



**REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA**  
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

**ANÁLISE DO IMPACTO DA LATÊNCIA DE REDE NO DESEMPENHO DE PROJETOS DE GÊMEO  
DIGITAL NA INDÚSTRIA 4.0**

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF NETWORK LATENCY ON THE PERFORMANCE OF DIGITAL  
TWIN PROJECTS IN INDUSTRY 4.0**

Elias Aoad Neto <sup>1, i</sup>  
João Henrique Kleinschmidt <sup>2, ii</sup>

Data de submissão: (28/03/2025) Data de aprovação: (07/05/2025)

**RESUMO**

Este estudo analisa o impacto da latência no desempenho de projetos de gêmeos digitais da Indústria 4.0, baseados em redes de comunicação com múltiplos protocolos. Foram realizados experimentos no laboratório industrial OpenLab do SENAI-SP, avaliando redes com protocolos de tecnologia da informação (TI) e de tecnologia operacional (TO) de automação industrial, com foco na sincronização em tempo real. Os resultados destacam que infraestruturas otimizadas são cruciais para o sucesso de gêmeos digitais, garantindo eficiência na transmissão de dados. Este trabalho fornece considerações para a análise de projetos que demandam comunicação com baixa latência, contribuindo para operações industriais mais modernas e eficazes.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0; gêmeo digital; latência de rede; protocolos de comunicação; sincronização em tempo real.

**ABSTRACT**

This study analyzes the impact of latency on the performance of Industry 4.0 digital twin projects based on multi-protocol communication networks. Experiments were conducted at the SENAI-SP OpenLab industrial laboratory, evaluating networks with information technology (IT) and operational technology (OT) protocols for industrial automation, focusing on real-time synchronization. The results highlight that optimized infrastructures are crucial for the success of digital twins, ensuring efficient data transmission. This work provides considerations for the analysis of projects that require low-latency communication, contributing to more modern and efficient industrial operations.

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia da Informação pela UFABC. E-mail: elias.neto@ufabc.edu.br

<sup>2</sup> Professor Associado da UFABC e Dr. em Engenharia Elétrica pela Unicamp. E-mail: joao.kleinschmidt@ufabc.edu.br

**Keywords:** Industry 4.0; Digital Twin; Network Latency; Communication Protocols; Real-Time Synchronization.

## 1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 trouxe uma profunda transformação nas operações industriais ao integrar sistemas ciberfísicos, internet das coisas industrial (*IIoT*), inteligência artificial e redes avançadas. Nesse contexto, os Gêmeos Digitais (*Digital Twin - DT*) destacam-se como ferramentas essenciais para a simulação, monitoramento e controle em tempo real de processos industriais (Minerva, 2020), pois permitem replicar virtualmente sistemas físicos, otimizando operações e antecipando falhas.

No contexto da digitalização industrial, três conceitos fundamentais (Kritzinger et al., 2018) estruturam a representação de ativos físicos em ambientes virtuais: o modelo digital, que consiste em uma descrição estática do ativo físico; a sombra digital, que incorpora a transferência unidirecional de dados do ativo físico para o ambiente virtual; e o gêmeo digital, que se distingue por viabilizar uma comunicação bidirecional entre os mundos físico e digital, permitindo não apenas o monitoramento contínuo, mas também o ajuste dinâmico e o controle em tempo real dos processos industriais.

Complementando essa perspectiva, Robinson, Pawlowski e Volkov (2003) definem o gêmeo digital como uma representação digital de alta fidelidade de uma entidade física, cuja utilidade depende diretamente da sincronização e da confiabilidade da comunicação entre os domínios digital e físico. Assim, a construção de uma infraestrutura de comunicação confiável e determinística é apresentada como um fator crítico para a correta implementação de gêmeos digitais industriais.

Um dos desafios críticos para a implementação de *DTs* é a latência de rede, que mede o atraso da chegada dos dados transmitidos ao receptor, comprometendo a sincronização entre os sistemas envolvidos. A latência de rede representa um elemento determinante para o desempenho de gêmeos digitais aplicados em ambientes industriais, especialmente nas aplicações que exigem controle em tempo real e respostas com precisão de milissegundo.

Em contextos operacionais críticos, ciclos de atualização inferiores a 10 milissegundos são frequentemente necessários para assegurar a confiabilidade, a segurança e a continuidade dos processos. Essa exigência encontra respaldo na classificação proposta por Jasperneite e Neumann (2001), que aponta a necessidade de valores típicos para requisitos em tempo real nos diferentes níveis dos sistemas de comunicação nas indústrias.

