

ARTHUR CARVALHO ROTKIS

**MONITORAMENTO INTELIGENTE DE MÁQUINAS CNC COM
CONECTIVIDADE 5G E ECOSISTEMAS IOT**

Relatório Final submetido ao Centro Universitário FEI como etapa de pesquisa de Iniciação Científica do departamento de Ciência da Computação. Orientador: Prof. Dr. Rafael Gomes Alves

São Bernardo do Campo

2026

RESUMO

A Indústria 4.0 demanda a integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), as redes 5G e os sistemas ciberfísicos para viabilizar o monitoramento em tempo real de processos industriais. Este projeto de Iniciação Científica propôs conectar uma fresadora CNC legada a duas plataformas de IoT, a plataforma aberta FIWARE e a plataforma comercial Siemens Insights Hub, e comparar o desempenho das plataformas e de dois enlaces de acesso à nuvem: a conectividade 5G e a rede cabeada tradicional. A aquisição de grandezas elétricas da máquina foi realizada de forma não invasiva, com o sensor PowerTag e o concentrador Acti 9 Smartlink, cujos dados são lidos via Modbus TCP/IP pelo *gateway* de borda SIMATIC IoT 2040, responsável pelo envio ao Insights Hub por meio de fluxos Node-RED. A integração com a FIWARE não foi realizada, pois dependia de um sensor de temperatura com comunicação 5G cuja obtenção estava vinculada a uma parceria privada que não se concretizou dentro do prazo do projeto. Foram conduzidos testes de latência ponta-a-ponta em nível de aplicação, com 1000 amostras em cada condição, comparando a rede cabeada da FEI e o CPE 5G Intelbras GX 3000 como enlace de acesso à nuvem. A integração com o Insights Hub mostrou-se tecnicamente viável, mas o uso do 5G não reduziu a latência: a mediana foi de 11,4 s com o CPE 5G, contra 8,5 s na rede cabeada (cerca de 34% maior; teste de Mann-Whitney, $p < 0,001$), ainda que com menor dispersão. Como os valores, na ordem de segundos, são dominados pela camada de aplicação e pela plataforma em nuvem, os resultados não isolam o desempenho do enlace 5G propriamente dito. Ficam como continuidade a comparação com a FIWARE, a decomposição da latência por etapa do fluxo e a avaliação de taxa de transmissão e perda de pacotes.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Internet Industrial das Coisas; Redes 5G; *Retrofit*; Controle Numérico Computadorizado; Latência

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0, representa uma mudança de paradigma na maneira como os processos produtivos são concebidos, operados e monitorados (Schuh *et al.*, 2017; Lu, 2017). Esse novo modelo industrial é impulsionado pela convergência de tecnologias digitais emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial (IA), Big Data e sistema ciber-físico (CPS) (Vaidya; Ambad; Bhosle, 2018; Lu, 2017). O objetivo central dessa transformação é a criação de ambientes de produção altamente conectados, adaptáveis e inteligentes — as chamadas fábricas inteligentes (*smart factories*) (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013; Roblek; Meško; Krapež, 2016).

Nesse contexto, os CPS desempenham um papel fundamental, pois permitem a integração entre sistemas físicos e digitais (Vaidya; Ambad; Bhosle, 2018; Lu, 2017). Tais sistemas são capazes de monitorar os processos físicos de produção, gerar representações virtuais desses processos e tomar decisões de forma descentralizada com base em dados em tempo real (Minerva; Lee; Crespi, 2020; Fuller *et al.*, 2020). Para que essas capacidades sejam plenamente exploradas, é essencial que haja coleta contínua de dados diretamente do chão de fábrica, a partir de máquinas como os centros de usinagem com Controle Numérico Computadorizado (CNC) (Schuh *et al.*, 2017; Vicentin, 2021).

Um dos maiores desafios enfrentados pela implementação da Indústria 4.0 em ambientes industriais reais é a conectividade (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013; Xu *et al.*, 2018). As redes cabeadas tradicionais limitam a flexibilidade e dificultam a reconfiguração dos layouts de produção (Godor *et al.*, 2020). Por outro lado, soluções sem fio como o Wi-Fi podem apresentar problemas de interferência, latência elevada e baixa confiabilidade, especialmente em ambientes industriais adversos (Li; Xu; Zhao, 2018; Qiu *et al.*, 2020). A conectividade 5G surge como uma alternativa promissora, ao oferecer Comunicação de Latência Ultrabaixa e Alta Confiabilidade (URLLC), suporte à conexão simultânea de um número massivo de dispositivos e a possibilidade de segmentação lógica da rede, garantindo níveis de Qualidade de Serviço (QoS) adequados às diferentes demandas industriais (International Telecommunication Union, s.d.; Chettri; Bera, 2020; Porambage *et al.*, 2018).

Diante desse cenário, este projeto de pesquisa tem como objetivo desenvolver e avaliar um protótipo funcional que integre uma máquina CNC a duas plataformas de IoT: a plataforma de código aberto FIWARE (FIWARE, 2022) e a plataforma comercial Siemens Insights Hub (Siemens, 2018). A comunicação entre a máquina e as plataformas será realizada tanto de

forma cabeada via Ethernet quanto por meio de uma conexão 5G, utilizando um dispositivo de borda (*edge computing*) (Mao *et al.*, 2017; Qiu *et al.*, 2020) baseado no SIMATIC IoT 2040 (SIEMENS, 2026). Essa unidade será responsável por coletar os dados operacionais da máquina CNC, enquanto um equipamento 5G do tipo Customer-Premises Equipment (CPE) (Intelbrás, s.d.) estabelecerá a ponte entre a rede local do laboratório de manufatura integrada e a infraestrutura de rede móvel 5G.

A proposta busca explorar, na prática, os benefícios oferecidos pela conectividade 5G para aplicações industriais (Xu *et al.*, 2018; Porambage *et al.*, 2018), com ênfase na interoperabilidade entre diferentes plataformas de IoT (Chettri; Bera, 2020; Fuller *et al.*, 2020), na confiabilidade da transmissão de dados e na viabilidade de adoção de soluções de baixo custo para a modernização de máquinas industriais legadas (Vicentin, 2021). A pesquisa contribuirá com evidências empíricas sobre o desempenho da rede 5G em ambientes industriais, bem como com recomendações técnicas para projetos futuros de integração entre chão de fábrica e plataformas digitais.

2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

A transformação digital da indústria, impulsionada pelos avanços em conectividade e sistemas inteligentes, exige abordagens práticas e experimentais que validem, em condições reais, o desempenho das tecnologias emergentes (Xu *et al.*, 2018; Porambage *et al.*, 2018). No contexto da Indústria 4.0, a combinação entre conectividade 5G e plataformas IoT é apontada como habilitadora do monitoramento de ambientes produtivos com máquinas legadas (Chettri; Bera, 2020; Qiu *et al.*, 2020). Contudo, a literatura sobre o tema concentra-se em revisões e propostas arquiteturais, com poucos relatos de medições em redes 5G comerciais aplicadas ao *retrofit* de máquinas existentes. Este projeto buscou contribuir para essa lacuna com uma abordagem modular e replicável de integração entre o chão de fábrica e sistemas de informação. A seguir, são apresentados os fundamentos que justificaram a proposta e os objetivos que nortearam sua execução.

2.1 JUSTIFICATIVA

A motivação para o desenvolvimento deste projeto baseia-se nos seguintes eixos:

- a) Científico e Tecnológico: produzir dados empíricos sobre o desempenho de uma conexão 5G comercial em uma aplicação de Internet das Coisas Industrial (IIoT), avaliando em que medida as características anunciadas da tecnologia, em especial a baixa latência, se refletem em um cenário real de telemetria industrial. Além disso, o projeto previa uma análise comparativa entre duas plataformas IoT de naturezas distintas, uma aberta (FIWARE) e uma comercial (Siemens Insights Hub), identificando suas limitações e pontos fortes em cenários industriais.
- b) Econômico: avaliar a viabilidade técnica de uma solução de *retrofit* não invasivo para a modernização de máquinas CNC já existentes em pequenas e médias indústrias (PMEs), possibilitando a adoção dos princípios da Indústria 4.0 sem a necessidade de substituição do parque fabril. Soluções desse tipo são apontadas como caminho para ganhos operacionais potenciais, como a redução do tempo de inatividade, a manutenção preditiva e o aumento da produtividade (Vicentin, 2021).

2.2 OBJETIVOS

Este projeto de pesquisa apresenta os seguintes objetivos gerais e específicos.

2.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar um protótipo funcional de sistema de monitoramento em tempo real para uma máquina CNC legada, integrando-o às plataformas FIWARE e Siemens Insights Hub por meio de conectividade 5G, tendo a rede cabeada como referência, com foco na análise de desempenho da comunicação e nos desafios de interoperabilidade entre sistemas.

2.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, o projeto propõe os seguintes objetivos específicos:

- a) Investigar as arquiteturas das plataformas FIWARE e Siemens Insights Hub, as categorias de serviço e os requisitos do 5G para IIoT (*enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine-Type Communications* (mMTC) e URLLC) e os mecanismos de aquisição de dados em máquinas CNC;
- b) Configurar o ambiente experimental, incluindo a integração física e lógica entre a instrumentação da máquina CNC, o dispositivo de borda e o equipamento CPE 5G;
- c) Implementar a comunicação com a plataforma FIWARE, utilizando o modelo de dados NGSI-v2 e protocolos como *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) ou *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP);
- d) Implementar a comunicação com a plataforma Siemens Insights Hub, utilizando o protocolo MQTT, Interfaces de Programação de Aplicação (APIs) e ferramentas nativas da plataforma;
- e) Executar testes de desempenho da comunicação, via rede cabeada e via 5G, para mensurar a latência ponta-a-ponta, a taxa de transmissão, a perda de pacotes e a confiabilidade, esta expressa como taxa de entrega de mensagens;
- f) Analisar criticamente os resultados obtidos, documentar os desafios enfrentados durante a integração e propor boas práticas para projetos futuros de IIoT baseados em 5G.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os principais conceitos, tecnologias e abordagens relacionados ao escopo do projeto de pesquisa, com o objetivo de fundamentar teoricamente a proposta de integração entre uma máquina CNC e plataformas de IoT utilizando conectividade 5G. A seção está estruturada de forma a contextualizar as redes 5G como habilitadoras da IIoT, discutir os fundamentos e os pilares da Indústria 4.0, apresentar os princípios da IoT e, por fim, descrever as plataformas FIWARE e Siemens Insights Hub, destacando suas funcionalidades e possibilidades de aplicação em cenários industriais.

O referencial teórico, assim, serve de base para compreender os desafios e oportunidades envolvidos na implementação de sistemas de monitoramento industrial baseados em conectividade sem fio, interoperabilidade de dados e plataformas digitais.

3.1 REDES DE COMUNICAÇÃO 5G

As redes de comunicação 5G representam a quinta geração de redes móveis, caracterizando-se por avanços significativos em relação às gerações anteriores em termos de velocidade, latência, densidade de conexões e confiabilidade. Desenvolvida com o objetivo de atender às demandas crescentes de conectividade em ambientes altamente digitalizados, o 5G se estabelece como um dos principais pilares para viabilizar aplicações críticas da IoT, da Indústria 4.0 e de CPS (Chettri; Bera, 2020; Xu *et al.*, 2018).

A União Internacional de Telecomunicações (ITU), por meio de seu relatório IMT-2020, define três categorias principais de aplicação para o 5G: I - *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), que prioriza altas taxas de transferência de dados; II - *Massive Machine-Type Communications* (mMTC), voltada para a comunicação massiva entre dispositivos IoT; e III - Comunicação de Latência Ultrabaixa e Alta Confiabilidade (URLLC), voltada para aplicações que exigem latência ultrabaixa e alta confiabilidade, como automação industrial e veículos autônomos (International Telecommunication Union, s.d.).

