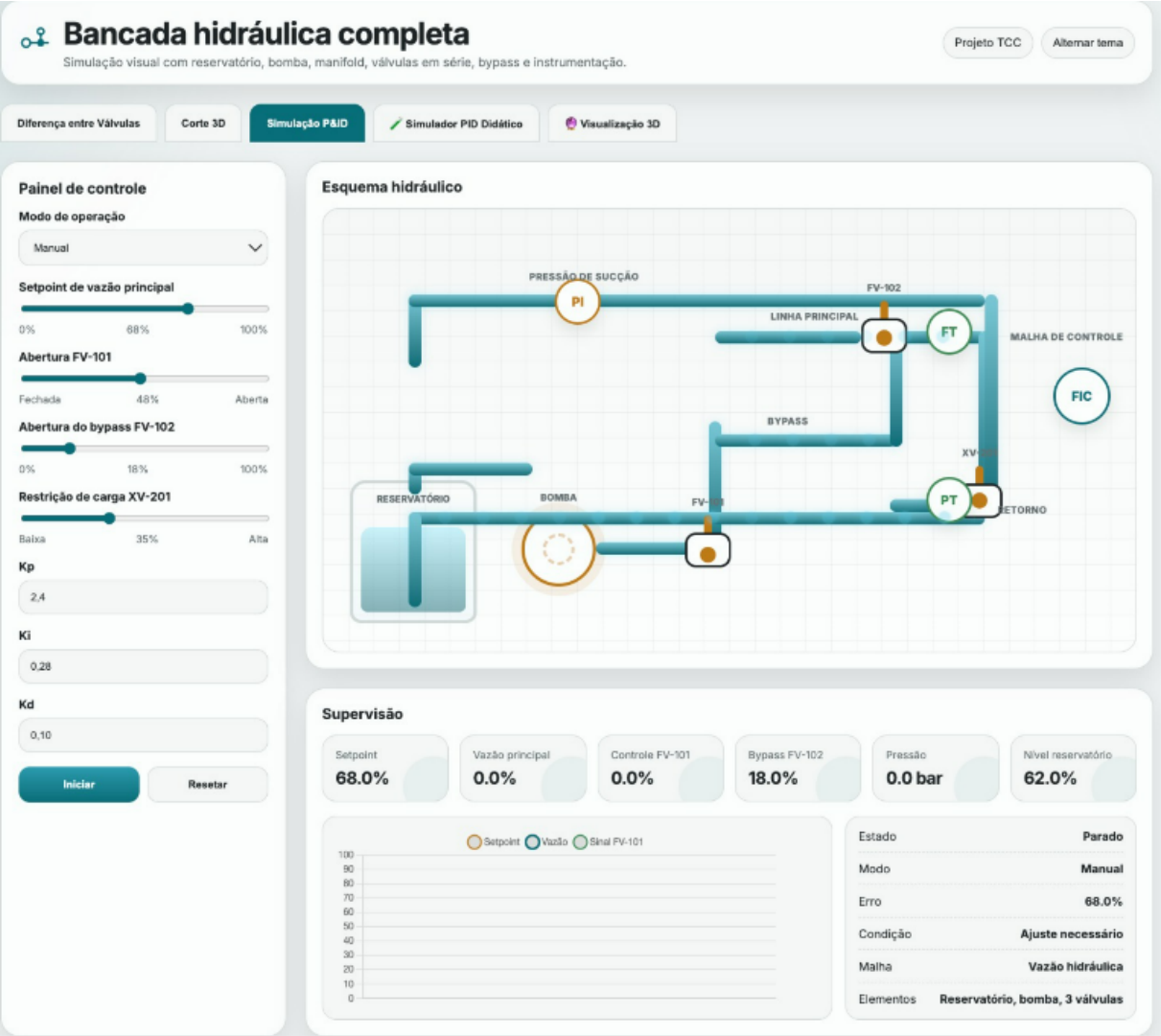
Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO IV - Sistema PID de uma válvula única, processo mais simples para demonstração.



