Gêmeos Digitais na Indústria 4.0: Aplicação em Tanques Acoplados

***Kaillane Araújo da Silva*[1]**
***Fabio Meneghetti Ugulino de Araujo*[1]**

[1] *Departamento de Engenharia de Computação e Automação, UFRN, <kaillane.silva.707@ufrn.edu.br>*

[1] *Departamento de Engenharia de Computação e Automação, UFRN, <meneghet@dca.ufrn.br>*

Resumo

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, estabelece-se por meio da convergência entre tecnologias digitais, automação avançada, *Big Data* e ciência de dados. Nesse cenário, surge o conceito de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*), que se apresenta como uma ferramenta fundamental, sendo uma réplica virtual de um objeto ou sistema do mundo real, possibilitando o monitoramento de sistemas físicos em tempo real. Este trabalho propõe o estudo da planta *Coupled Tanks*, da Quanser, voltada ao aprendizado de processos industriais de controle de nível. A metodologia adotada fundamenta-se na Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) e na exploração de soluções comerciais sólidas, com o intuito de integrar algoritmos de Inteligência Artificial e sensoriamento remoto. O objetivo do projeto é a capacitação técnica no domínio dos Gêmeos Digitais, culminando no desenvolvimento de uma interface computacional capaz de realizar o prognóstico de falhas e a otimização de estratégias de controle. Desse modo, busca-se a mitigação de riscos operacionais e a redução dos custos de manutenção dos sistemas.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais. Indústria 4.0. Tanques Acoplados. Controle em Cascata. Node-RED.

Abstract

The Fourth Industrial Revolution, or Industry 4.0, is established through the convergence of digital technologies, advanced automation, Big Data, and data science. In this context, the concept known as Digital Twins emerges as a fundamental tool, as it is an exact virtual replica of a real-world object or system, enabling the real-time monitoring of physical systems. This work proposes the study of the Quanser Coupled Tanks, a plant designed for learning industrial level control processes. The adopted methodology is based on Model-Based Systems Engineering (MBSE) and the exploration of robust commercial solutions, with the aim of integrating Artificial Intelligence algorithms and remote sensing. The objective of the project is to provide technical training in the field of Digital Twins, culminating in the development of a computational interface capable of performing fault prognosis and optimizing control strategies. Thus, the project seeks to mitigate operational risks and reduce system maintenance costs.

Keywords: Digital Twins. Industry 4.0. Coupled Tanks. Cascade Control. Node-RED.

1 Introdução

A partir de 2011, surge na literatura o termo Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0. O conceito foi apresentado na feira comercial Hannover Messe, na Alemanha, onde um grupo de trabalho voltado à Indústria 4.0 foi patrocinado pelo governo federal alemão (LIN et al., 2018). A Quarta Revolução Industrial surge com o objetivo de possibilitar a personalização de produtos de acordo com as necessidades dos clientes (FRONTONI et al., 2018). A Indústria 4.0 é fomentada por tecnologias fundamentais, como

Big Data, sistemas integrados, computação em nuvem, Internet das Coisas (IoT), segurança da informação, simulação e manufatura aditiva.

Mais recentemente, surge o conceito de Indústria 5.0, que amplia a perspectiva da transformação industrial ao incorporar aspectos relacionados à centralidade humana, à sustentabilidade e à resiliência dos sistemas produtivos. Diferentemente de uma substituição da Indústria 4.0, essa nova abordagem busca complementar seus avanços tecnológicos, direcionando-os também ao bem-estar humano e à responsabilidade ambiental (BREQUE; NUL; PETRIDIS, 2021).

No contexto da Indústria 4.0, identificam-se tecnologias como os Gêmeos Digitais (*Digital Twins*), considerados ferramentas importantes para a integração entre os ambientes físico e virtual. As atuais tecnologias de informação e comunicação são utilizadas para representar e conectar esses dois ambientes. De acordo com Schleich et al. (2017), o Gêmeo Digital estabelece uma relação bidirecional entre um artefato físico e um conjunto de modelos virtuais. Essa relação permite utilizar a representação virtual durante diferentes etapas do ciclo de vida do produto, incluindo projeto, fabricação e manutenção ou serviço. Glaessgen e Stargel (2012) ampliam essa perspectiva ao apresentar o Gêmeo Digital como uma representação virtual capaz de integrar modelos de alta fidelidade, dados de sensores, histórico de operação e informações relacionadas à condição do sistema, contribuindo para o monitoramento, a previsão e o gerenciamento do ciclo de vida.