Dentre as características técnicas mais relevantes do 5G destacam-se:

- a) Altas taxas de transmissão: com velocidades de até 10 Gbps, o 5G possibilita a transmissão de grandes volumes de dados em tempo real, permitindo aplicações intensivas em vídeo, realidade aumentada e gêmeos digitais (Chettri; Bera, 2020; International Telecommunication Union, s.d.; Porambage *et al.*, 2018).

- b) Latência ultrabaixa: a latência pode ser reduzida para valores inferiores a 1 milissegundo, viabilizando aplicações com controle em tempo real, como operação remota de máquinas industriais e cirurgias assistidas por robôs (Chettri; Bera, 2020; International Telecommunication Union, s.d.; Porambage *et al.*, 2018).
- c) Alta densidade de conexões: suporta até 1 milhão de dispositivos conectados por km², característica essencial para ambientes industriais densamente instrumentados com sensores e atuadores (International Telecommunication Union, s.d.; Chettri; Bera, 2020).
- d) Fatiamento de rede (*network slicing*): permite a criação de redes virtuais independentes e customizadas, otimizadas para diferentes tipos de aplicação dentro de uma mesma infraestrutura física (Porambage *et al.*, 2018; International Telecommunication Union, s.d.).

Tais características tornam o 5G especialmente adequado para cenários industriais inteligentes, nos quais há a necessidade de integração entre dispositivos heterogêneos, interoperabilidade entre sistemas legados e novos, e processamento de dados próximo da borda (Xu *et al.*, 2018; Porambage *et al.*, 2018). Em aplicações com máquinas CNC, por exemplo, a conectividade 5G permite o envio contínuo de dados operacionais para plataformas de análise em nuvem, como FIWARE e Siemens Insights Hub, possibilitando monitoramento em tempo real, manutenção preditiva e otimização de processos produtivos.

Além disso, o 5G favorece a adoção de arquiteturas distribuídas baseadas em computação na borda, nas quais parte do processamento é realizado localmente, próximo às fontes de dados. Essa abordagem reduz a latência, alivia o tráfego na nuvem e aumenta a resiliência do sistema (Xu *et al.*, 2018; Mao *et al.*, 2017; Porambage *et al.*, 2018). A combinação entre 5G e computação na borda é considerada uma das tendências mais promissoras para a próxima geração de sistemas industriais conectados.

Apesar de seus benefícios, a implantação do 5G ainda enfrenta desafios, como a necessidade de investimentos em infraestrutura, a definição de modelos de negócios sustentáveis e a garantia da segurança e privacidade dos dados trafegados. Questões relacionadas à confiabilidade da conectividade em ambientes industriais extremos e à coexistência com tecnologias de comunicação legadas também são objetos de intensa pesquisa (Chettri; Bera, 2020; Xu *et al.*, 2018; Porambage *et al.*, 2018).

Desta forma, as redes 5G constituem um elemento fundamental para a expansão da IoT e para a consolidação de fábricas inteligentes e autônomas, promovendo um ecossistema de

conectividade confiável, escalável e de alto desempenho. No contexto deste projeto, o uso de 5G para coleta e transmissão de dados de uma máquina CNC visa explorar tais benefícios, avaliando o impacto da conectividade de nova geração sobre a latência, robustez e capacidade de integração de plataformas IoT industriais.

3.2 INDÚSTRIA 4.0

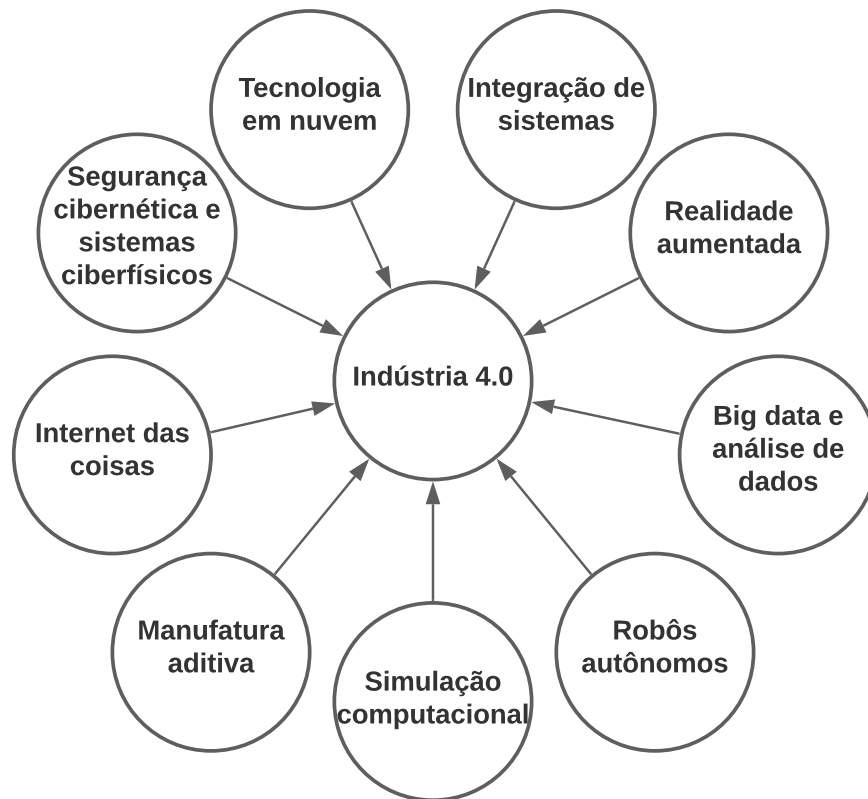
O conceito de Indústria 4.0 foi introduzido em 2011 pelo *Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance* para descrever a ampla integração de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) na produção industrial (Schuh *et al.*, 2017). Desde então, esse paradigma tem impulsionado transformações profundas no setor produtivo, servindo de base para o desenvolvimento e a adoção de tecnologias como a IoT e as redes móveis de quinta geração, conhecidas como redes 5G, que viabilizam conectividade massiva e comunicação em tempo real entre dispositivos e sistemas.

Segundo Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), a implementação bem-sucedida da Indústria 4.0 exige atenção a oito eixos estratégicos, sendo eles: I - padronização e arquitetura de referência; II - gestão de sistemas complexos; III - infraestrutura de banda larga; IV - segurança e proteção de dados; V - organização do trabalho; VI - capacitação profissional contínua; VII - regulamentação; e VIII- eficiência no uso de recursos. Esses elementos constituem as condições essenciais para que tecnologias emergentes como IoT e 5G sejam integradas de forma eficaz e segura nas operações industriais.

Tais eixos podem ser organizados em três dimensões principais: I - infraestrutura e regulação, que asseguram um ambiente propício à adoção de tecnologias habilitadoras; II - interoperabilidade e segurança, essenciais para a comunicação confiável entre sistemas heterogêneos; e III - capacitação humana, necessária para que trabalhadores e consumidores se adaptem às transformações trazidas pela digitalização e pela hiperconectividade industrial.

Além disso, Vaidya, Ambad e Bhosle (2018) identificam nove pilares tecnológicos da Indústria 4.0: I - big data e análise de dados; II - robôs autônomos; III- simulação; IV - integração de sistemas; V - Internet das Coisas (IoT); VI - segurança cibernética e sistema ciber-físico (CPS); VII - computação em nuvem; VIII - manufatura aditiva; e IX - realidade aumentada. A figura 1 apresenta esses pilares, entre os quais a IIoT e a conectividade de alta velocidade (que pode ser viabilizada com 5G) ocupam papel central para o avanço das fábricas inteligentes e altamente automatizadas.

Figura 1 – Pilares da Indústria 4.0



Fonte: O Autor

A incorporação dessas tecnologias molda o escopo atual da pesquisa em Indústria 4.0. Conforme apresentado por Lu (2017), a literatura especializada explora os fundamentos conceituais, os desafios técnicos e as oportunidades de aplicação em diversos setores produtivos. Em todos os casos, a integração entre os sistemas digitais, físicos e humanos demanda arquiteturas robustas e adaptáveis, baseadas em conectividade confiável, interoperabilidade entre plataformas e capacidade de análise em tempo real — características amplamente suportadas por IoT e 5G.

Roblek, Meško e Krapež (2016) destacam que, nesse novo cenário, a interação entre humanos e máquinas se torna cada vez mais ágil e contextualizada, impulsionada pela adoção de sistemas interconectados e inteligentes. Esse processo de transformação pode ser compreendido por meio dos seis estágios de maturidade tecnológica da Indústria 4.0 propostos por Schuh *et al.* (2017), conforme ilustrado na figura 2.

Esses estágios são descritos da seguinte forma:

- a) Informatização: digitalização local de processos, com sistemas isolados.
- b) Conectividade: integração dos sistemas internos por meio de redes locais.

Figura 2 – Estágios do índice de maturidade da Indústria 4.0



Fonte: Autor. Adaptado de Schuh *et al.*, 2017

- c) Visibilidade: coleta de dados em tempo real, formando uma “sombra digital” da operação.
- d) Transparência: análise e interpretação dos dados da sombra digital para gerar conhecimento.
- e) Capacidade preditiva: modelagem de cenários futuros baseada em dados históricos e em tempo real.
- f) Adaptabilidade: automação de decisões e respostas dinâmicas com base nas análises anteriores.

A presença de tecnologias como IoT e 5G é crucial a partir do terceiro estágio (visibilidade), pois é nesse ponto que a coleta e transmissão eficiente de dados em tempo real se torna essencial. O 5G, com sua baixa latência e alta densidade de conexões, expande a capacidade de operação dos sistemas IoT industriais, permitindo maior precisão, confiabilidade e flexibilidade na automação dos processos.

Por fim, vale destacar que a Indústria 4.0 ainda está em processo de consolidação, sendo que muitos de seus objetivos, especialmente no que diz respeito à plena interoperabilidade entre sistemas, ainda não foram totalmente alcançados. Além da adoção tecnológica, a transição para esse novo modelo exige mudanças organizacionais, novos modelos de negócios e uma cultura de inovação aberta e colaborativa entre os diversos atores envolvidos (Schuh *et al.*, 2017).

3.3 INTERNET DAS COISAS

A IoT refere-se à interconexão de objetos físicos com a internet por meio de sensores, atuadores, softwares e tecnologias de comunicação, permitindo que dispositivos colem, compartilhem e processem dados em tempo real (Li; Xu; Zhao, 2018). O termo foi popularizado no final da década de 1990 por Kevin Ashton, com o objetivo de descrever um cenário em que objetos do cotidiano estariam conectados à rede global, possibilitando interações automatizadas entre o mundo físico e o digital (Tzounis *et al.*, 2017).

Segundo a norma ISO/IEC 20924:2018, IoT é definida como “uma infraestrutura de entidades, pessoas, sistemas e recursos de informação interconectados juntamente com serviços que processam e reagem a informações do mundo físico e do mundo virtual” (International Organization for Standardization, s.d.). Essa definição evidencia a natureza híbrida da IoT, ao integrar elementos materiais (dispositivos, sensores e máquinas) com serviços digitais (plataformas, inteligência artificial e visualização).

Um sistema IoT típico é composto por quatro elementos principais: dispositivos de coleta (sensores), conectividade (protocolos e redes de comunicação), processamento de dados (em nuvem ou na borda) e plataformas de integração e análise (como a FIWARE ou o Siemens Insights Hub). Essa arquitetura permite aplicações diversas nos setores industrial, agrícola, urbano, hospitalar, etc. promovendo a automação e a eficiência operacional.