Conforme estabelecido pela norma IEC 61508 (IEC, 2010), o tempo de resposta de um sistema de automação tolerante a falhas deve ser calculado levando em conta três componentes principais: o tempo de detecção do sensor ( $T_s$ ), o tempo de processamento ( $T_p$ ) no Controlador Lógico Programável (CLP) e o tempo de ação dos atuadores ( $T_a$ ). O tempo máximo para operação do gêmeo digital ( $T_g$ ) deve ser, portanto, menor ou igual à somatória dos tempos de detecção do sensor, do processamento do programa do CLP e do acionamento do atuador, conforme mostrado na equação (1) a seguir:

$$T_g \leq T_s + T_p + T_a \quad (1)$$

De acordo com Siemens (2014), o processamento do programa no CLP, incluindo as

redes de automação integradas, pode introduzir latências com impacto mínimo de 1 ms, dependendo da configuração e do ciclo de operação. Em contrapartida, o atraso na propagação de ondas eletromagnéticas em cabos, ligados aos sensores e atuadores, é insignificante na maioria dos casos. Por exemplo: em um cabo de 100 metros, com fator de velocidade de 0,66 à da luz, o tempo de propagação é de apenas 505 nanosegundos. Já o tempo de transmissão para que um dado da automação industrial chegue na aplicação de um gêmeo digital pode ser da ordem de vários milissegundos, visto que o gêmeo digital geralmente é executado em um servidor conectado à rede de TI, que possui atrasos maiores que uma rede industrial.

Além das exigências de tempo de ciclo, destaca-se também que protocolos industriais específicos apresentam vantagens significativas no que diz respeito à redução da latência, quando comparados a protocolos amplamente utilizados em redes de TI. Conforme Knezic *et al.* (2010), o protocolo EtherCAT foi projetado para atender aplicações determinísticas e em tempo real, oferecendo desempenho superior ao dos protocolos baseados em IP, os quais tendem a apresentar maior variabilidade e atraso na comunicação, conforme discutido por Wilamowski e Irwin (2011). Observa-se ainda uma carência de estudos que aprofundem na medição da latência para a comparação entre redes de tecnologia da informação e tecnologia operacional no atendimento aos requisitos de tempo real, especialmente em contextos industriais críticos.

Alguns trabalhos encontrados se concentram na integração com protocolos de comunicação e na análise de latência, destacando a importância de redes de alto desempenho para garantir a sincronização entre o físico e o digital (Zhou *et al.* 2022). Estudos como os de Chukhno *et al.* (2022) e Costa (2006) também exploram as possibilidades de infraestrutura computacional para atender às restrições de latência entre dispositivos físicos e seus gêmeos digitais.

Este artigo adota uma abordagem experimental, realizada no OpenLab do SENAI-SP, para avaliar diferentes infraestruturas de redes, medições de latências e protocolos de comunicação. O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 discute a literatura acadêmica sobre os gêmeos digitais e na Seção 3 é apresentada a metodologia. A Seção 4 mostra os resultados e a Seção 5 faz as considerações finais.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A adoção de tecnologias avançadas associadas à Indústria 4.0 tem sido um esforço global, com países e regiões investindo em pesquisa para aprimorar produtividade, qualidade e confiabilidade na manufatura. Conforme Mader (2000), muitas aplicações industriais são relativamente lentas em comparação ao tempo de ciclo dos CLPs. Em contextos industriais, o tempo de ciclo máximo esperado para aplicações críticas de controle é de até 10 ms.

Dentre as tecnologias emergentes, os gêmeos digitais industriais se destacam por sua capacidade de replicar, em tempo real, todas as condições vivenciadas por equipamentos de produção físicos. Para garantir esse efeito, é essencial projetar um sistema robusto de coleta e alteração dos dados nos pontos de digitalização das máquinas, possibilitando atuação no mundo real e comparações precisas entre o ambiente físico e o digital.

A implementação eficaz de gêmeos digitais exige arquiteturas computacionais capazes de lidar com restrições de latência, garantindo integridade e atualização em tempo real, conforme destacado por Chukhno *et al.* (2022) e Costa (2006). Esses autores evidenciam que

falhas ou instabilidades na comunicação comprometem a representação digital do sistema físico, ocasionando defasagens, perda de informações ou comportamentos inconsistentes.

Nesse contexto, a comunicação surge como um fator essencial para o sucesso dos projetos de *DT*. Limitações na comunicação são responsáveis por diversos erros na representação digital, tornando crucial projetar uma infraestrutura que assegure confiabilidade na transmissão de dados e atualização em tempo real, promovendo maior integração entre os mundos físico e virtual.

A revisão de literatura deste artigo teve como objetivo identificar os principais métodos, técnicas e desafios na implementação de Gêmeos Digitais aplicados à Indústria 4.0, com especial atenção à latência de rede em ambientes industriais. Para isso, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com a análise de 561 estudos publicados entre 2018 e 2024, dos quais 15 foram selecionados após rigorosa triagem com critérios de inclusão, exclusão e avaliação de qualidade, finalizada em setembro de 2024.

A estratégia de busca dos artigos que compõem esta revisão foi estruturada em quatro etapas principais: (i) identificação das palavras-chave relacionadas à pergunta de pesquisa; (ii) levantamento de sinônimos com base em estudos relevantes sobre gêmeos digitais; (iii) uso do operador booleano "OR" entre os sinônimos identificados; e (iv) aplicação do operador "AND" para conectar os principais termos. Essa lógica permitiu a construção de expressões de busca específicas para cada base de dados, conforme apresentado no Quadro 1.