No âmbito desta pesquisa de iniciação científica, utilizou-se o sistema de *Coupled Tanks* da Quanser, uma planta didática composta por tanques interligados e sensores de nível, que mimetiza as dinâmicas de indústrias de saneamento e refino de petróleo. O objetivo central deste trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo funcional voltado ao monitoramento contínuo do comportamento do processo, integrando fundamentos teóricos e aplicações ao ciclo de vida do Gêmeo Digital.

2 Gêmeos Digitais e Tecnologias da Indústria 4.0

Nesta seção são apresentados os principais conceitos e fundamentos necessários para a compreensão do desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são abordados os conceitos relacionados à Indústria 4.0 e às tecnologias que contribuem para a integração entre os ambientes físico e digital. Em seguida, são discutidos os Gêmeos Digitais, considerando sua evolução conceitual, características e aplicações em sistemas industriais. Por fim, são apresentados os fundamentos relacionados à modelagem, simulação e controle de processos, estabelecendo a base teórica necessária para a aplicação do conceito de Gêmeo Digital ao sistema estudado.

2.1 Indústria 4.0

Segundo Pfeiffer (2017), o termo Indústria 4.0 ganhou destaque na Alemanha em 2011, passando a representar uma visão de transformação da produção industrial. Nesse cenário, o conceito passou a ocupar espaço tanto no debate tecnológico quanto nas discussões econômicas e sociais relacionadas ao futuro da produção. Zhong et al. (2017) destacam que a Indústria 4.0 busca promover maior flexibilidade nos processos de manufatura, personalização em massa, melhoria da qualidade e aumento da produtividade. Para isso, diferentes tecnologias são empregadas na construção de sistemas de manufatura inteligentes, entre elas a Internet das Coisas (IoT), os Sistemas Ciberfísicos (CPS), a computação em nuvem, a análise de *Big Data* e as tecnologias de informação e comunicação.

2.2 Gêmeos Digitais

Os Gêmeos Digitais possuem antecedentes no programa Apollo, desenvolvido pela NASA, especialmente a missão Apollo 11, realizada em 1969. Durante as missões, modelos e sistemas de simulação eram utilizados em solo para reproduzir condições de operação das espaçonaves, permitindo aos engenheiros analisar e mitigar erros. Embora essas aplicações ainda não constituíssem Gêmeos Digitais em seu sentido atual, contribuíram para o desenvolvimento do conceito.

A partir de 2002, Michael Grieves (GRIEVES, 2002) apresentou, no contexto do *Product Lifecycle Management* (PLM), uma estrutura conceitual formada por três elementos principais: o espaço físico, o espaço virtual e um mecanismo de conexão responsável pelo fluxo de informações entre esses dois ambientes. Essa proposta estabelecia a ideia de uma representação virtual associada ao produto físico durante seu ciclo de vida. Posteriormente, o modelo passou a ser denominado *Information Mirroring Model*, mantendo como princípio a conexão entre os ambientes físico e virtual.

Posteriormente, Glaessgen e Stargel (2012) ampliaram essa concepção ao integrar modelos de simulação, dados de sensores e informações sobre o estado do sistema ao longo de seu ciclo de vida. Em

2017, Schleich et al. (2017) destacaram a relação entre o artefato físico e seus modelos virtuais, considerando características como interoperabilidade, escalabilidade, expansibilidade e fidelidade, contribuindo para a consolidação do conceito que conhecemos atualmente.

2.3 Sistema de Tanques Acoplados da Quanser

O sistema de tanques acoplados da Quanser (*Coupled Tanks*) é uma planta experimental utilizada para o estudo e desenvolvimento de estratégias de controle de nível em processos industriais. O sistema é composto por dois tanques transparentes de acrílico, uma bomba e sensores responsáveis pela medição da pressão e do nível do fluido (Quanser, 2012). Sua arquitetura permite a implementação de diferentes configurações de controle, possibilitando o estudo de sistemas SISO, em cascata e MIMO.

No contexto deste trabalho, o sistema é utilizado como planta física para o desenvolvimento de um Gêmeo Digital. A partir da integração entre os dados obtidos pelos sensores e o modelo virtual do processo, busca-se representar o comportamento do sistema físico no ambiente computacional, possibilitando a simulação, o monitoramento e a análise de seu funcionamento.