A evolução das redes móveis, especialmente com a chegada do 5G, potencializou ainda mais o uso da IoT em ambientes críticos. O 5G oferece latência ultrabaixa, alta confiabilidade e suporte à comunicação massiva entre dispositivos, características essenciais para aplicações industriais avançadas, como controle de máquinas CNC em tempo real, manutenção preditiva e linhas de produção flexíveis.

Apesar do avanço tecnológico, a ampla adoção da IoT ainda enfrenta desafios, incluindo a necessidade de padronização, a interoperabilidade entre plataformas, a segurança da informação e o gerenciamento de grandes volumes de dados heterogêneos (Chettri; Bera, 2020). Neste contexto, o presente trabalho busca explorar o uso de plataformas IoT abertas e proprietárias (FIWARE e Insights Hub) aplicadas ao monitoramento remoto de uma máquina CNC conectada via rede 5G, investigando aspectos como desempenho, escalabilidade e flexibilidade de integração.

3.3.1 Plataforma IoT FIWARE

A FIWARE, uma entidade sem fins lucrativos criada em 2016 por Atos Engineering, Orange Business Services e Telefónica, visa promover uma infraestrutura de dados aberta, colaborativa e interoperável, com base em padrões e tecnologias open source (FIWARE, 2022). A plataforma apoia o desenvolvimento de soluções IoT em diversos setores, incluindo agricultura (López-Riquelme *et al.*, 2017), indústria (Alonso *et al.*, 2018), saúde (Fazio *et al.*, 2015), logística portuária (Fernández *et al.*, 2016), energia (Terroso-Saenz *et al.*, 2019) e cidades inteligentes (Araújo *et al.*, 2017).

Como infraestrutura para sistemas IoT, a plataforma FIWARE inclui módulos denominados Habilitadores Genéricos (HGs), combináveis conforme as exigências de cada aplicação. Cada HG cumpre uma função distinta, proporcionando à plataforma flexibilidade e escalabilidade. Esses módulos se dividem em quatro grupos principais, conforme ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3 – Grupos de componentes FIWARE e suas funcionalidades

Grupo de componentes	Função principal	Principais componentes e aplicações
Gestão de contexto	Gerenciar informações contextuais em tempo real e em larga escala	– Orion Context Broker (OCB): núcleo da gestão de dados contextuais; – STH Comet, Cygnus, Scorpio: armazenamento histórico, persistência e distribuição de contexto.
Interfaces com sistemas IoT, robôs e terceiros	Adaptar protocolos de dispositivos físicos ao modelo de dados FIWARE	– IoT Agents: conectam sensores via <i>JavaScript Object Notation</i> (JSON), Ultralight, LWM2M; – Fast RTPS e Micro XRCE-DDS: comunicação em tempo real com robôs e dispositivos embarcados.
Processamento, análise e visualização de contexto	Criar aplicações inteligentes com análise de dados e visualização de contexto	– Wirecloud: dashboards interativos; – Knowage: análise de dados e BI; – Kurento: processamento multimídia; Cosmos: processamento em Big Data.
Gerenciamento, publicação e monetização de dados e APIs	Garantir segurança, controle de acesso e monetização dos dados	– Keyrock: gerenciamento de identidades; – Wilma: proxy de autorização OAuth2; – Biz Framework: monetização de dados e serviços.

Fonte: Autor “adaptado de” FIWARE, 2022

Vale ressaltar que os HGs não estão explicitamente representados na arquitetura, podendo ser inseridos ou removidos conforme os requisitos da aplicação. O planejamento original desta pesquisa previa usar a FIWARE como uma das plataformas de destino para os dados operacionais extraídos de uma máquina CNC, com coleta via SIMATIC IoT 2040 e envio por MQTT a um IoT Agent responsável por adaptar o formato da mensagem ao modelo de dados da plataforma, com gestão de contexto pelo componente OCB. Essa integração não chegou a ser implementada, pelos motivos detalhados na Seção 6.1; a arquitetura permanece descrita aqui como referência para trabalhos futuros.

3.3.2 Plataforma IoT Insights Hub

A plataforma *Siemens Insights Hub* é uma solução de IIoT da Siemens, baseada em nuvem, projetada para viabilizar a coleta, integração, análise e visualização de dados provenientes de ativos e processos industriais. Desenvolvida como uma evolução do antigo *MindSphere*, a plataforma está inserida no contexto da Indústria 4.0, sendo utilizada para transformar dados operacionais em *insights* acionáveis que apoiam a tomada de decisão em tempo real.

Com suporte à conectividade por diversos protocolos, o *Insights Hub* permite a integração de dispositivos por meio de *gateways* físicos e lógicos, como os da família *MindConnect*, além de oferecer APIs para ingestão de dados. Em projetos que envolvam máquinas CNC, como o proposto nesta pesquisa, a plataforma pode ser empregada para centralizar e analisar dados de operação obtidos por dispositivos de borda, como o *SIMATIC IoT 2040*, conectada à máquina por meio de redes industriais e conectividade 5G.

Entre os principais recursos disponíveis, destacam-se:

- a) Suporte à coleta e ingestão de dados em tempo real;
- b) Armazenamento seguro em nuvem com escalabilidade modular;
- c) Análise contínua por meio de ferramentas de visualização e *dashboards* personalizáveis;
- d) Suporte ao desenvolvimento de aplicativos com recursos *low-code*;
- e) Possibilidade de detecção automática de falhas e geração de alertas para manutenção preditiva.

Para este projeto de Iniciação Científica, o *Insights Hub* foi empregado como plataforma de destino para os dados capturados da máquina CNC, com envio estruturado por meio de um

fluxo desenvolvido em *Node-RED* no *SIMATIC IoT 2040*, utilizando o protocolo MQTT. A análise dos dados ocorre por meio de *dashboards* desenvolvidos na própria plataforma (Seção 6.2). A comparação originalmente planejada com a *FIWARE* não foi realizada (Seção 6.1).

3.3.3 DISPOSITIVOS IOT

A implementação de um ambiente industrial conectado, alinhado aos princípios da Indústria 4.0, exige a utilização de dispositivos de borda capazes de atuar como intermediários entre o chão de fábrica e a nuvem. Neste projeto, foram empregados diferentes dispositivos para garantir a conectividade, aquisição e processamento de dados, cada um com um papel específico na arquitetura de retrofit proposta.

3.3.3.1 SIMATIC IoT 2040

O *gateway* industrial SIMATIC IOT2040, desenvolvido pela Siemens e apresentado na Figura 4, consiste em uma plataforma de hardware compacta e robusta, projetada para operar em regime contínuo sob condições severas de ambiente fabril (SIEMENS, 2026). No escopo deste projeto, o dispositivo atua como o núcleo de processamento e conectividade para o sistema de *retrofit* fundamentado em diretrizes de trabalhos anteriores (Vicentin, 2021).

Figura 4 – *Gateway* de comunicação industrial SIMATIC IOT2040



Fonte: SIEMENS, 2026

Sua arquitetura técnica é baseada no processador Intel Quark X1020 (frequência de 400 MHz), o qual provê o equilíbrio necessário entre consumo energético e capacidade de processamento para execução de *software* de borda. Essa flexibilidade permite a implementação do fluxo de dados via Node-RED, facilitando a integração de protocolos heterogêneos.

Neste trabalho, o IOT2040 desempenha um papel central na camada de integração, executando a lógica de aquisição de dados provenientes dos sensores de energia. A comunicação externa é estabelecida de forma segura com as plataformas em nuvem MindSphere (Siemens, 2018) e FIWARE (FIWARE, 2022), utilizando para isso a biblioteca especializada *mindconnect-nodejs* (Vicentin, 2021). Quanto à conectividade física, o dispositivo dispõe de interfaces redundantes, incluindo duas portas Ethernet independentes, portas USB e uma interface serial configurável (RS232/422/485). Tais recursos permitem a interface direta com o concentrador de medição Acti 9 Smartlink, garantindo a interoperabilidade entre os dispositivos de campo e a rede corporativa, consolidando assim a convergência entre Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia de Operação (TO).

3.3.3.2 Acti 9 Smartlink SI D e PowerTag

Para a prospecção dos dados de consumo energético da máquina CNC legada, utilizou-se o ecossistema de monitoramento da Schneider Electric, composto pelo concentrador Acti 9 Smartlink SI D (Figura 5) e pelos sensores de energia sem fio PowerTag (Figura 6) (Schneider Electric, 2026b,a). Este conjunto constitui a camada de sensoriamento e instrumentação do sistema de *retrofit*, permitindo a coleta de grandezas elétricas fundamentais, como tensão (V), corrente (A), potência ativa (W) e energia (kWh), sem a necessidade de intervenções estruturais no painel de controle original do equipamento (Vicentin, 2021).

O PowerTag consiste em um sensor de dimensões reduzidas, instalado diretamente nos terminais do disjuntor de proteção do CNC. Ele utiliza tecnologia de comunicação via rádio frequência (RF) para transmitir medições em tempo real ao concentrador. O Acti 9 Smartlink, por sua vez, atua como um *gateway* de campo, capaz de consolidar dados de até 20 dispositivos PowerTag, agregando as variáveis e disponibilizando-as na rede local através do protocolo Modbus TCP/IP (Vicentin, 2021). Esta arquitetura de sensoriamento não invasiva é um pilar central da metodologia de *retrofit* adotada, pois viabiliza a digitalização do ativo industrial e a integração com sistemas de gestão de energia sem comprometer a integridade ou a certificação dos sistemas de automação preexistentes (Vicentin, 2021).

Figura 5 – Sistema de monitoramento Acti 9 Smartlink e sensor PowerTag



Fonte: Schneider Electric, 2026b

Figura 6 – Power Tag



Fonte: Schneider Electric, 2026a

3.3.3.3 Roteador Industrial 5G Intelbras GX 3000

A conectividade com as camadas superiores de nuvem, fundamental para a telemetria em tempo real e o acesso remoto aos ativos, é viabilizada pela integração de um roteador 5G de alta performance. O modelo selecionado, Intelbras GX 3000 (Figura 7), provê uma infraestrutura de comunicação caracterizada pela alta taxa de transferência e baixa latência, atuando como o *gateway* principal para o tráfego de dados gerados no *retrofit* (Intelbrás, s.d.).

Figura 7 – Roteador 5G Intelbras GX 3000 com tecnologia Wi-Fi 6



Fonte: Intelbrás, s.d.

Equipado com o *chipset* Qualcomm Snapdragon X62 e suporte às arquiteturas 5G SA (*Standalone*) e NSA (*Non-Standalone*), o dispositivo atinge taxas nominais de *download* de até 2,47 Gbps e *upload* de 900 Mbps. Além da interface celular, o equipamento oferece conectividade local via Ethernet e Wi-Fi 6 (Padrão IEEE 802.11ax); neste projeto, o enlace com o switch que atende o SIMATIC IOT2040 foi feito por cabo. No contexto de modernização industrial, a adoção da tecnologia 5G elimina a dependência de infraestruturas de cabeamento estruturado extensas e onerosas, conferindo flexibilidade para o rearranjo físico do maquinário no chão de fábrica e garantindo a escalabilidade da solução em ambientes com infraestrutura de rede preexistente limitada.

3.4 MÁQUINAS CNC LEGADAS

O foco central deste trabalho consiste na modernização de máquinas CNC legadas. Tais equipamentos, apesar de apresentarem elevada robustez mecânica e capacidade produtiva, carecem de recursos nativos de conectividade e sensoriamento exigidos pelos paradigmas da Indústria 4.0 (Vicentin, 2021). Como estudo de caso, será utilizada uma fresadora CNC equipada com um sistema de controle de geração anterior.