**Quadro 1 – Estratégia de busca e número de artigos recuperados por base de dados**

Base de dados	Artigos	Expressão de busca
IEEE Xplore	174	(( <i>"Industry 4.0"</i> OR <i>"Industrial Automation"</i> OR <i>"M2M"</i> OR <i>"Smart Manufacturing"</i> ) AND ( <i>"Digital Twin"</i> OR <i>"DT"</i> ) AND <i>"Industrial Network"</i> ) <b>Filtros aplicados:</b> Journals; Magazines; Books; Digital Twin <b>Ordenação:</b> Most Cited Papers
ScienceDirect	160	(( <i>"Industry 4.0"</i> OR <i>"Smart Manufacturing"</i> ) AND ( <i>"Digital Twin"</i> OR <i>"DT"</i> ) AND <i>"Industrial Network"</i> ) <b>Período:</b> 2019–2024 <b>Ordenação:</b> Relevance
Scopus	110	(( <i>"Industry 4.0"</i> OR <i>"Industrial Automation"</i> OR <i>"M2M"</i> OR <i>"Smart Manufacturing"</i> ) AND ( <i>"Digital Twin"</i> OR <i>"DT"</i> )) AND ( <i>"Industrial Network"</i> ) AND <i>PUBYEAR &gt; 2019 AND PUBYEAR &lt; 2025</i> <b>Ordenação:</b> Cited by (highest) <b>Keyword:</b> Limited to Industry 4.0, Limited to Digital Twin
Web of Science	117	(( <i>TS=(</i> <i>"Digital Twin"</i> OR <i>"DT"</i> <i>) AND TS=(</i> <i>"Industry 4.0"</i> OR <i>"Industrial Automation"</i> <i>) AND TS=(</i> <i>"Industrial Network"</i> <i>)</i> ) <b>Refinamento:</b> Publication Years: 2020 or 2021 or 2022 or 2023 or 2024; Document Types: Article; Citation Topics Micro: 4.224.1040 Industry 4.0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para garantir a consistência na seleção dos estudos mais relevantes, aplicou-se uma classificação automática baseada na ocorrência das palavras-chave nos metadados dos

artigos. Utilizando o software StArt v. 3.3 Beta 03 (*State of the Art through Systematic Review*), desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LAPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), os artigos receberam uma pontuação proporcional à localização das palavras-chave: 5 pontos para ocorrência no título, 3 pontos no resumo e 2 pontos nas palavras-chave. Essa abordagem possibilitou uma triagem alinhada aos critérios definidos para a revisão sistemática.

Os resultados apontam uma escassez de estudos focados em aspectos práticos de latência e comunicação em tempo real entre o *DT* e o sistema físico. A maioria das pesquisas concentra-se na modelagem, nas ferramentas utilizadas e nos benefícios dos gêmeos digitais, mas poucas abordam com profundidade os requisitos de comunicação para sincronização sub 10ms – essencial em aplicações industriais em tempo real.

A análise dos estudos selecionados revelou quatro categorias principais:

- a) C1: Metodologias para projetos de *DT*;
- b) C2: Ferramentas aplicadas nos projetos;
- c) C3: Contribuições para redes industriais;
- d) C4: Aplicações práticas em gêmeos digitais industriais.

Dentre os 15 artigos analisados, todos apresentaram contribuições práticas para projetos de *DT* (C4), 90% também abordaram redes industriais (C3) e ferramentas (C2), enquanto apenas 60% detalharam metodologias específicas (C1). Destacam-se abordagens como uso de co-simulação, manutenção preditiva, integração com redes NB-IoT e uso de blockchain para segurança de dados. Ferramentas como MATLAB, Simulink, CATIA e plataformas de computação foram frequentemente empregadas.

Alguns autores confirmam que a latência de rede é um fator limitante para a fidelidade e eficácia de um *DT* industrial dinâmico, afetando diretamente a qualidade da sincronização com o ambiente físico. Minerva, Lee e Crespi (2020) destacam que a latência impacta diretamente a atualização dos gêmeos digitais e a capacidade de resposta dos sistemas, sendo um dos principais desafios técnicos para a implementação eficaz dessa solução em ambientes conectados à Internet das Coisas. A falta de padronização nos requisitos de rede, especialmente no que se refere à comunicação determinística, e a diversidade de protocolos industriais, tais como: EtherCAT, Modbus TCP e OPC UA, exigem atenção na escolha de arquiteturas de comunicação eficazes.

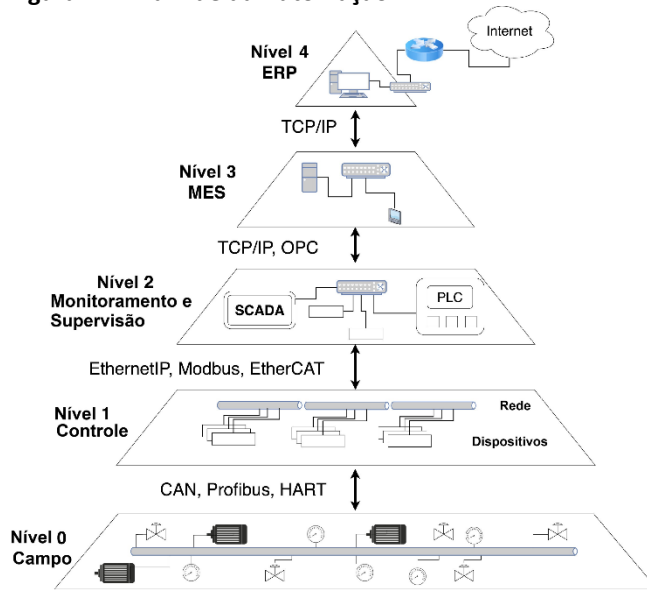
Conclui-se que, embora os gêmeos digitais estejam bem estabelecidos como tecnologias promissoras na Indústria 4.0, há uma lacuna significativa quanto à análise sistemática da latência e da estabilidade da comunicação, o que compromete seu uso em aplicações industriais críticas em tempo real. Este estudo propõe preencher parte dessa lacuna com experimentos sobre latência em redes reais de TI e de automação.