2.4 Estratégias de controle

As estratégias de controle são utilizadas para regular o comportamento de sistemas dinâmicos, buscando manter determinadas variáveis próximas aos valores de referência. Entre as estratégias utilizadas neste trabalho estão o controle PID, o controle baseado em lógica fuzzy e o controle em cascata.

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é um dos algoritmos de controle em malha fechada mais utilizados na indústria, devido à sua estrutura relativamente simples e à possibilidade de ajustar seus parâmetros para atender aos requisitos de desempenho de diferentes processos (OGATA, 2010). Seu sinal de controle é determinado pela combinação de três ações que atuam sobre o erro, definido como a diferença entre o valor de referência e a variável medida. A ação proporcional (P) produz uma resposta proporcional ao erro instantâneo; a ação integral (I) acumula o erro ao longo do tempo, contribuindo para sua eliminação em regime permanente; e a ação derivativa (D) considera a taxa de variação do erro, podendo melhorar o amortecimento e reduzir oscilações, conforme a dinâmica do sistema e a sintonia adotada (NISE, 2012). Embora sua estrutura seja simples, o desempenho do controlador depende da escolha adequada dos parâmetros de sintonia e das características dinâmicas do processo controlado.

Diferentemente das abordagens de controle baseadas em modelos matemáticos explícitos da planta, a Lógica Fuzzy (ou lógica nebulosa) permite desenvolver estratégias de controle a partir de regras linguísticas, sem exigir necessariamente uma representação matemática precisa da dinâmica do sistema. Fundamentada na teoria dos conjuntos nebulosos, introduzida por Zadeh (1965), essa abordagem utiliza funções de pertinência para representar diferentes graus de associação de uma variável a conjuntos linguísticos. Um controlador fuzzy convencional compreende três etapas principais: a fuzzificação, que converte as entradas numéricas em representações nebulosas; a inferência, responsável por avaliar um conjunto de regras do tipo “Se–Então”; e a defuzzificação, que transforma a saída nebulosa em um sinal numérico de controle (PASSINO; YURKOVICH, 1998). Essa abordagem pode ser particularmente útil em sistemas com comportamento não linear, incertezas e dificuldade de modelagem precisa, embora seu desempenho e sua robustez dependam da estrutura das regras, das funções de pertinência e dos parâmetros adotados.

O controle em cascata é uma estratégia de controle em malha fechada caracterizada pela utilização de duas malhas de realimentação interligadas, nas quais um controlador primário define o valor de referência de um controlador secundário. A malha primária atua sobre a variável principal do processo, enquanto a malha secundária regula uma variável intermediária, permitindo que perturbações detectadas nessa malha sejam corrigidas antes de afetarem significativamente a variável principal. Para que essa estratégia apresente resultados satisfatórios, a dinâmica da malha secundária deve ser suficientemente mais rápida que a da malha primária, favorecendo uma resposta mais ágil às perturbações (SEBORG et al., 2016). Dessa forma, o controle em cascata pode melhorar o desempenho do sistema e a rejeição de perturbações, desde que as variáveis controladas sejam adequadamente selecionadas e os controladores sejam devidamente sintonizados.

3 Desenvolvimento e Implementação do Sistema

A primeira etapa deste projeto consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica exploratória e no mapeamento de tecnologias do mercado. Essa

fase teve como objetivo principal consolidar o embasamento teórico sobre Gêmeos Digitais, estratégias de controle e a arquitetura da Indústria 4.0. Além disso, foi conduzido um levantamento técnico de soluções comerciais voltadas para a indústria de processos, analisando produtos de empresas como Sensia, Sorba.ai, Vidyatec, Seeq, Visco e SLB (OptiSite). Essa análise permitiu compreender a estrutura funcional de sistemas reais, garantindo que as melhores práticas da indústria para a qualificação e validação de Gêmeos Digitais orientassem o desenvolvimento e a arquitetura do protótipo laboratorial.