O princípio operacional da fresadora fundamenta-se no controle computacional dos movimentos de uma ferramenta rotativa em coordenadas cartesianas (eixos X, Y e Z) para a remoção de material de uma peça bruta. Este controle será gerenciado por uma unidade de comando que interpreta instruções em código G (*G-code*) e converte-as em sinais de acionamento para os motores dos eixos e do fuso (*spindle*), seguindo uma lógica de usinagem predefinida.

Figura 8 – Fresadora CNC legada objeto do sistema de *retrofit*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As melhorias a serem implementadas via *retrofit* concentrar-se-ão na prospecção de dados de consumo energético, garantindo a integridade do ciclo de usinagem e da lógica de controle original. O processo de modernização estruturar-se-á nas seguintes etapas:

- a) Instrumentação Não Invasiva: Preve-se a instalação do sensor PowerTag junto ao disjuntor trifásico de alimentação da fresadora. Esta abordagem viabilizará a medição de parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) em tempo real, sem a necessidade de seccionamento do painel elétrico (Vicentin, 2021).

- b) Agregação e Protocolos de Comunicação: O sensor PowerTag será integrado ao concentrador Acti 9 Smartlink. O dispositivo atuará na camada de borda, agregando os dados via radiofrequência e disponibilizando-os na rede Ethernet industrial sob o protocolo Modbus TCP/IP (Vicentin, 2021).
- c) Processamento e *Edge Gateway*: Utilizar-se-á o *gateway* SIMATIC IOT2040 para a leitura dos dados via Modbus TCP. A plataforma executará o *software* Node-RED, responsável pelo tratamento e formatação dos pacotes de dados através de fluxos de programação visual (Vicentin, 2021).
- d) Integração com Ecossistema de Nuvem: O sistema será configurado para o envio dos dados processados para a plataforma MindSphere. A comunicação será estabelecida via nó `mindconnect-nodejs`, garantindo a segurança da transmissão por meio de chaves criptográficas geradas em ambiente *cloud* (Vicentin, 2021).

Espera-se que, como resultado, a fresadora legada passe a contar com capacidades de monitoramento remoto, permitindo a coleta e o armazenamento histórico de seu perfil energético. A análise futura destes dados possibilitará a identificação de padrões de consumo e o suporte à manutenção preditiva, transpondo o equipamento para o cenário da manufatura avançada sem a necessidade de substituição do ativo físico (Vicentin, 2021).

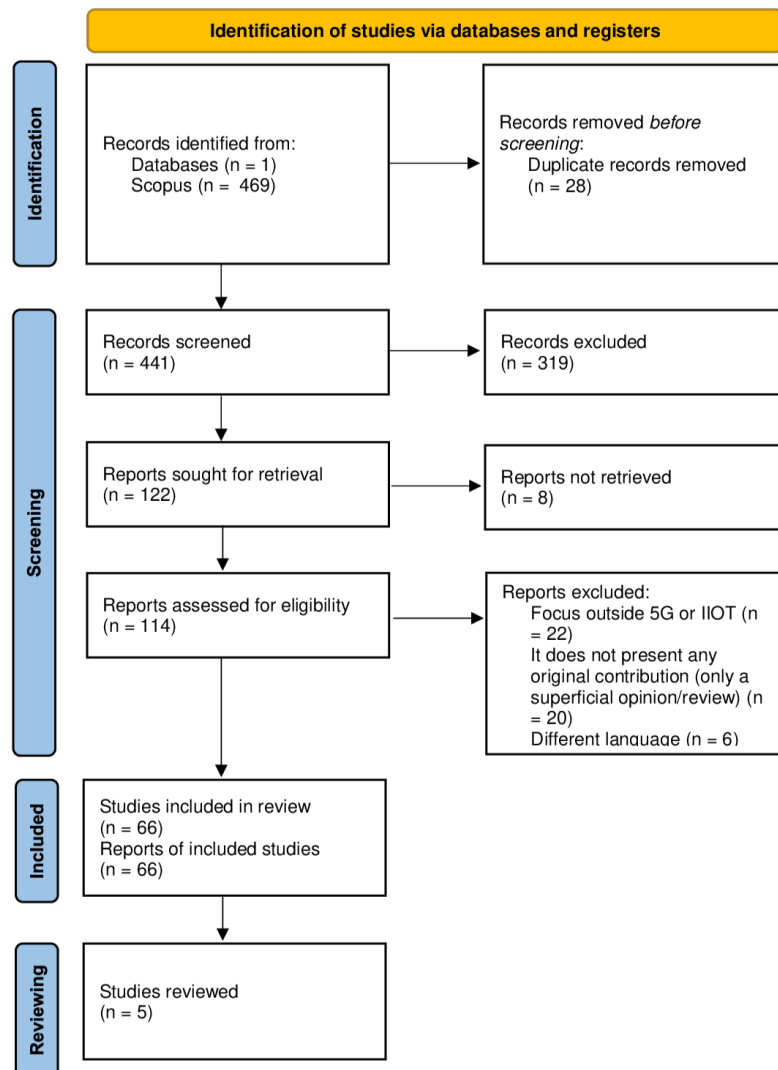
3.5 REVISÃO DA LITERATURA

Para a condução da revisão da literatura, adotar-se-á a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page *et al.*, 2021b,a) simplificada, a qual permite organizar e reportar de forma transparente o processo de identificação e seleção de artigos científicos. A estratégia de busca será aplicada na base de dados *Scopus*, utilizando-se a *string* de busca: "5G*"AND "IoT*".

Como critérios de refinamento, serão aplicados filtros para seleção de documentos do tipo “*review*” e período de publicação compreendido entre 2017 e 2026. A busca inicial resultou em 469 registros. Após a remoção de 28 duplicatas, restaram 441 artigos para a etapa de triagem. Na fase de seleção por título e resumo, utilizar-se-á o *software* VOSviewer para a análise de coocorrência de palavras-chave; tal procedimento permitirá identificar e excluir registros cujos agrupamentos temáticos não apresentem aderência aos objetivos deste trabalho — como publicações com ênfase exclusiva em *blockchain*, por exemplo.

Deste processo, 66 artigos foram recuperados e considerados elegíveis para leitura integral e análise aprofundada. Para a fase inicial da revisão, selecionou-se os 5 artigos que apresentarem contribuições mais alinhadas ao escopo de conectividade 5G e IoT aplicados a ambientes industriais. A Figura 9 detalhará o fluxograma adaptado do método PRISMA, sintetizando as etapas de identificação, triagem e inclusão dos trabalhos.

Figura 9 – Fluxograma do método PRISMA adaptado para a seleção bibliográfica



Fonte: Autor “adaptado de” Page *et al.*, 2021b

Os 66 artigos selecionados comporão o *corpus* bibliográfico a ser avaliado na Seção 3.5.1 de trabalhos relacionados. Este conjunto servirá como base para uma revisão sistemática robusta sobre o emprego de redes 5G em sistemas IoT industriais e processos de *retrofit* de máquinas legadas.

3.5.1 Trabalhos relacionados

O primeiro estudo relevante às análises de integração 5G-IoT, Li, Xu e Zhao (2018), pesquisadores da Universidade de West of England (Reino Unido), Academia Chinesa de Ciências e outras instituições, publicaram em 2018 no *Journal of Network and Computer Applications* uma revisão sistemática sobre a convergência das redes 5G com a Internet das Coisas. Os autores argumentam que as redes 4G não conseguem suprir demandas como latência inferior a 1 ms e conectividade massiva para milhões de dispositivos. Para solucionar essas limitações, o trabalho investiga tecnologias habilitadoras como virtualização de funções de rede (NFV), redes heterogêneas (HetNets) e comunicação device-to-device (D2D), além de discutir desafios de segurança e padronização. Este levantamento fundamenta os requisitos de desempenho que o sistema de monitoramento da CNC deverá atender, especialmente no que tange à confiabilidade e latência da rede 5G.

No contexto da computação em borda, Qiu *et al.* (2020), equipe das Universidades de Tianjin, Dalian, Oklahoma e Flórida (EUA), publicou em 2020 no *IEEE Communications Surveys & Tutorials* um estudo aprofundado sobre arquiteturas de borda para a Internet Industrial das Coisas (IIoT). Os autores identificam que o processamento exclusivamente em nuvem gera latência e gargalos de banda incompatíveis com aplicações de tempo real na Indústria 4.0. Como solução, propõem uma arquitetura de três camadas (Dispositivo, Borda e Nuvem) e revisam técnicas de roteamento inteligente, escalonamento de tarefas e segurança. Este artigo orienta diretamente a definição da camada de processamento local (SIMATIC IoT 2040) neste projeto, permitindo a filtragem e transmissão eficiente dos dados coletados da máquina CNC.

Ainda no âmbito de modelos digitais, Minerva, Lee e Crespi (2020), pesquisadores do Institut Mines-Télécom (França) e Liverpool John Moores University (Reino Unido), publicaram em 2020 no *Proceedings of the IEEE* uma revisão conceitual sobre Gêmeo Digital (Digital Twin) aplicado à IoT. O trabalho aponta que o conceito de DT sofre de interpretações divergentes entre diferentes domínios, dificultando sua adoção padronizada. Mediante revisão multidisciplinar, os autores consolidam propriedades essenciais (representatividade, reflexão bidirecional, entrelaçamento temporal) e propõem um modelo arquitetural genérico. Embora não seja focado em 5G, esta análise inspira a criação de um “gêmeo digital” simplificado dos parâmetros operacionais da CNC (status, rotação do fuso, temperatura), permitindo visualização e análise temporal dos dados coletados pelas plataformas IoT.

Avançando para questões de sincronização temporal, Godor *et al.* (2020), equipe multidisciplinar da Ericsson, ABB, Orange e outras instituições, publicou em 2020 no *IEEE Communications Standards Magazine* uma análise técnica das especificações 5G Release 16 para sincronização de alta precisão. Os autores destacam que a manufatura inteligente exige sincronização end-to-end na ordem de $1\ \mu\text{s}$ entre dispositivos TSN fixos e terminais móveis 5G. O estudo detalha o protocolo gPTP e as soluções 3GPP que modelam o domínio 5G como uma “ponte” transparente ao TSN, incluindo mecanismos de *timestamping* e correção de residuais. Este trabalho é fundamental para avaliar se a rede 5G comercial disponível neste projeto consegue atingir a precisão de sincronização necessária para monitorar eventos de alta velocidade na CNC, como variações no código G ou no fuso.

Por fim, Fuller *et al.* (2020), pesquisadores da Universidade de Keele e Astec IT Solutions (Reino Unido), publicaram no *IEEE Access* uma revisão crítica sobre Gêmeo Digital na Indústria 4.0. Os autores apontam que persistem confusões conceituais que equiparam DT a meros modelos digitais unidirecionais. Para superar isso, analisam 26 publicações, sintetizam tecnologias habilitadoras (IoT, IA, Big Data) e identificam desafios como interoperabilidade, segurança e padronização. Este levantamento contribui para a metodologia do presente trabalho ao orientar a definição de boas práticas de integração entre as plataformas IoT (FIWARE e Siemens Insights Hub) e o modelo digital da CNC, evitando armadilhas comuns de projeto, como a falta de bidirecionalidade ou a baixa atualização dos dados.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada é de natureza aplicada, com abordagem experimental e exploratória, visando o desenvolvimento de um protótipo funcional e a obtenção de dados empíricos para avaliação de desempenho. As etapas metodológicas foram estruturadas de modo a refletir as fases previstas no cronograma do projeto, com atenção à coerência entre objetivos, recursos e prazos.