### 3 METODOLOGIA

Os experimentos conduzidos neste estudo fundamentam-se na lógica da pirâmide da automação industrial, relacionando os dados analisados aos quatro níveis que a compõem. A Figura 1, adaptada de Zunino (2020), ilustra essa estrutura hierárquica, destacando os protocolos de comunicação típicos de cada camada. Conforme esse modelo, os níveis mais próximos do chão de fábrica concentram uma maior quantidade de elementos e informações. À medida que se avança para os níveis superiores, esses dados são progressivamente refinados, contextualizados e integrados, gerando informações mais relevantes para a

supervisão e a tomada de decisão.

**Figura 1 – Pirâmide da Automação**



Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Zunino (2020).

Para analisar o impacto da latência da rede, foram adotados os valores típicos citados por Jasperneite e Neumann (2001), mostrados na Tabela 1. Os valores nesta tabela apresentam os requisitos de tempo real em sistemas industriais, divididos nos níveis de planta, controle e dispositivo. No nível de planta, as comunicações envolvem grandes volumes de dados, mais estações e tempos de resposta mais longos. Já nos níveis de controle e dispositivo, os requisitos tornam-se mais rigorosos, com menor volume de dados, menos estações e tempos de resposta extremamente curtos, especialmente no nível de dispositivo (1 ms). Esses requisitos refletem a necessidade de baixa latência em níveis operacionais críticos, enquanto níveis superiores priorizam supervisão e gerenciamento com menor frequência de comunicação.

**Tabela 1 – Requisitos de tempo real em diferentes níveis de sistemas industriais**

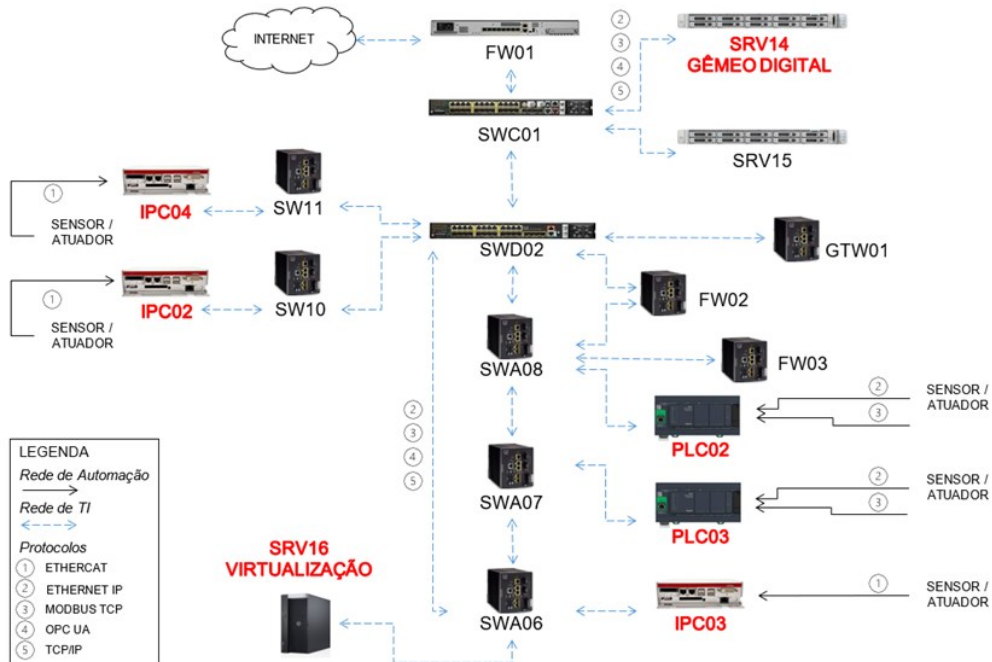
Nível	Número de Estações	Tempo de Resposta	Período
Planta	200	500 ms	-
Controle	20	5 ms	10 ms
Dispositivo	100	1 ms	1 ms

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Jasperneite e Neumann (2001).

Este estudo adota uma abordagem experimental, conduzida em um laboratório equipado com infraestrutura de ponta para automação industrial e redes de comunicação. Conforme ilustrado na Figura 2, todos os equipamentos identificados em vermelho, integrados ao projeto do gêmeo digital, estão atualmente conectados às redes de TI e de automação (TO). Para simplificar o fluxograma da rede de automação, os protocolos industriais indicados na legenda pelos números 1, 2 e 3, também representam individualmente cada um dos módulos remotos da comunicação industrial presentes nessa estrutura. Esses módulos têm a função de intermediar a comunicação entre os sinais gerados por sensores e enviados aos atuadores e a comunicação com os controladores lógicos PLCs e IPCs, realizando a conversão desses sinais para os protocolos industriais utilizados nas redes

de automação.