3.1 MATLAB/Simulink

Para a etapa de modelagem, simulação e validação do sistema de controle, utilizou-se o ambiente computacional MATLAB integrado ao *Simulink*. Inicialmente, o modelo matemático das equações diferenciais que controlam a dinâmica do sistema foi implementado e parametrizado na plataforma. Utilizando a interface gráfica baseada em diagramas de blocos do *Simulink*, construiu-se a malha de controle em circuito fechado, adicionando os controladores. Esse ambiente virtual permitiu o desenvolvimento e a validação prévios das estratégias a serem aplicadas na planta.

A comunicação entre o modelo computacional e a planta do sistema de Tanques Acoplados da Quanser é realizada por meio de blocos HIL. Conforme apresentado na Figura 1, o projeto utiliza o bloco *HIL Read Analog* para realizar a leitura dos sinais provenientes dos sensores de pressão da planta física, que representam os níveis dos tanques. Já o bloco *HIL Write Analog* é utilizado para enviar os sinais de tensão responsáveis pelo acionamento da bomba de alimentação.

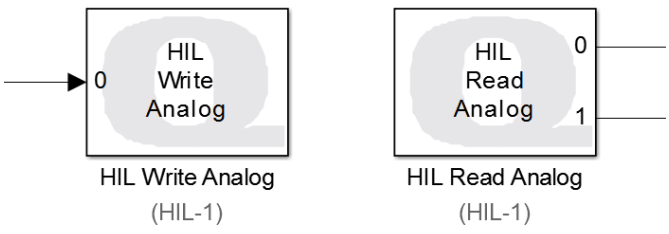


Figura 1: *Blocos HIL. Fonte: Autoria própria (2026).*

Utiliza-se também o bloco *Stream Client*, responsável por estabelecer a comunicação por meio do protocolo TCP/IP, possibilitando o monitoramento remoto e a integração com sistemas externos. Essa comunicação permite que os dados operacionais da planta, como os níveis dos tanques, os sinais de tensão e o estado do sistema físico, sejam transmitidos para a interface gráfica. Neste projeto, essa arquitetura de comunicação foi configurada com o objetivo de exportar os dados provenientes do MATLAB/*Simulink*, que serão utilizados, na próxima etapa da pesquisa, para alimentar a interface gráfica do Gêmeo Digital e possibilitar a representação do sistema em tempo real.

3.2 Sistema de Controle

Para lidar com a dinâmica interligada dos tanques e otimizar o desempenho global, optou-se pela implementação de uma malha de controle em cascata. Essa arquitetura é justificada pela natureza física do sistema *Coupled Tanks*, que apresenta dinâmicas distintas em cada estágio do processo de escoamento. O Tanque 1, que recebe o fluxo direto da bomba hidráulica, comporta-se de maneira aproximada a um sistema de primeira ordem. Por possuir uma resposta mais rápida e dinâmica menos complexa, a malha interna da cascata foi projetada utilizando um controlador clássico PID. O objetivo dessa malha interna é corrigir rapidamente os distúrbios locais e garantir que o nível do Tanque 1 atinja seu valor de referência de forma ágil.

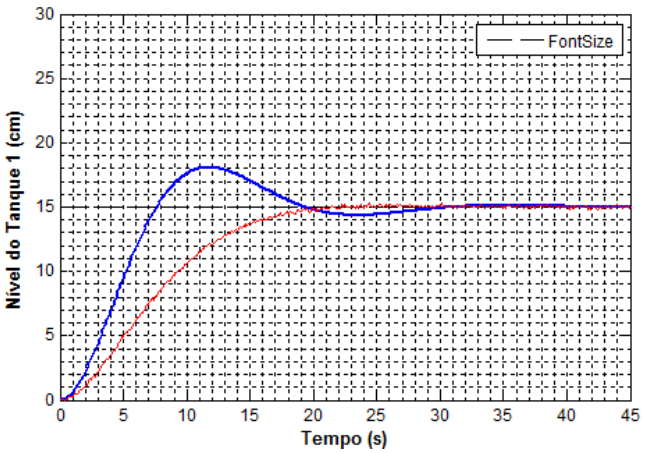


Figura 2: *Gráfico de comparação do controle PID e modelo matemático. Fonte: Autoria própria (2026).*

Como ilustrado na Figura 2, a avaliação do controle PID no Tanque 1 permite comparar o comportamento dinâmico da bancada real (linha vermelha) com o do Gêmeo Digital (linha azul). Embora o objetivo de controle seja alcançado em ambos os casos, observa-se uma diferença entre as respostas transitórias: o modelo virtual apresenta resposta mais rápida e sobressinal mais acentuado, enquanto a bancada real atinge o *setpoint* de forma mais lenta e com

sobressinal reduzido. Essa discrepância evidencia a necessidade de aprimoramentos na modelagem matemática, de modo a representar com maior fidelidade o comportamento dinâmico da planta física.