A primeira etapa consistiu em uma revisão sistemática da literatura sobre redes 5G, plataformas IoT e integração com máquinas CNC, conduzida segundo o método Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Seção 3.5), com o objetivo de identificar lacunas existentes e embasar o delineamento experimental. Em seguida, realizou-se o planejamento técnico do ambiente, incluindo a definição das grandezas da máquina CNC a serem monitoradas. Optou-se por grandezas elétricas, como corrente, tensão, potência ativa, fator de potência e energia, obtidas por instrumentação não invasiva, de modo a preservar a integridade do comando numérico e da lógica de controle originais do equipamento.

Na etapa seguinte, foram configurados os elementos de hardware (sensor PowerTag, concentrador Acti 9 Smartlink, SIMATIC IoT 2040 e CPE 5G), estabelecendo a comunicação local e remota entre os dispositivos. Com a infraestrutura pronta, foram desenvolvidos fluxos Node-RED no SIMATIC IoT 2040 capazes de capturar, estruturar e transmitir os dados para a plataforma Siemens Insights Hub (Seção 5.3).

Após a implementação do sistema, foram conduzidos experimentos para medir a latência ponta-a-ponta em nível de aplicação. O delineamento adotou como variável independente o enlace de acesso à nuvem, em duas condições: a rede cabeada do Centro Universitário FEI, tomada como linha de base, e o CPE 5G Intelbras GX 3000. A variável dependente foi a latência de aplicação, definida como o intervalo entre o envio de uma mensagem pelo fluxo Node-RED e o registro, no mesmo fluxo, da mensagem de confirmação de recebimento retornada pela plataforma. Trata-se, portanto, de um tempo de ida e volta, que incorpora o processamento das duas mensagens no dispositivo de borda e na nuvem, além do trânsito pela rede. Foram mantidos constantes o dispositivo de borda, o fluxo de software, o conteúdo das mensagens, o intervalo entre envios e a plataforma de destino. A coleta foi automatizada, com registro de cada amostra em arquivo CSV (Seção 5.4). As medições de taxa de transmissão e de perda de pacotes sob carga variável, previstas nos objetivos específicos (Seção 2.2.2), não foram executadas dentro do prazo do projeto.

Por fim, os dados obtidos foram analisados quantitativamente por meio de estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo) e do teste não paramétrico de Mann-Whitney, adequado à comparação de duas amostras independentes sem pressuposição de normalidade. A análise foi realizada com a linguagem de programação Python e a biblioteca SciPy. A comparação entre FIWARE e Siemens Insights Hub, originalmente prevista nesta etapa, não pôde ser realizada pelos motivos descritos na Seção 6.1; a análise apresentada nos Capítulos 6 e 7 cobre a integração com o Insights Hub e a comparação de latência entre a rede do Centro Universitário FEI e o CPE 5G.

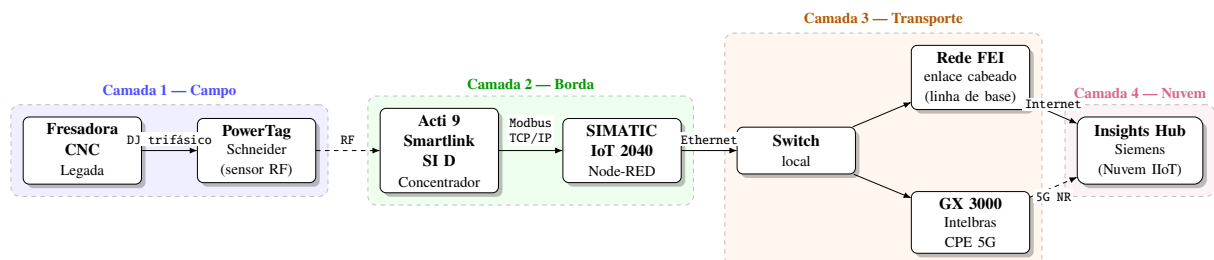
5 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve o sistema efetivamente implementado: a arquitetura de *retrofit* e seus dispositivos, a modelagem dos dados na plataforma de destino, o software de integração e o procedimento de coleta de dados de latência.

5.1 ARQUITETURA DO SISTEMA IMPLEMENTADO

A solução adota uma abordagem de *retrofit* não invasivo estruturada em quatro camadas hierárquicas, conforme ilustrado na Figura 10: a camada 1, de campo, composta pela fresadora e pelo medidor de grandezas elétricas; a camada 2, de borda, composta pelo concentrador Acti 9 Smartlink e pelo *gateway* SIMATIC IoT 2040; a camada 3, de transporte, composta pelo switch local e pelo enlace de acesso à nuvem, comutável entre a rede cabeada da FEI e o CPE 5G; e a camada 4, de nuvem, composta pela plataforma Siemens Insights Hub. Cada camada é responsável por uma etapa distinta do ciclo de dados: aquisição, processamento, transmissão e análise, respectivamente.

Figura 10 – Diagrama do fluxo de dados do sistema implementado: da máquina CNC à plataforma em nuvem



Fonte: Autor

A Tabela 1 sintetiza as características de cada camada da infraestrutura implementada.

5.1.1 Camada de Campo: Sensoriamento Não Invasivo

A aquisição de dados elétricos da fresadora CNC é realizada pelo sensor PowerTag (Schneider Electric), instalado diretamente nos terminais do disjuntor trifásico de alimentação da máquina. Esse posicionamento caracteriza a aquisição como não invasiva: o sensor é fixado externamente ao circuito existente, sem necessidade de abertura do painel elétrico,

Tabela 1 – Síntese das camadas da infraestrutura de *retrofit*

Camada	Dispositivo	Protocolo	Função
Campo	PowerTag + disjuntor trifásico	RF	Medição elétrica não invasiva (I , V , P , E , FP)
Borda — concentrador	Acti 9 Smartlink SI D	Modbus TCP/IP	Agregação de sensores; exposição dos dados na rede local
Borda — gateway	SIMATIC IoT 2040 + Node-RED	Modbus TCP/IP / MQTT	Leitura, normalização e envio dos dados para a nuvem
Transporte	Switch local + rede cabeada FEI ou Intelbras GX 3000	Ethernet / 5G NR	Enlace de acesso à nuvem, comutável entre as duas condições de teste
Nuvem	Siemens Insights Hub	MQTT / API REST	Armazenamento histórico e visualização em <i>dashboards</i>

Fonte: Autor

seccionamento de condutores ou modificações na lógica de proteção original do equipamento (Vicentin, 2021; Schneider Electric, 2026b).

Eletricamente, o PowerTag incorpora transformadores de corrente miniaturizados em seu invólucro, cujos núcleos envolvem os condutores de fase no ponto de conexão ao disjuntor. A tensão da rede é amostrada diretamente nos bornes do mesmo componente de proteção. A partir dessas grandezas primárias, o sensor calcula internamente, a cada segundo, as seguintes variáveis (Schneider Electric, 2026b):

- corrente RMS por fase (I_1 , I_2 , I_3), em ampères (A);
- tensão fase-fase (V_{12} , V_{23} , V_{13}), em volts (V);
- potência ativa total (P), em watts (W);
- energia ativa acumulada (E), em quilowatt-hora (kWh);
- fator de potência (FP).

Os dados são transmitidos sem fio, por radiofrequência, ao concentrador Acti 9 Smartlink posicionado no mesmo quadro elétrico. Essa topologia elimina qualquer cabeamento adicional interno ao painel e mantém intacta a certificação da instalação original (Schneider Electric, 2026b).

5.1.2 Camada de Borda: Concentrador e Gateway Industrial

O Acti 9 Smartlink SI D (Schneider Electric) atua como concentrador dos dados de campo, sendo capaz de gerenciar até 20 sensores PowerTag por meio de 16 canais de radio-frequência. Além de agregar as medições recebidas, o dispositivo disponibiliza as variáveis na rede Ethernet local via protocolo Modbus TCP/IP, no modelo cliente/servidor, organizadas em registradores endereçáveis com tipagem Float32 para as grandezas instantâneas e inteiros de 64 bits para as grandezas de energia. O mapeamento dos registradores utilizados neste trabalho é apresentado na Tabela 2 (Schneider Electric, 2026b; Vicentin, 2021).

O comissionamento do Acti 9 é realizado pelo software *EcoStruxure Power Commission* (Schneider Electric), conectado ao dispositivo por cabo Ethernet. Nessa etapa configuram-se a identificação de cada PowerTag (endereço Modbus, sequência de fase, classe do disjuntor), os parâmetros de rede (IP, máscara, *gateway* padrão) e o filtro de controle de acesso Modbus TCP/IP (Schneider Electric, 2026b).

A leitura dos registradores é executada pelo SIMATIC IoT 2040, que constitui o núcleo de processamento da camada de borda e concentra tanto o tratamento local dos dados quanto a comunicação com a nuvem. Sobre esse dispositivo executa-se o ambiente *Node-RED* versão 0.17.5, plataforma de programação visual baseada em fluxos (Vicentin, 2021), na qual quatro etapas de processamento são orquestradas: leitura Modbus, normalização do vetor de dados, formatação das mensagens e publicação para a plataforma de destino (Seção 5.3).

5.1.3 Camada de Transporte: Enlace de Acesso à Nuvem

O SIMATIC IoT 2040 permanece conectado por cabo Ethernet a um switch local em ambas as condições experimentais. O que se altera entre elas é o enlace de saída (*uplink*) desse switch: na condição de linha de base, o *uplink* é a rede cabeada do Centro Universitário FEI; na condição 5G, é o roteador Intelbras GX 3000 (Seção 3.3.3.3), que estabelece o enlace com a operadora por meio de 5G NR (Intelbrás, s.d.). Dessa forma, o experimento isola o tipo de enlace de acesso à nuvem, mantendo idêntica toda a cadeia a montante.

O GX 3000 suporta os modos 5G SA (*Standalone*) e NSA (*Non-Standalone*), com seleção automática conforme a infraestrutura disponível (Intelbrás, s.d.). Trata-se de um serviço 5G comercial de banda larga móvel (eMBB), e não de uma rede configurada para URLLC.

O protocolo de aplicação adotado para o envio de telemetria é o MQTT, adequado a ambientes com restrições de largura de banda e que exigem baixa sobrecarga de protocolo. A arquitetura de publicação/assinatura do MQTT desacopla o dispositivo de campo da plataforma receptora; a garantia de entrega em caso de indisponibilidade momentânea da rede, contudo, depende do nível de QoS configurado, que neste trabalho foi QoS 1.

5.1.4 Camada de Nuvem: Insights Hub

Os dados chegam ao Siemens Insights Hub, hospedado na região da Europa, onde são organizados no modelo de ativos (*Asset Model*) da plataforma e disponibilizados em *dashboards* configuráveis para visualização (Siemens, 2018). A integração com uma segunda plataforma (FIWARE), prevista no planejamento original, não foi implementada, pelos motivos detalhados na Seção 6.1.

5.2 MODELAGEM DE DADOS

A modelagem de dados estabelece como as grandezas elétricas obtidas da fresadora CNC são representadas na plataforma de destino. As variáveis monitoradas correspondem às lidas pelo fluxo Node-RED implementado no IoT 2040: corrente RMS, tensão, potência ativa, fator de potência, energia total e energia parcial.

5.2.1 Modelo de Ativos para o Siemens Insights Hub

No Siemens Insights Hub, a estruturação dos dados segue o modelo de ativos (*Asset Model*) da plataforma. Para a fresadora CNC, foi criado um *asset* específico contendo as grandezas elétricas aferidas, com nomes, tipos de dados e unidades definidos conforme as variáveis lidas pelo Node-RED. A integração com o Insights Hub foi implementada e validada conforme descrito na Seção 5.3.2.