**Figura 2 – Redes de TI e TO – OpenLab**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os principais equipamentos utilizados neste estudo estão listados resumidamente nos Quadros 2 e 3. Esses equipamentos estão integrados para a execução de um processo industrial discreto, com destaque para a aplicação de tecnologias avançadas de fabricação e controle de processos.

**Quadro 2 – Equipamentos de rede e servidores**

Tag	Equipamento
SRV14 e 15	Servidor UCS CISCO C220M5
SRV16	Servidor DELL T7600
SWC01	Switch Core Industrial CISCO IE5000
SWD02	Switch CISCO IE4010
SWA06, 07 e 08	Switch Industrial CISCO IE4000
SW10 e 11	Modem óptico Furukawa FK-ONT-G420R
GTW01	Gateway CISCO IC3000
FW01	Firewall CISCO Firepower 2110
FW02 e 03	Firewall Industrial CISCO ISA 3000

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Quadro 3 – Equipamentos de controle e automação**

<b>Tag</b>	<b>Equipamento</b>
IPC02, 03 e 04	Computador Industrial IPC C6905 Beckhoff
PLC02 e 03	CLP M262 Schneider

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados relevantes sobre o impacto da latência de rede, coletados pelos dispositivos de automação, foram transmitidos por diferentes infraestruturas de rede presentes no ambiente do laboratório, considerando os seguintes protocolos de comunicação: da automação industrial OPC UA, Ethernet/IP, EtherCAT, Modbus TCP, além da pilha de protocolos TCP/IP, tradicionalmente utilizada nas redes de TI.

Dessa forma, as informações enviadas por um sensor ou atuador trafegam inicialmente pela rede industrial e, em seguida, pela rede de TI até chegar ao gêmeo digital. A resposta gerada pelo gêmeo retorna pelas duas redes (TI e TO) até atingir o atuador. Para que o gêmeo digital opere em tempo real, os requisitos de tempo definidos anteriormente pela Tabela 1 devem ser respeitados — máximo de 10 ms, no caso de operações no nível de controle.

### 3.1 Características de Latência nos Protocolos de Comunicação Industrial

Entre os principais desafios da convergência de dados para aplicações com gêmeos digitais industriais, destaca-se a diferença nos valores típicos de latência entre os diversos protocolos de comunicação utilizados. A Tabela 2 a seguir apresenta uma síntese das taxas de transmissão e latências usuais observadas nos principais protocolos industriais empregados na automação e integração de sistemas:

**Tabela 2 – Protocolos industriais: taxas de transmissão e latências típicas**

<b>Protocolo</b>	<b>Taxa de Transmissão</b>	<b>Latência Típica</b>
EtherCAT	Até 100 Mbps	Microssegundos (< 100 $\mu$ s)
EtherNet/IP	Até 100 Mbps (padrão)	1 a 10 ms (modo cíclico)
Modbus TCP	Até 100 Mbps	10 a 100 ms
OPC UA	Variável, até 10 Gbps	De dezenas de ms até segundos
TCP/IP	Variável, até 10 Gbps	Milissegundos (latência variável)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da redução no volume de dados conforme se avança na hierarquia dos níveis de automação, a qualidade e a criticidade das informações aumentam, exigindo maior controle sobre os tempos de resposta. A norma IEC 61784-1 (IEC, 2023) aponta diretrizes para seleção de redes industriais conforme requisitos de desempenho.

Protocolos como o EtherCAT, por exemplo, são projetados especificamente para aplicações em tempo real, com transmissão de dados no mesmo quadro Ethernet que percorre os nós da rede sequencialmente, permitindo processamento imediato dos dados e reduzindo significativamente a latência.

O protocolo EtherNet/IP, por sua vez, utiliza a pilha de protocolos TCP/UDP/IP e o *Common Industrial Protocol (CIP)*, sendo amplamente compatível com redes convencionais, porém com desempenho sensível à carga da rede e à configuração de qualidade de serviço (*Quality of Service - QoS*).

Já o protocolo Modbus TCP, mesmo operando sobre Ethernet, apresenta limitações

por sua natureza mestre-escravo e pela ausência de mecanismos nativos de controle de tempo real, tornando-se menos adequado para aplicações que demandam ciclos abaixo de 10 ms.

O protocolo OPC UA destaca-se pela flexibilidade e segurança, sendo ideal para integração entre sistemas heterogêneos. No entanto, sua arquitetura orientada a serviços introduz sobrecargas de comunicação que impactam negativamente a latência em cenários de controle em tempo real.

Por fim, a pilha TCP/IP, apesar de onipresente nas redes de TI, não foi concebida para comunicações determinísticas, o que resulta em variações imprevisíveis de atraso — tornando-a ineficaz para controle direto de processos industriais críticos.

Compreender essas diferenças é essencial para a seleção da arquitetura de comunicação mais adequada, especialmente em projetos que buscam sincronização precisa entre os sistemas físico e digital.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os experimentos realizados forneceram dados relevantes sobre o impacto da latência de rede no desempenho de gêmeos digitais industriais. Dois protocolos de comunicação foram utilizados nas medições: o ICMP (*Internet Control Message Protocol*), que é um protocolo fundamental da camada de rede, utilizado para relatar erros e fornecer informações operacionais sobre a comunicação entre dispositivos na internet, e o EtherCAT, utilizado como protocolo nas redes de automação industrial baseado em Ethernet, projetado para comunicação em tempo real com alta eficiência e baixa latência.