Por outro lado, o fluxo gravitacional oriundo do Tanque 1 atua como entrada do Tanque 2, conferindo a este segundo estágio um comportamento dinâmico de segunda ordem, mais lento e acentuado por não linearidades do escoamento. Para governar o nível do Tanque 2, a malha externa (mestre) da arquitetura em cascata foi projetada utilizando um controlador baseado em Lógica *Fuzzy*. O núcleo *Fuzzy* avalia o erro de rastreamento (diferença entre o nível desejado e o medido) em conjunto com a sua taxa de variação, extraída por um filtro derivativo. Através de regras de inferência linguísticas, o controlador gera uma ação suave e adaptativa.

A característica central dessa topologia em cascata é que a saída do controlador *Fuzzy* não atua diretamente na bomba. Em vez disso, ela estabelece dinamicamente o valor de referência exigido para a malha interna (o PID do Tanque 1). Adicionalmente, um mecanismo seletor (*Switch*) foi implementado para permitir a comutação entre a ação do mestre *Fuzzy* e uma malha alternativa direta, conferindo flexibilidade aos ensaios experimentais.

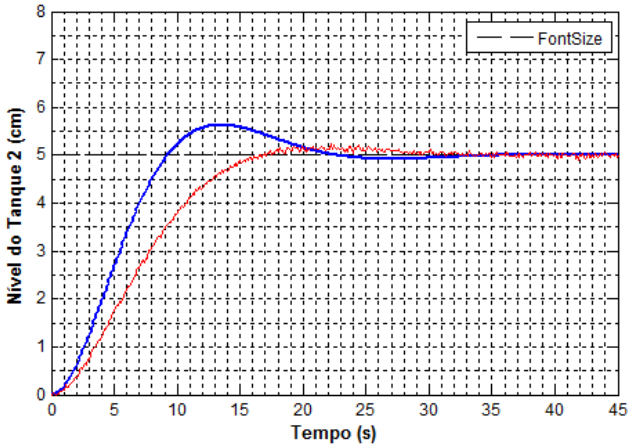


Figura 3: *Comparação entre o controlador Fuzzy e o modelo matemático. Fonte: Autoria própria (2026).*

Conforme representado na Figura 3, a ação do controlador *Fuzzy* demonstra eficácia na mitigação do efeito não linear do sistema acoplado. A abordagem em cascata permite que o PID absorva os distúrbios iniciais rapidamente, enquanto o *Fuzzy* garante um rastreamento de trajetória suave, com um tempo de acomodação de 21 segundos e estabilização robusta no segundo tanque. Apesar da estabilização do sistema, a comparação entre a bancada física e o modelo matemático também evidencia diferenças no comportamento transitório, indicando que a representação virtual ainda apresenta limitações na reprodução da dinâmica real do processo.

3.3 Sistema de Tanques Acoplados da Quanser

O sistema experimental utilizado neste trabalho baseia-se na bancada de tanques acoplados da Quanser, apresentada na Figura 4, (*Coupled Tanks*), uma plataforma amplamente empregada na validação de estratégias de controle avançado e na implementação de Gêmeos Digitais. A planta física é composta essencialmente pelos seguintes elementos:

- Bomba Hidráulica (Atuador): Responsável por bombear a água a partir de um reservatório inferior e fornecer a vazão de entrada diretamente para o sistema, operando através de um sinal de tensão elétrica condicionado.

- Tanque 1 (Malha Interna): Posicionado no estágio superior, recebe o fluxo direto da bomba. O escoamento deste tanque ocorre por gravidade através de um orifício calibrado em sua base, funcionando como afluente direto para o estágio inferior.

- Tanque 2 (Malha Externa): Posicionado abaixo do primeiro, recebe a água proveniente do escoamento do Tanque 1. O escoamento final ocorre também por gravidade em direção ao reservatório base, fechando o circuito hidráulico.

- Instrumentação e Sensores: Ambos os tanques estão equipados com sensores de nível que convertem a altura da coluna de água em sinais de tensão elétrica, permitindo a aquisição de dados em tempo real por meio da interface de hardware (*HIL*).