5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE DE INTEGRAÇÃO

A implementação do software de integração emprega o ambiente *Node-RED* no SI-MATIC IoT 2040 como plataforma de orquestração. A implementação abrangeu a aquisição

via Modbus TCP/IP, a comunicação com o Siemens Insights Hub e, em caráter preliminar, a comunicação com uma plataforma de testes (GRV IoT).

5.3.1 Aquisição via Modbus TCP/IP

A comunicação com o concentrador Acti 9 Smartlink é realizada por meio de um cliente Modbus TCP configurado com os seguintes parâmetros:

- a) Endereço IP: 192.168.200.11
- b) Porta: 502
- c) Unit ID: 150
- d) Taxa de leitura: 1 segundo por variável

Seis nós modbus-read independentes leem, em paralelo, as grandezas de interesse a partir dos registradores *holding* do concentrador. Os valores são lidos como sequências de bytes e convertidos para tipos nativos utilizando funções de troca de endiandade: `swap32()` para grandezas Float32 (corrente, tensão, potência e fator de potência) e `swap64()` seguido de `readUInt32LE()` para as grandezas de energia de 64 bits. A Tabela 2 apresenta o mapeamento completo.

Tabela 2 – Mapeamento de registradores Modbus lidos pelo IoT 2040

Grandeza	Endereço	Qtd. registradores	Conversão de bytes
Corrente RMS	3000	2	<code>swap32()</code>
Tensão fase-fase	3027	2	<code>swap32()</code>
Potência ativa	3059	2	<code>swap32()</code>
Fator de potência	3083	2	<code>swap32()</code>
Energia total	3203	4	<code>swap64() + readUInt32LE()</code>
Energia parcial	3255	4	<code>swap64() + readUInt32LE()</code>

Fonte: Autor, com base em Schneider Electric, 2026b

5.3.2 Envio para o Siemens Insights Hub

Após a conversão e normalização, as grandezas são formatadas no protocolo SmartREST da Cumulocity IoT, que constitui a camada de comunicação do Insights Hub. Cada medição é encapsulada em uma mensagem no formato do *template* estático 200:

200,<nome_serie>,<unidade_interna>,<valor>,<unidade_display>

As mensagens são publicadas no tópico s/us do *broker* MQTT da Siemens, no endereço `mciotextension.eu1.mindsphere.io`, porta 1883 ou 8883. A autenticação do dispositivo é realizada por meio do tópico s/ucr, que credencia o *client ID* do IoT 2040 junto ao Insights Hub antes de qualquer envio de telemetria.

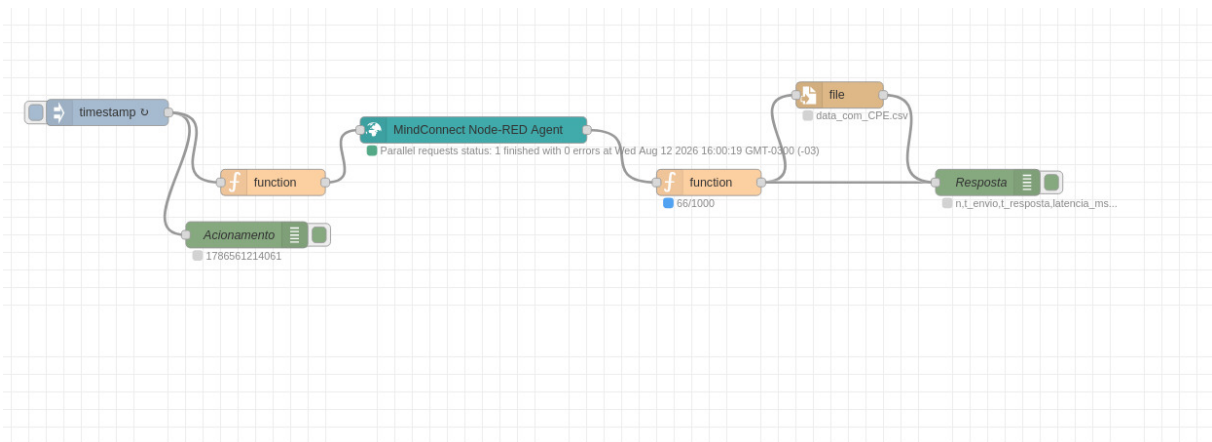
5.3.3 Estado Final da Implementação

Ao final do projeto, os fluxos de aquisição Modbus e de envio para o Siemens Insights Hub encontravam-se validados e em operação contínua. A interface com a plataforma GRV IoT, utilizada em caráter preliminar como ambiente de testes (*broker* `s1.grvriot.com.br`, porta 8883, com TLS, tópico `/IoT/PAEVDL/DADOS`), também chegou a ficar funcional, mas não foi levada adiante como resultado comparativo. A integração com a FIWARE não foi implementada (Seção 6.1).

5.4 COLETA DE DADOS

A coleta de dados de latência foi automatizada por um fluxo dedicado no Node-RED, executado em paralelo ao fluxo de aquisição Modbus descrito na Seção 5.3. A Figura 11 apresenta esse fluxo.

Figura 11 – Fluxo Node-RED de coleta e registro da latência ponta-a-ponta



Fonte: Autor

O fluxo funciona da seguinte forma: um nó *inject* (*timestamp*) dispara requisições em intervalos regulares; um nó *function* monta a mensagem de telemetria e registra o instante de envio (*t_envio*); a mensagem é enviada à nuvem pelo nó *MindConnect Node-RED Agent* via HTTPS do agente MindConnect; ao receber a confirmação de entrega, um segundo nó *function* registra o instante de resposta (*t_resposta*) e calcula a latência ponta-a-ponta ($latencia_ms = t_resposta - t_envio$); por fim, o nó *Resposta* expõe o registro completo (*n*, *t_envio*, *t_resposta*, *latencia_ms*), que é acumulado em um arquivo CSV pelo nó *file*. O nó *Acionamento* mantém a contagem de execuções e interrompe a coleta ao atingir o número de amostras definido — 1000 por rodada. O fluxo é síncrono: cada envio aguarda a confirmação do anterior antes de ser disparado.

Como ambos os instantes são registrados no próprio fluxo Node-RED do IoT 2040 — o de envio e o de chegada da confirmação retornada pela plataforma —, a latência medida corresponde ao tempo de ida e volta em nível de aplicação, o que explica valores na ordem de segundos. Ela inclui o processamento de ida e de volta no Node-RED e no agente de comunicação, o estabelecimento e a autenticação da conexão, o trânsito na rede de acesso e na internet até a região da nuvem e o processamento de ingestão na plataforma. Não se trata, portanto, de uma medida isolada da latência do enlace de rádio 5G.

Foram conduzidas duas rodadas de coleta, ambas com 1000 amostras e intervalo fixo de 1 minuto entre envios — intervalo escolhido para que cada mensagem fosse respondida antes da próxima ser enfileirada, evitando atraso por fila no agente:

- a) rede cabeada FEI: o SIMATIC IoT 2040 enviou telemetria à nuvem pela rede do campus, servindo como linha de base;
- b) CPE 5G: o mesmo fluxo foi executado com o *uplink* do switch comutado para o Intelbras GX 3000 (Seção 5.1.3), isolando o efeito do enlace de acesso sobre a latência observada.

As rodadas foram executadas sequencialmente, e não de forma intercalada; variações de carga da rede do campus e da plataforma em nuvem entre os dois períodos constituem, portanto, um possível fator de confusão, discutido no Capítulo 7.

6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos até o encerramento deste projeto de Iniciação Científica: a integração da fresadora CNC com a plataforma Siemens Insights Hub e a avaliação da latência de aplicação nas condições de acesso à nuvem pela rede cabeada da FEI e pelo CPE 5G. Neste trabalho, a latência de aplicação corresponde ao tempo de ida e volta definido na Seção 5.4. A comparação inicialmente prevista com a plataforma FIWARE não foi realizada, pelos motivos descritos a seguir.

6.1 NÃO AVALIAÇÃO DA PLATAFORMA FIWARE

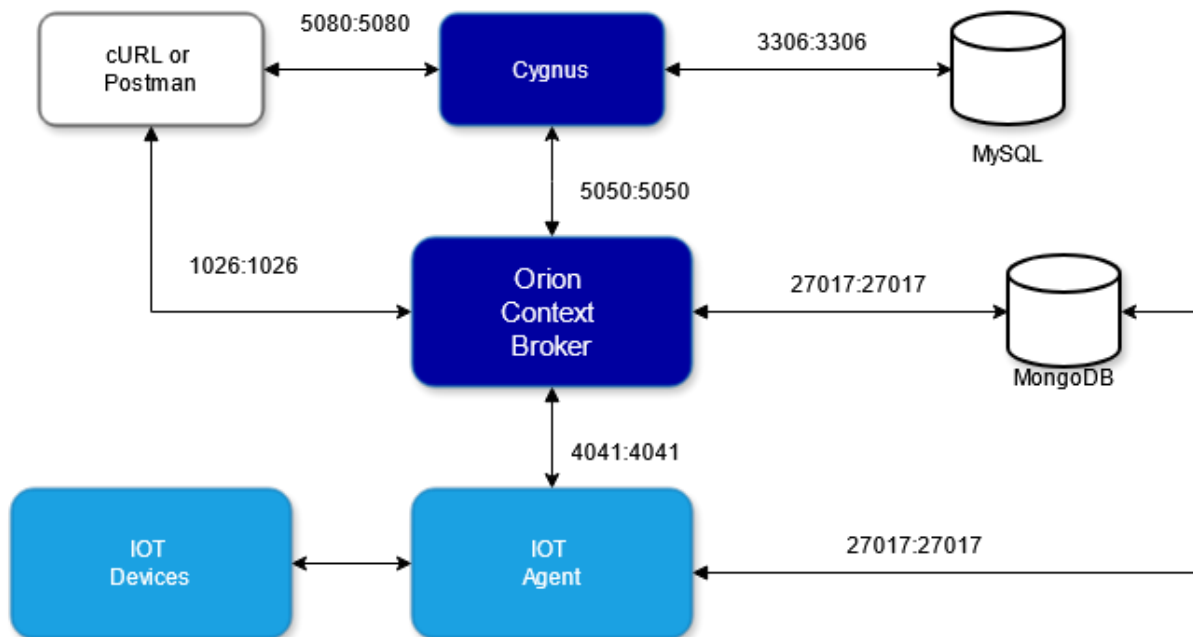
O escopo original do projeto previa a integração da máquina CNC às plataformas FIWARE e Siemens Insights Hub, permitindo uma análise comparativa entre uma plataforma aberta e uma comercial (Seções 2.2.1 e 3.3.1). A integração com a FIWARE seria alimentada por um sensor de temperatura com comunicação 5G embutida, a ser fornecido pela Advantech por meio de uma parceria entre o laboratório e a empresa. Por dispor de conectividade própria, esse sensor enviaria seus dados diretamente à plataforma pela rede móvel, sem passar pelo SIMATIC IoT 2040 nem pelo CPE 5G. A parceria não se concretizou e o sensor não foi adquirido, de modo que ele não faz parte da arquitetura final. Também não houve tempo hábil, dentro do cronograma do projeto, para adaptar a cadeia de sensoramento já implementada com o PowerTag e o Acti 9 Smartlink (Seção 3.3.3.2) para alimentar o IoT Agent da FIWARE.

Diante disso, optou-se por concentrar os resultados na integração validada com o Siemens Insights Hub e não conduzir uma comparação entre plataformas com dados incompletos de um dos lados, o que comprometeria a validade da análise. Pelo mesmo motivo, a integração com a plataforma de testes GRV IoT, mencionada na Seção 5.3, não foi levada adiante como resultado comparativo.