A coleta de dados de medição de latência foi realizada com o uso de duas ferramentas de software: o Wireshark, para monitoramento e análise da latência no tráfego da rede IP; e o TwinCAT (Beckhoff), para monitoramento e análise do tráfego da rede EtherCAT, envolvendo os dispositivos de automação IPC02, IPC03 e IPC04.

As análises identificaram diversos fatores que podem contribuir para o aumento da latência na rede:

- a) tráfego intenso de dados;
- b) ausência de políticas eficientes de priorização de tráfego;
- c) uso de sistemas de detecção de intrusão (IDS) mal configurados;
- d) cabos danificados, interferência eletromagnética ou conexões instáveis;
- e) sobrecarga computacional em máquinas virtuais;
- f) alto consumo de recursos em servidores que executam aplicações pesadas, como o banco de dados.

### 4.1 Rede IP

A metodologia utilizada para medir a latência da rede de TI foi baseada na execução do comando *ping*, seguindo os princípios definidos pela RFC 2544 - *Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices* (Bradner e Mcquaid, 1999). O procedimento incluiu a variação do tamanho dos pacotes, envio de um fluxo contínuo e repetição por pelo menos 30 vezes, com registro da média de latência. A latência foi medida como a diferença entre o tempo de envio e o tempo de recepção da resposta (*echo reply*).

Para os testes, foram estabelecidas cinco conexões distintas entre o servidor (SRV14) e cada dispositivo de automação (IPC02, IPC03, IPC04, PLC02 e PLC03), emitindo o comando *ping* a partir do servidor SRV14 por 30 vezes consecutivas. Os testes consideraram diferentes tamanhos de pacotes: 60, 125, 250, 500 e 1000 bytes. A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos nas trinta medições de latência entre o servidor e os dispositivos de automação acessíveis via rede IP.

Os *switches* industriais presentes no projeto - identificados com o *Tag SW* - operam com baixa latência, geralmente na ordem de nanossegundos (CISCO, 2021), e, por isso, foram desconsiderados nesta análise.

Para a execução do comando *ping*, foram adotados os seguintes parâmetros:

**-n 30**: número de solicitações de eco a serem enviadas.

**-l**: especifica o tamanho do buffer em bytes (1000, 500, 250, 125 e 60).

**-r 1**: registra a rota de saltos de contagem (IPv4).

Exemplo de comando: `ping -n 30 -l 1000 -r 1 10.1.1.14`, para enviar uma solicitação com 30 repetições, com tamanho de pacote de 1000 bytes, saltando um nó, ao endereço 10.1.1.14.

Os resultados da rede IP demonstraram diferenças significativas em termos de latência e adequação às demandas de sincronização em tempo real. Observou-se que o ICMP apresentou instabilidades no tráfego de dados, resultando em atrasos que podem comprometer o desempenho de projetos de gêmeo digital. Em aplicações que exigem operação em tempo real, latências superiores a 5 ms já comprometem a precisão e a sincronização dos sistemas, sendo essencial a identificação e mitigação desses atrasos. Conforme mostrado na Tabela 3, em vários casos o atraso introduzido foi superior a 10 ms, inviabilizando o uso do gêmeo digital para essas aplicações.

**Tabela 3 – Valores de latência máxima na rede IP (comando ping)**

Nº	TAG	Equipamento	<i>ping -l</i>	<i>ping -l</i>	<i>ping -l</i>	<i>ping -l</i>	<i>ping -l</i>
			1000	500	250	125	60
1	IPC02	PC Industrial Beckhoff	6,8 ms	6,8 ms	0,58 ms	6,13 ms	6,38 ms
2	PLC02	CLP M262 Schneider	8,0 ms	6,83 ms	7,08 ms	6,46 ms	6,13 ms
3	PLC03	CLP M262 Schneider	7,1 ms	6,42 ms	6,47 ms	0,66 ms	6,02 ms
4	IPC03	PC Industrial Beckhoff	5,0 ms	49,9 ms	4,62 ms	4,57 ms	45,5 ms
5	IPC04	PC Industrial Beckhoff	11,5 ms	5,19 ms	5,14 ms	5,19 ms	5,35 ms

Fonte: Elaborado pelo autor.

As latências anômalas observadas indicam possíveis problemas específicos na configuração da rede ou nos recursos dos equipamentos, podendo estar relacionados a congestionamento, *buffers* saturados, políticas de qualidade de serviço mal configuradas ou limitações internas do equipamento.

## 4.2 Rede de Automação

Conforme ilustrado na Figura 3, as medições foram realizadas entre o controlador IPC03 e os módulos remotos onde são conectados os sensores e atuadores, num total de 2.024.628 ciclos (pacotes). As análises, conduzidas com o protocolo EtherCAT, utilizaram o software TwinCAT para aquisição dos dados.