3.4 Interface Gráfica

Para consolidar o conceito de Gêmeo Digital e permitir a interação em tempo real com a planta física, desenvolveu-se um sistema supervisório baseado em tecnologias web, utilizando a plataforma Node-RED. A integração entre o modelo matemático processado no MATLAB/*Simulink* e a interface gráfica é viabilizada pelo protocolo de comunicação TCP/IP, através do bloco *Stream Client*, garantindo a transmissão contínua dos dados operacionais e de controle.

O ambiente do supervisório foi estruturado para fornecer tanto o monitoramento quanto o comando

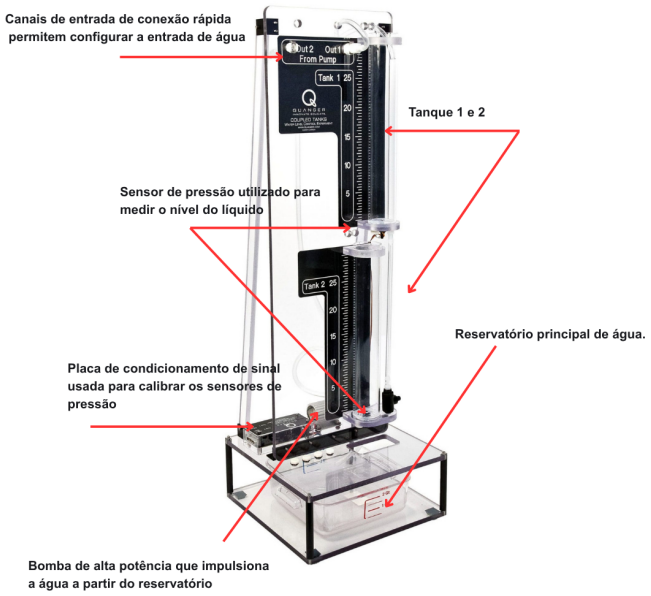


Figura 4: *Descrição do sistema de Tanques Acoplados da Quanser. Fonte: Autoria própria (2026).*

remoto do processo. Como visto na Figura 5, o Painel de Operação centraliza as ações do usuário, disponibilizando chaves de comutação para habilitar o controle via web e o modo de simulação. Por meio deste painel, o operador pode selecionar o tanque alvo da ação de controle e ajustar o valor de referência (*setpoint*) utilizando uma barra de rolagem deslizante que define a altura desejada em centímetros.

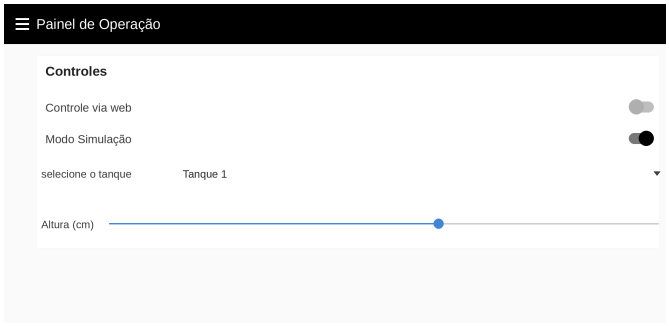


Figura 5: *Painel de controle virtual. Fonte: Autoria própria (2026).*

Além dos controles, a interface exibe, através de um gráfico, os valores numéricos instantâneos dos níveis do Tanque 1 e do Tanque 2, a tensão aplicada à bomba hidráulica e um indicador de status que confirma a normalidade do sistema, como apresentado na Figura 6.

Como elemento central do Gêmeo Digital, o painel conta também com uma representação virtual bidimensional do sistema físico, visto na Figura 7.



Figura 6: *Representação gráfica do sistema físico. Fonte: Autoria própria (2026).*

Essa interface ilustra graficamente os dois reservatórios em cascata. Animada dinamicamente pelos dados recebidos via TCP/IP, a representação mimetiza o comportamento da planta real, atualizando o volume da coluna de água virtual de forma sincronizada com as variações físicas. Essa topologia de supervisório não apenas facilita a análise visual do escoamento, mas também comprova a viabilidade da aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 para o monitoramento e a teleoperação de processos industriais de controle de nível.