6.1.1 Arquitetura prevista para a FIWARE

A arquitetura planejada para a FIWARE é registrada a seguir como referência para trabalhos futuros. A Figura 12 apresenta seus componentes.

Figura 12 – Arquitetura prevista para a plataforma FIWARE



Fonte: Autor

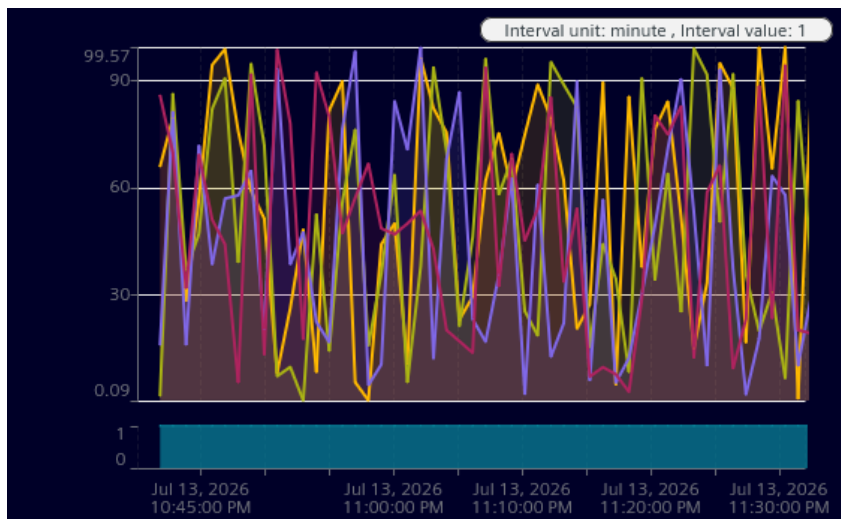
- a) IoT Agent: recebe as mensagens do sensor em seu protocolo nativo (por exemplo, JSON via MQTT ou HTTP), traduz o conteúdo para o formato NGSI e o encaminha ao OCB.
- b) *Orion Context Broker* (OCB): componente central de gestão de contexto, que permite criar, consultar, atualizar e excluir entidades e seus atributos, além de gerenciar assinaturas para notificação de mudanças, por meio da API NGSI-v2.
- c) MongoDB: banco de dados NoSQL utilizado pelo OCB para persistir as informações de contexto e pelo IoT Agent para armazenar o registro de dispositivos.
- d) Cygnus: HG de persistência histórica, que se inscreve no OCB para receber notificações de mudança e armazena o histórico em um banco relacional.
- e) MySQL: banco de dados relacional que recebe o histórico gravado pelo Cygnus, permitindo análises temporais por consultas SQL.
- f) cURL e Postman: ferramentas de apoio para interagir com as APIs RESTful dos componentes durante a configuração e os testes.

6.2 INTEGRAÇÃO COM O SIEMENS INSIGHTS HUB

O fluxo de aquisição, formatação e envio de dados descrito na Seção 5.3 foi validado: as mensagens publicadas pelo SIMATIC IoT 2040 no tópico *s/us* do *broker* MQTT do Insights Hub são recebidas, autenticadas e passam a compor o histórico das séries de dados do ativo criado na plataforma, conforme o modelo definido na Seção 5.2.1.

A cadeia completa de comunicação foi verificada com um teste usando valores gerados aleatoriamente, enviados no mesmo intervalo empregado na coleta de latência (Seção 5.4), conduzido nas duas condições de acesso à nuvem. A Figura 13 mostra esse teste visualizado em um *dashboard* do Insights Hub. Trata-se de uma confirmação qualitativa de que os dados chegam à plataforma, e não de uma medição de taxa de entrega.

Figura 13 – *Dashboard* do Insights Hub com dados de teste, na rede cabeada da FEI e com o CPE 5G



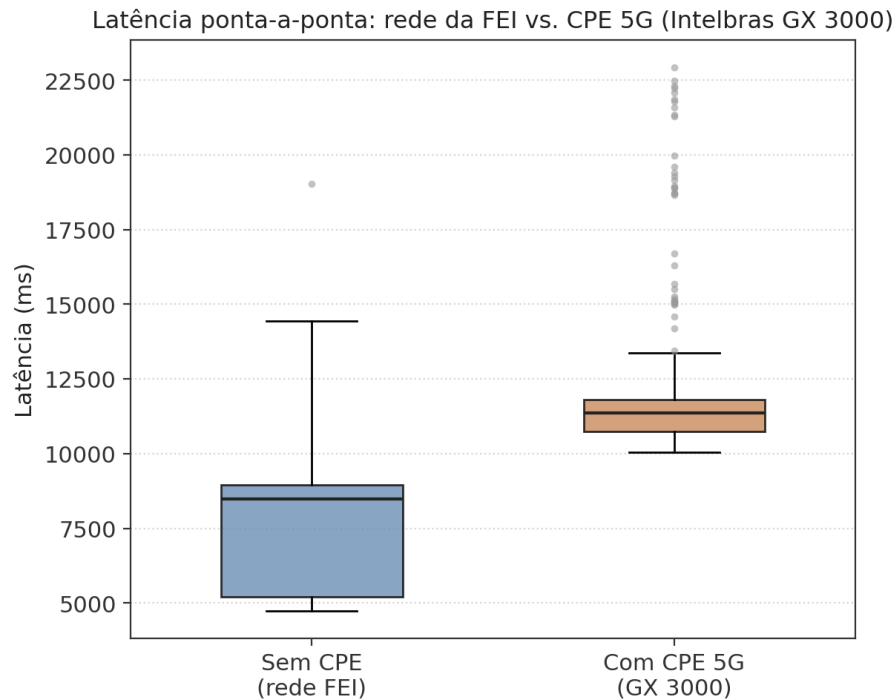
Fonte: Autor

Uma evidência quantitativa, ainda que parcial, vem dos registros da coleta de latência (Seção 5.4): em cada uma das duas rodadas de 1000 mensagens, o identificador sequencial *n* do arquivo CSV vai de 1 a 1000 sem lacunas ou duplicatas, ou seja, todas as 2000 mensagens enviadas obtiveram confirmação registrada. Essa métrica exige uma ressalva: como o fluxo é síncrono, cada envio aguarda a confirmação do anterior, logo a sequência completa mostra ausência de falha permanente dentro da janela de teste, mas não equivale a uma taxa de perda de pacotes medida sob *timeout*, métrica prevista nos objetivos específicos (Seção 2.2.2) e não implementada neste projeto.

6.3 AVALIAÇÃO DA LATÊNCIA DE APLICAÇÃO: REDE CABEADA DA FEI VERSUS CPE 5G

A Figura 14 compara a distribuição da latência de aplicação nas duas condições, e a Tabela 3 resume suas estatísticas descritivas.

Figura 14 – Comparação da latência de aplicação (ida e volta) entre a rede cabeada da FEI e o CPE 5G



Fonte: Autor

Tabela 3 – Estatísticas descritivas da latência de aplicação (ms)

Métrica	Rede FEI (n = 1000)	CPE 5G (n = 1000)
Média	7.593,55	11.560,94
Mediana	8.476,00	11.351,00
Desvio padrão	2.323,36	1.568,81
Coeficiente de variação	30,6%	13,6%
Mínimo	4.726	10.046
Máximo	19.034	22.944
Amostras acima de 19 s	1	10

Fonte: Autor

Com o CPE 5G, a latência foi maior em todas as medidas de posição. A mediana passou de 8.476 ms para 11.351 ms, um acréscimo de 2.875 ms (cerca de 34%); a média passou de

7.594 ms para 11.561 ms, um acréscimo de 3.967 ms (cerca de 52%). O teste de Mann-Whitney indica que a diferença entre as distribuições é estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Em contrapartida, a dispersão foi menor com o CPE 5G: o desvio padrão caiu de 2.323 ms para 1.569 ms, e o coeficiente de variação, de 30,6% para 13,6%. Na rede da FEI, a média ficou abaixo da mediana, indicando uma distribuição assimétrica, com concentração de amostras em valores mais baixos. Em ambas as condições houve poucas amostras acima de 19 s — uma na rede da FEI e dez com o CPE 5G —, sem ocorrência de ausência de resposta. As implicações desses resultados são discutidas no Capítulo 7.

7 DISCUSSÃO

Este capítulo discute os principais resultados obtidos por este projeto de pesquisa.

7.1 INTERPRETAÇÃO DO RESULTADO DE LATÊNCIA

Os valores de latência obtidos, na ordem de segundos, devem ser lidos à luz da definição adotada anteriormente (Seção 5.4): trata-se do tempo de ida e volta em nível de aplicação, medido entre o envio da mensagem e o registro, no mesmo fluxo Node-RED, da confirmação retornada pela plataforma. Essa medida incorpora o processamento das duas mensagens no dispositivo de borda, a autenticação e o estabelecimento da comunicação, o trânsito até a região da nuvem e a ingestão na plataforma. A maior parte desses componentes é comum às duas condições experimentais e explica a ordem de grandeza observada.

A diferença entre as condições, contudo, não se explica por esses componentes comuns, e deve ser atribuída ao que variou entre elas. Três hipóteses, não testadas neste trabalho, são compatíveis com os dados. A primeira é o caminho de rede da operadora, que pode incluir tradução de endereços (NAT) e rotas mais longas até a região da nuvem. A segunda é o efeito multiplicador de trocas sequenciais: se cada envio envolve várias trocas de ida e volta, como autenticação, negociação de conexão segura e a própria transmissão por exemplo, um pequeno aumento no tempo de ida e volta da rede se acumula a cada troca. A terceira é temporal: variações de carga na rede do campus e na plataforma em nuvem em tempos distintos podem ter contribuído para a diferença. Sem uma medição de linha de base da rede e sem registro do tempo gasto em cada etapa do fluxo, não é possível separar essas contribuições.

A menor dispersão observada com o CPE 5G é compatível com o fato de a rede do campus ser compartilhada por um número não controlado de usuários e dispositivos, sujeita a congestionamento variável. A mesma ressalva temporal, porém, se aplica a esse resultado.

7.2 O 5G AVALIADO E O 5G DESCRITO NA LITERATURA

As características do 5G apresentadas no Referencial Teórico, como latência inferior a 1 ms, alta confiabilidade e fatiamento de rede, correspondem a requisitos do cenário URLLC e de redes configuradas para esse fim (International Telecommunication Union, s.d.; Chettri; Bera, 2020; Porambage *et al.*, 2018). O serviço avaliado neste projeto é de outra natureza: um enlace

5G comercial de banda larga móvel (eMBB), acessado por um CPE e sem fatiamento dedicado, conectando o dispositivo de borda a uma plataforma em nuvem pública hospedada em outro continente. A literatura associa a redução de latência à combinação entre 5G e processamento próximo à fonte dos dados (Mao *et al.*, 2017; Qiu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2018), enquanto, neste sistema, a confirmação de cada mensagem depende de processamento em uma nuvem remota.

Assim, o resultado obtido não contradiz a literatura, mas evidencia a distância entre as capacidades anunciadas da tecnologia e o que uma PME efetivamente obtém ao contratar um serviço 5G comercial para enviar dados a uma plataforma em nuvem. Para aplicações que dependam de latência baixa, a escolha da arquitetura, em especial onde os dados são processados e que tipo de serviço 5G é contratado, tende a pesar mais que a simples adoção do enlace 5G.