A rede EtherCAT foi configurada conforme os requisitos do projeto de automação instalado. Durante os testes, todos os terminais EtherCAT mantiveram-se operacionais, sem quadros perdidos ou erros de transmissão, conforme registrado na interface do TwinCAT (Figura 3).

A latência média por quadro (tamanho máximo de 1486 bytes) do protocolo EtherCAT foi calculada pela equação (2):

$$\begin{aligned} \text{Latência por quadro} &= 1 \div \text{Taxa de quadros por segundo} & (2) \\ \text{Latência por quadro} &= 1 \div 99 \approx 10,10 \text{ ms} \end{aligned}$$

**Figura 3 – Interface de medição de latência – EtherCAT**

The screenshot shows the TwinCAT software interface. On the left is the Solution Explorer showing a project named 'Embalagem'. The main window displays the EtherCAT configuration for the 'Embalagem' project. It includes a table of nodes and a counter table for transmission statistics.

No	Addr	Name	State	CRC
1	1001	Term 1 (EK1100)	OP	0, 0, 0
2	1002	Term 2 (EL6070)	OP	0
3	1003	Box 3 (EtherCAT EB80 series)	OP	0, 0
4	1004	Box 4 (BNI ECT-508-105-Z015)	OP	0

Counter	Cyclic	Queued
Send Frames	2024628	+ 348697
Frames / sec	99	+ 17
Lost Frames	0	+ 0
Tx/Rx Errors	0	/ 0

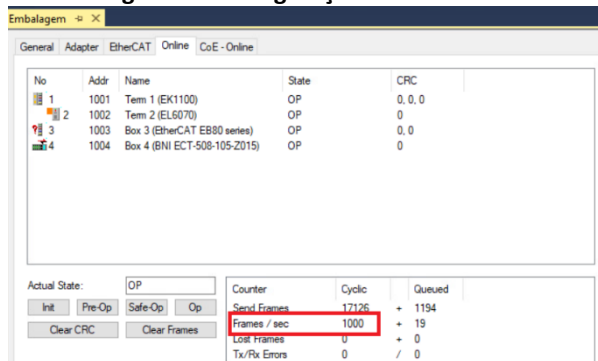
  

Number	Box Name	Address	Type
1	Term 1 (EK1100)	1001	EK1100
2	Term 2 (EL6070)	1002	EL6070
3	Term 5 (EL9011)		EL9011
4	Box 3 (EtherCAT EB80 series)	1003	EtherCAT EB80 series
5	Box 4 (BNI ECT-508-105-Z015)	1004	BNI ECT-508-105-Z015

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com uma taxa de transmissão de 99 quadros por segundo, a latência calculada por quadro é de aproximadamente 10,1 milissegundos. No entanto, o protocolo EtherCAT pode atingir desempenho médio inferior a 1 ms com as configurações adequadas no TwinCAT, mostrado na Figura 4, evidenciando sua capacidade de atender aplicações industriais com requisitos rigorosos de tempo real.

**Figura 4 – Configuração EtherCAT otimizada**



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a escolha do protocolo de comunicação é um fator determinante para o sucesso de projetos de gêmeos digitais. Enquanto a rede de TI pode ser considerada adequada para aplicações menos críticas, protocolos de automação como o EtherCAT mostram-se essenciais em cenários industriais nos quais a baixa latência é um requisito fundamental.

A adoção de infraestruturas de rede otimizadas — por exemplo, redes baseadas em fibra óptica associadas a protocolos industriais adequados — é recomendada para maximizar a eficiência dos processos e assegurar uma comunicação confiável entre os sistemas físicos e digitais. Os achados experimentais descritos neste estudo reforçam a literatura existente para os diferentes tópicos abordados até aqui, e fornecem evidências relevantes para a escolha das tecnologias de comunicação mais adequadas em projetos de gêmeos digitais.

As principais contribuições deste trabalho incluem:

- Identificação de requisitos específicos para o desenvolvimento de gêmeos digitais industriais;
- Análise comparativa de protocolos de comunicação industrial e
- A discussão sobre os impactos da latência e do desempenho de rede em aplicações em tempo real.

Como direções para trabalhos futuros, sugere-se a investigação de tecnologias emergentes, como redes privadas 5G e computação em borda (*edge computing*), visando à redução adicional da latência e à ampliação da escalabilidade dos gêmeos digitais em ambientes industriais. Além disso, estudos complementares podem explorar a integração de algoritmos de inteligência artificial para análise preditiva e otimização dinâmica de processos, promovendo avanços na eficiência e aplicabilidade dos gêmeos digitais no contexto da Indústria 4.0.