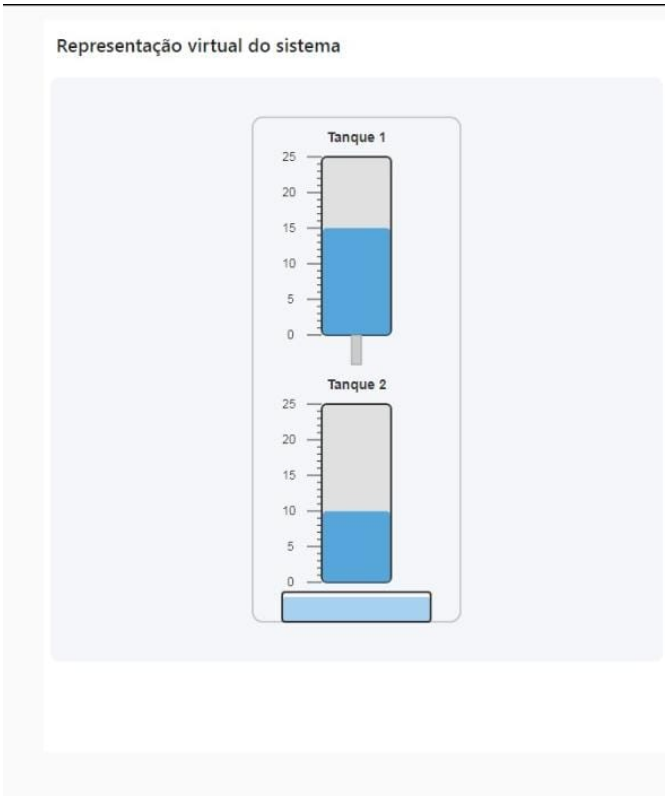


Figura 7: *Painel de Operação da interface gráfica do Gêmeo Digital. Fonte: Autoria própria (2026).*

Cabe ressaltar que a atual infraestrutura de supervisório compõe a etapa de validação da interface e comunicação do projeto. Como trabalhos futuros, a pesquisa dará continuidade à consolidação definitiva do Gêmeo Digital, visando a sua operação autônoma em ambiente *web* e em nuvem. O objetivo é embarcar os modelos matemáticos e algoritmos de controle diretamente na plataforma online, permitindo que o sistema inteligente funcione de forma independente, descentralizada e ininterrupta, sem a necessidade de execução local simultânea do MATLAB/*Simulink* para o monitoramento e atuação sobre a planta física.

4 Discussão da Proposta em Relação às Soluções Existentes

O levantamento de soluções comerciais permitiu identificar diferentes abordagens para a aplicação de Gêmeos Digitais em ambientes industriais. Entre elas, a Sensia integra tecnologias de automação, conectividade e análise de dados para apoiar a digitalização e a otimização de operações no setor de petróleo e gás (SENSIA, 2026). A SLB, por meio da solução OptiSite, combina Gêmeos Digitais e inteligência artificial para fornecer informações preditivas e apoiar a otimização de instalações, equipamentos e dutos (SLB, 2025). A SORBA.ai, por sua vez, disponibiliza uma plataforma de inteligência artificial industrial que integra ferramentas de análise de dados, aprendizado de máquina e Gêmeos Digitais. A solução permite desenvolver modelos para monitoramento de ativos, identificação de anomalias, manutenção preditiva e otimização de processos industriais, oferecendo recursos de simulação e controle avançado (SORBA.AI, 2026).Outras soluções apresentam enfoques distintos, como a Vidya, que utiliza representações digitais para o gerenciamento da integridade de ativos industriais (VIDYATEC, 2025); a Seeq, voltada à análise avançada de dados operacionais e à identificação de oportunidades de melhoria em processos industriais (SEEQ, 2026); e a Visco, que oferece um ambiente de visualização integrado a modelos tridimensionais, dados operacionais e ferramentas de análise de riscos (VISCO, 2026). Essas aplicações demonstram a diversidade de possibilidades associadas aos Gêmeos Digitais, que podem atender desde necessidades de monitoramento e análise de dados até a gestão da integridade e a otimização de processos.