7.3 IMPLICAÇÕES PARA A MODERNIZAÇÃO DE MÁQUINAS LEGADAS

Para a aplicação avaliada do monitoramento de consumo energético, com envio em intervalos de um minuto, latências de alguns segundos são aceitáveis em ambas as condições. Nesse cenário, o enlace 5G não trouxe ganho de desempenho em relação à rede cabeada já disponível no campus, que não gera custo adicional. O investimento em um CPE 5G e em um plano de dados, portanto, não se justifica pela latência em instalações que já dispõem de rede cabeada.

A vantagem mais provável do 5G nesse contexto é a dispensa de cabeamento estruturado até a máquina (Godor *et al.*, 2020), mas esse cenário não foi testado: em ambas as condições, o SIMATIC IoT 2040 permaneceu conectado por cabo ao mesmo switch, e apenas o *uplink* foi alterado. A abordagem de *retrofit* não invasivo, por sua vez, mostrou-se tecnicamente viável e independente do enlace utilizado.

7.4 LIMITAÇÕES

Os resultados deste trabalho devem ser interpretados considerando as seguintes limitações:

- a) a comparação entre FIWARE e Insights Hub não foi realizada (Seção 6.1). Cabe notar que, mesmo com o sensor da Advantech disponível, uma comparação direta entre as plataformas teria fontes de dados e caminhos de acesso distintos, sendo o sensor de temperatura com 5G embutido de um lado, e as grandezas elétricas via

gateway e CPE do outro, o que dificultaria atribuir diferenças de desempenho às plataformas;

- b) taxa de transmissão e perda de pacotes sob carga variável não foram medidas; a sequência completa de mensagens (Seção 6.2) indica apenas ausência de falha permanente;
- c) a latência não foi decomposta por etapa, nem acompanhada de uma medição de linha de base da rede, o que impede isolar a contribuição do enlace 5G;
- d) as rodadas foram sequenciais, e não intercaladas, sujeitas a variações temporais de carga;
- e) os testes utilizaram mensagens de teste em intervalo fixo, e não o tráfego real de telemetria sob rajadas;
- f) o experimento envolveu um único dispositivo, sem avaliar o comportamento com múltiplas máquinas conectadas.

7.5 BOAS PRÁTICAS PARA PROJETOS FUTUROS

A partir dos desafios enfrentados, propõem-se as seguintes práticas para projetos de IIoT baseados em 5G:

- a) Medir uma linha de base da rede (por exemplo, tempo de ida e volta até o servidor de destino) antes e durante os testes de aplicação, para separar a contribuição da rede da contribuição do software e da plataforma.
- b) Registrar instantes intermediários ao longo do fluxo de dados, permitindo decompor a latência de aplicação por etapa.
- c) Verificar, junto à operadora, o tipo de serviço 5G efetivamente contratado (eMBB ou URLLC), o modo de operação (SA ou NSA) e a qualidade de sinal no local, registrando essas condições no relatório.
- d) Intercalar as condições experimentais no tempo, em blocos alternados, para reduzir o efeito de variações de carga da rede e da nuvem.
- e) Considerar a localização da nuvem ou o uso de processamento na borda quando a aplicação exigir baixa latência, já que o percurso até a plataforma pode dominar o tempo de resposta.

- f) Em comparações entre plataformas, alimentar ambas a partir da mesma fonte de dados e do mesmo caminho de acesso, de modo que diferenças observadas possam ser atribuídas às plataformas.
- g) Utilizar comunicação cifrada (MQTT sobre TLS) no envio de dados industriais à nuvem.

8 CONCLUSÃO

Este projeto partiu da proposta de conectar uma fresadora CNC legada a duas plataformas de IoT — FIWARE e Siemens Insights Hub —, usando 5G como enlace de acesso, e de comparar o desempenho das plataformas e dos enlaces. Ao final, o que foi entregue é mais restrito que o escopo original: a integração com o Insights Hub, validada de ponta a ponta, e uma avaliação da latência de aplicação entre a rede cabeada da FEI e o CPE 5G, sem a comparação prevista com a FIWARE. O Quadro 15 sintetiza a situação de cada objetivo específico.

Quadro 15 – Situação dos objetivos específicos ao final do projeto

Objetivo específico	Situação	Onde é tratado
Investigar as arquiteturas das plataformas, os requisitos do 5G para IIoT e a aquisição de dados em máquinas CNC	Cumprido	Capítulo 3
Configurar o ambiente experimental	Cumprido	Seção 5.1
Implementar a comunicação com a FIWARE	Não cumprido	Seção 6.1
Implementar a comunicação com o Insights Hub	Cumprido	Seções 5.3 e 6.2
Executar testes de desempenho (latência, taxa de transmissão, perda de pacotes e confiabilidade)	Parcial: apenas latência	Seção 6.3
Analisar os resultados, documentar desafios e propor boas práticas	Cumprido	Capítulo 7 e Seção 7.5

Fonte: Autor

O resultado central é que, nas condições testadas, o acesso à nuvem pelo CPE 5G não reduziu a latência de aplicação em relação à rede cabeada da FEI: a mediana foi cerca de 34% mais alta, embora com menor dispersão. Como a latência medida é um tempo de ida e volta dominado por processamento na borda e na nuvem, e como o serviço avaliado é um 5G comercial de banda larga móvel, esse resultado não deve ser lido como uma avaliação do 5G enquanto tecnologia de baixa latência. Ele indica, de forma mais restrita, que para telemetria industrial não crítica em instalações que já dispõem de rede cabeada, a adoção de um CPE 5G não traz ganho de desempenho que justifique, isoladamente, o investimento.

A abordagem de *retrofit* não invasivo, por sua vez, mostrou-se tecnicamente viável e replicável, independentemente do enlace utilizado.

Como continuidade, ficam as seguintes frentes: retomar a comparação entre plataformas, alimentando FIWARE e Insights Hub a partir da mesma fonte de dados; decompor a latência de aplicação, com medição de linha de base da rede e registro de instantes por etapa; repetir os testes com as condições intercaladas no tempo e em um ponto sem cabeamento local, cenário em que a vantagem do 5G tenderia a aparecer; e avaliar taxa de transmissão, perda de pacotes e comportamento sob rajadas de mensagens.

O sistema implementado — sensor não invasivo, *gateway* de borda e integração com o Insights Hub — permanece operacional e pode seguir coletando dados reais de consumo energético da fresadora, servindo de base tanto para a manutenção preditiva mencionada na justificativa do projeto quanto para os trabalhos futuros aqui apontados.

REFERÊNCIAS

ALONSO, A. et al. Industrial data space architecture implementation using fiware. **Sensors**, v. 18, n. 7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18072226>.

ARAÚJO, Anderson et al. Reliability analysis of an IoT-based smart parking application for smart cities. In: 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). [S.l.: s.n.], 2017. P. 4086–4091. DOI: <https://doi.org/10.1109/BigData.2017.8258426>.

CHEETRI, Lalit; BERA, Rabindranath. A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. en. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 1, p. 16–32, jan. 2020. ISSN 2327-4662, 2372-2541. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2948888>.

FAZIO, Maria et al. Exploiting the FIWARE cloud platform to develop a remote patient monitoring system. In: 2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC). [S.l.: s.n.], 2015. P. 264–270. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCC.2015.7405526>.

FERNÁNDEZ, P. et al. Smartport: A platform for sensor data monitoring in a seaport based on FIWARE. **Sensors**, v. 16, n. 3, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16030417>.

FIWARE. **A curated framework of Open Source Platform components to accelerate the development of Smart Solutions**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: www.fiware.org/about-us/. Acesso em: 16 dez. 2022.

FULLER, Aidan et al. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. en. **IEEE Access**, v. 8, p. 108952–108971, 2020. ISSN 2169-3536. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9103025/>.

GODOR, Istvan et al. A Look Inside 5G Standards to Support Time Synchronization for Smart Manufacturing. en. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 4, n. 3, p. 14–21, set. 2020. ISSN 2471-2825, 2471-2833. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.2000010>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9204594/>.

INTELBRÁS. **Datasheet Roteador 5G - GX 3000_Port**. [S.l.: s.n.].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC 20924: Internet of things (IoT) - Vocabulary.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond**. en. [S.l.].

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 working group. Acatech, n. 1, 2013. Disponível em: <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>.

LI, Shancang; XU, Li Da; ZHAO, Shanshan. 5G Internet of Things: A survey. en. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 10, p. 1–9, 2018. ISSN 2452414X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.01.005>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452414X18300037>.

LÓPEZ-RIQUELME, J.A. et al. A software architecture based on FIWARE cloud for Precision Agriculture. **Agri. Water Manag.**, v. 183, p. 123–135, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.020>.

LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, Elsevier Inc., v. 6, p. 1–10, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.

MAO, Yuyi et al. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective. en. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 4, p. 2322–2358, 2017. ISSN 1553-877X. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2745201>.

MINERVA, Roberto; LEE, Gyu Myoung; CRESPI, Noel. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. en. **Proceedings of the IEEE**, v. 108, n. 10, p. 1785–1824, out. 2020. ISSN 0018-9219, 1558-2256. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2998530>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9120192/>.

PAGE, Matthew J et al. PRISMA 2020 Explanation and Elaboration: Updated Guidance and Exemplars for Reporting Systematic Reviews. **BMJ**, n160, mar. 2021. ISSN 1756-1833. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>.

PAGE, Matthew J et al. The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. **BMJ**, n71, mar. 2021. ISSN 1756-1833. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PORAMBAGE, Pawani et al. Survey on Multi-Access Edge Computing for Internet of Things Realization. en. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 4, p. 2961–2991, 2018. ISSN 1553-877X, 2373-745X. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2849509>.

QIU, Tie et al. Edge Computing in Industrial Internet of Things: Architecture, Advances and Challenges. en. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 22, n. 4, p. 2462–2488,

2020. ISSN 1553-877X, 2373-745X. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3009103>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9139976/>.

ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>.

SCHNEIDER ELECTRIC. **A9MEM1520 - SENSOR ENERGIA POWERTAG ACTI9 1P 63A A9MEM1520 | Schneider Electric Brasil**. [S.l.: s.n.]. <https://www.se.com/br/pt/product/A9MEM1520/sensor-energia-powertag-acti9-1p-63a-a9mem1520/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Acti 9 Smartlink SI D | Schneider Electric Brasil**. [S.l.: s.n.]. <https://www.se.com/br/pt/product-range/64482-acti-9-smartlink-si-d/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

SCHUH, Günther et al. Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies. **Acatech publications**, v. 1, n. 1, p. 53, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.3.5765.46-b>. Disponível em: www.acatech.de/publikationen.

SIEMENS. **Simaticiot2040**. [S.l.: s.n.], mar. 2026. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7b2c5580-7436-4081-9ae6-7c4eba29ddd1/version:1562856379/simaticiot2040.pdf>.

SIEMENS. **MindSphere: Enabling the world's industries to drive their digital transformations**. [S.l.], 2018. P. 24. Disponível em: www.siemens.com/mindsphere.

TERROSO-SAENZ, F. et al. An open IoT platform for the management and analysis of energy data. **Future Generation Computer Systems**, v. 92, p. 1066–1079, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.08.046>.

TZOUNIS, A. et al. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, v. 164, p. 31–48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>.

VAIDYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh. Industry 4.0 – A Glimpse. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 233–238, 2018. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>.

VICENTIN, Alexandre. **Implementação de retrofit em máquinas industriais legadas para a inserção no contexto da indústria 4.0**. 2021. Tese (Doutorado) – Centro Universitário FEI. DOI: <https://doi.org/10.31414/EM.2021.D.131328>. Disponível em: <http://sofia.fei.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/00009d/00009d8e.pdf>.

XU, Hansong et al. A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective. en. **IEEE Access**, v. 6, p. 78238–78259, 2018. ISSN 2169-3536. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906>.