## REFERÊNCIAS

- BRADNER, S.; MCQUAID, J. **Benchmarking methodology for network interconnect devices**. Fremont: RFC Editor, 1999. (Request for Comments, 2544). Disponível em: <https://www.rfceditor.org/info/rfc2544>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- CISCO SYSTEMS. **Industrial automation design guide**. San Jose, 2021. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Verticals/Industrial%20Automation/IA%20Horizontal/DG/Industrial-AutomationDG.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- CHUKHNO, O. *et al.* Placement of social digital twins at the edge for beyond 5G IoT networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 23, p. 23927–23940, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3190737>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- COSTA, M. G. **Estratégia de automação em testes: requisitos, arquitetura e acompanhamento de sua implantação**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, Campinas, 2006. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1603219>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems**. Genebra: IEC, 2010. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/22273>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61784-1-0:2023**: Industrial networks – Profiles – Part 1-0: Fieldbus profiles – General concepts and terminology. Geneva: IEC, 2023. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/83453>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- JASPERNEITE, J.; NEUMANN, P. Performance evaluation of switched Ethernet in real-time applications. *In*: IFAC WORKSHOP ON FIELDBUS SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS (FeT'2001). **Proceedings** [...]. p. 15–16, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273202307> Performance Evaluation of Switched Ethernet in Realtime Applications. Acesso em: 27 mar. 2025.
- KNEZIC, M.; DOKIC, B.; IVANOVIC, Z. Topology aspects in EtherCAT networks. *In*: IEEE INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE – EPE-PEMC 2010. 14., **Proceedings** [...]. IEEE, 2010. p. T1-1–T1-6. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251959440> Topology aspects in EtherCAT networks. Acesso em: 27 mar. 2025.
- MADER, A. A classification of PLC models and applications. *In*: **Discrete Event Systems: Analysis and Control**. Boston: Springer US, 2000. p. 239–246. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/2243744> A Classification of PLC Models and Applications. Acesso em: 19 abr. 2025.

MALAKUTI, S. *et al.* **Digital twins for industrial applications**: definition, business values, design aspects, standards and use cases. 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/339460951\\_Digital\\_Twins\\_for\\_Industrial\\_Applications\\_Definition\\_Business\\_Values\\_Design\\_Aspects\\_Standards\\_and\\_Use\\_Cases](https://www.researchgate.net/publication/339460951_Digital_Twins_for_Industrial_Applications_Definition_Business_Values_Design_Aspects_Standards_and_Use_Cases). Acesso em: 27 mar. 2025.

MINERVA, R.; LEE, G. M.; CRESPI, N. **Digital twin in the IoT context**: a survey on technical features, scenarios, and architectural models. *Proceedings of the IEEE*, v. 108, n. 10, p. 1785–1824, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/342287143\\_Digital\\_Twin\\_in\\_the\\_IoT\\_Context\\_A\\_Survey\\_on\\_Technical\\_Features\\_Scenarios\\_and\\_Architectural\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/342287143_Digital_Twin_in_the_IoT_Context_A_Survey_on_Technical_Features_Scenarios_and_Architectural_Models). Acesso em: 27 mar. 2025.

ROBINSON, W. N.; PAWLOWSKI, S. D.; VOLKOV, V. Requirements interaction management. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 35, n. 2, p. 132–190, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/857076.857079>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SIEMENS. **SIMATIC S7-1500 cycle and response times**: function manual. 02/2014 ed. Siemens AG Industry Sector, 2014. Disponível em: <https://support.automation.siemens.com/WW/view/en/59191792>. Acesso em: 27 mar. 2025.

KRITZINGER, Werner; KARNER, Matthias; TRAAR, Georg; HENJES, Jan; SIHN, Wilfried. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, [S.l.], v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>. Acesso em: 12 maio 2025.

WILAMOWSKI, B. M.; IRWIN, J. D. **Industrial communication systems**. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315218434>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ZHOU, X. *et al.* Intelligent small object detection for digital twin in smart manufacturing with industrial cyber-physical systems. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 18, n. 2, p. 1377–1386, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9363597>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ZUNINO, C. *et al.* Factory communications at the dawn of the fourth industrial revolution. **Computer Standards & Interfaces**, v. 71, p. 103433, 2020. ISSN 0920-5489. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548919300868>. Acesso em: 19 abr. 2025.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional, amor e incentivo ao longo de minha vida.

Ao Prof. Dr. João Henrique Kleinschmidt, meu orientador, pela paciência e sabedoria que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e amigos da UFABC, pela excelência na troca de conhecimentos, que tanto contribuíram para minha formação.

A toda a equipe do SENAI-SP, pelo apoio, incentivo e confiança, que fortaleceram minha trajetória e me motivaram seguir a minha formação acadêmica.

Meu sincero obrigado a todos.

## Sobre os Autores:

---

### <sup>i</sup> Elias Aoad Neto



Mestre em Engenharia da Informação pela Universidade Federal do ABC (UFABC). Especialista em redes industriais com formação internacional no Canadá. MBA em Gestão de Projetos de Inovação pela Faculdade SENAI de São Caetano do Sul, onde também concluiu o curso superior de Tecnologia em Mecatrônica. Engenheiro de Controle e Automação pela Universidade Paulista (UNIP/Sorocaba). Atua há mais de 20 anos na área de automação industrial, com ampla experiência em projetos, gestão e manutenção em indústrias multinacionais.

<https://orcid.org/0009-0001-4040-2990>

### <sup>ii</sup> João Henrique Kleinschmidt



Possui graduação em Engenharia de Computação pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (2001), mestrado em Informática pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (2004) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2008). Atualmente é professor associado da Universidade Federal do ABC, onde atua desde 2010 nos cursos de graduação de Ciência e Tecnologia, Engenharia de Informação e Ciência da Computação. É pesquisador do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Informação. As áreas de interesse são Internet das Coisas, redes sem fio, segurança de redes e blockchain.

<https://orcid.org/0000-0001-6706-455X>