Em relação a essas soluções, o trabalho desenvolvido apresenta uma abordagem experimental, direcionada à integração entre uma planta física de tanques acoplados, sua representação matemática e uma interface de supervisão remota. A arquitetura proposta combina o MATLAB/Simulink, utilizado na modelagem e implementação das estratégias de controle, com o Node-RED, responsável pela visualização dos dados e pela interação com o processo por meio de uma interface web. Além disso, a aplicação de controladores PID e Fuzzy em uma estrutura de controle em cascata permite explorar, em um mesmo ambiente, a integração entre modelagem, controle e monitoramento. Dessa forma, a contribuição do trabalho está no desenvolvimento de um protótipo experimental que permite investigar aspectos práticos da implementação de Gêmeos Digitais em sistemas de controle de processos, constituindo uma base para futuras ampliações, como a incorporação de recursos de análise de dados, diagnóstico de falhas e otimização operacional.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um protótipo de Gêmeo Digital aplicado ao sistema experimental de Tanques Acoplados da Quanser. Fundamentado nos preceitos da Indústria 4.0, o projeto integrou modelagem matemática, estratégias de controle híbridas e a criação de uma interface de supervisão remota, consolidando uma arquitetura ciberfísica funcional.

A avaliação da malha de controle em cascata no ambiente MATLAB/*Simulink* evidenciou a eficácia da abordagem proposta. A alocação de um controlador PID na malha interna permitiu uma resposta rápida na mitigação de distúrbios e na estabilização do Tanque 1. Simultaneamente, o controlador baseado em Lógica *Fuzzy*, atuando na malha externa, demonstrou elevada capacidade adaptativa ao lidar com as dinâmicas não lineares e de segunda ordem do Tanque 2. A análise comparativa confirmou que o Gêmeo Digital mimetiza de forma satisfatória o comportamento da planta real.

Adicionalmente, a implementação do painel de operação via plataforma Node-RED cumpriu o objetivo de estabelecer uma comunicação de dados em tempo real via protocolo TCP/IP. Este sistema supervisório viabilizou a operação via *web* e o monitoramento visual do escoamento, servindo como a interface definitiva entre o operador e o sistema interligado.

Como perspectivas para trabalhos futuros, almeja-se a transição desta infraestrutura para um ambiente de computação em nuvem. O objetivo é permitir que os algoritmos de controle e o Gêmeo Digital operem

de forma autônoma e descentralizada na *web*, dispensando a execução local. Em suma, o projeto atingiu os seus objetivos iniciais, fornecendo uma base tecnológica robusta e reforçando a capacitação técnica, analítica e de desenvolvimento de sistemas essenciais no domínio da Engenharia de Computação.

Referências

BREQUE, M.; NUL, L. D.; PETRIDIS, A. *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Luxembourg, 2021.

FRONTONI, E. et al. Industry 4.0: A bibliometric analysis and systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018.

GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. The digital twin paradigm for future nasa and us air force vehicles. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1818.

GRIEVES, M. *Complex systems engineering theory*. 2002. Apresentação no Product Lifecycle Management (PLM) Center of Excellence, University of Michigan.

LIN, D. et al. Strategic response to industry 4.0: An empirical investigation on the chinese automotive industry. *International Journal of Production Economics*, v. 200, p. 589–605, 2018.

NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S. *Fuzzy Control*. Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1998.

PFEIFFER, S. The vision of "Industrie 4.0" in the making—a case of future told, tamed, and traded. *Nanoethics*, v. 11, n. 1, p. 107–121, 2017.

Quanser. *Coupled Tanks User Manual*. Markham, ON, Canada, 2012.

SCHLEICH, B. et al. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, v. 66, n. 1, p. 141–144, 2017.

SEBORG, D. E. et al. *Process Dynamics and Control*. 4. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.

SEEQ. *Seeq: Plataforma de Análise de Dados Industriais*. 2026. Disponível em: <https://www.seeq.com>. Acesso em: 6 nov. 2026.

SENSIA. *Automation and Digitalization*. 2026. Disponível em: <https://www.sensiaglobal.com>. Acesso em: 5 nov. 2026.

SLB. *SLB Launches Industry-First AI Solution for Entire Production Networks*. 2025. Disponível em: <https://www.slb.com>. Acesso em: 5 nov. 2026.

VIDYATEC. *Suíte Digital de Gestão de Integridade de Ativos*. 2025. Disponível em: <https://vidyatec.com>. Acesso em: 6 nov. 2026.

VISCO. *VCOG Digital Twin Solution*. 2026. Disponível em: <https://viscocg.com>. Acesso em: 5 nov. 2026.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering*, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.