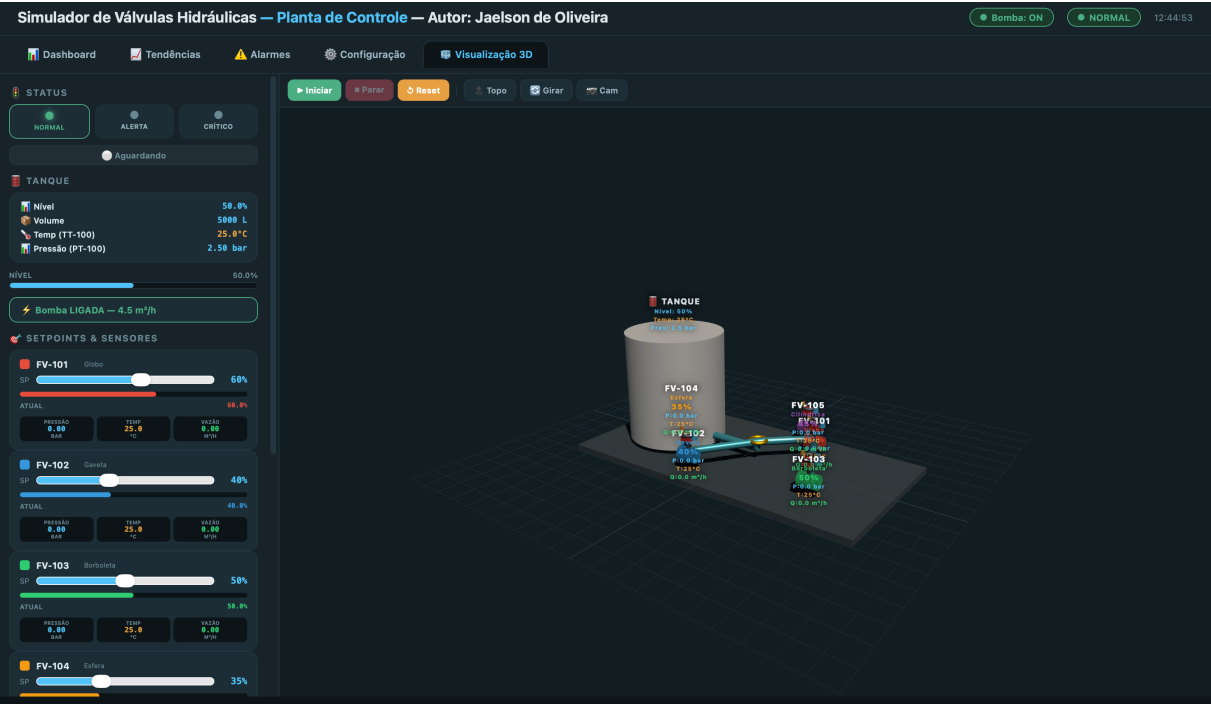
Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO V - Sistema de controle PID, com maior número de elementos e variáveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO VI – Visualização de uma simulação em 3D, com diversos tipos de válvulas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

ANEXO VII – Tabela de Comprimento Equivalente para Conexões de PVC Soldável (25mm/ 3/4")

A Tabela apresenta os comprimentos lineares equivalentes de tubulação (L_{eq}) utilizados no algoritmo do simulador virtual para o cálculo automatizado das perdas de carga localizadas nas singularidades da planta lúdica.

Tipo de Conexão / Singularidade	Comprimento Equivalente (L_{eq})	Unidade	Referência Técnica Industrial
Joelho de 90°	1.2	Metros (m)	Manual Técnico da Linha Soldável Tigre / NBR 5626
Joelho de 45°	0.6	Metros (m)	Manual Técnico da Linha Soldável Tigre / NBR 5626
Tê de Passagem Direta	0.7	Metros (m)	Manual Técnico da Linha Soldável Tigre / NBR 5626
Tê de Saída Lateral	2.4	Metros (m)	Manual Técnico da Linha Soldável Tigre / NBR 5626
Registro de Gaveta (Aberto)	0.2	Metros (m)	Catálogo Técnico de Válvulas Comerciais

Registro de Globo (Aberto)	8.2	Metros (\(\text{m}\))	Catálogo Técnico de Válvulas Comerciais
Entrada de Tubulação (Borda)	0.5	Metros (\(\text{m}\))	Coefficiente Clássico Hidráulico (Azevedo Netto)
Saída de Tubulação	0.8	Metros (\(\text{m}\))	Coefficiente Clássico Hidráulico (Azevedo Netto)

Fonte: dados da pesquisa, 2026.

Observações: No código-fonte em JavaScript, o comprimento linear total de cálculo (L_{total}) é computado dinamicamente através do somatório do comprimento retilíneo do tubo (1,60 m) com os comprimentos equivalentes (L_{eq}) das conexões ativadas pelas variáveis booleanas na interface gráfica do usuário. Esse montante alimenta a equação de Darcy-Weisbach para determinar a perda de energia por atrito no escoamento virtual.