

**INTELLIGENT MONITORING SYSTEM FOR WIRE FACTORIES WITH EDGE CLOUD  
COMPUTING****SISTEMA DE MONITORAMENTO INTELIGENTE PARA FÁBRICAS DE FIOS ELÉTRICOS COM  
EDGE CLOUD COMPUTING****DHYONATAN SANTOS DE FREITAS**

<https://orcid.org/0000-0002-4425-6409/> [dhyonatan.freitas@edu.sc.senai.br](mailto:dhyonatan.freitas@edu.sc.senai.br)  
Centro Universitário SENAI Santa Catarina - UniSENAI, Joinville, Santa Catarina, Brasil

**TATHIANA DUARTE DO AMARANTE**

<https://orcid.org/0000-0002-3219-583X/> [tathiana.amarante@edu.sc.senai.br](mailto:tathiana.amarante@edu.sc.senai.br)  
Centro Universitário SENAI Santa Catarina – UniSENAI, Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil

**MAURÍCIO ARONNE PILLON**

<https://orcid.org/0000-0001-7634-6823/> [mauricio.pillon@gmail.com](mailto:mauricio.pillon@gmail.com)  
Universidade Estadual de Santa Catarina—UDESC, Joinville, Santa Catarina, Brasil

**LUCAS EDUARDO SASSE**

<https://orcid.org/0009-0002-1686-2150/> [lucas1sasse@gmail.com](mailto:lucas1sasse@gmail.com)  
Centro Universitário SENAI Santa Catarina – UniSENAI, Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil

**OTÁVIO MATHEUS NEVES**

<https://orcid.org/0009-0002-7934-6452/> [otavio\\_neves@estudante.sesisenai.org.br](mailto:otavio_neves@estudante.sesisenai.org.br)  
Centro Universitário SENAI Santa Catarina – UniSENAI, Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil



Recebido em: 04/02/2025

Aprovado em: 02/06/2025

Publicado em: 20/06/2025

**RESUMO**

Inovações tecnológicas revolucionaram a indústria na última década. Com foco na eficiência, sustentabilidade e redução de custos, a indústria 4.0 incorporou tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), processamento em borda (*edge*), computação em nuvem (*cloud*) e, mais recentemente, computação em névoa (*fog*). A convergência dessas tecnologias deu origem ao conceito de *Edge Cloud Computing* (ECC), uma abordagem integrada que otimiza o processamento e a transmissão de dados em ambientes industriais. Este trabalho reúne a aplicação dessas tecnologias, propondo uma arquitetura para um Sistema de Monitoramento Inteligente aplicado a Fábricas de Fios Elétricos utilizando hardwares de baixo custo e uma proposta com ECC. Os resultados confirmam as hipóteses da pesquisa, as quais envolveram a viabilidade da execução de modelos de IA em *edge* e a efetividade da arquitetura ECC, indicando melhorias no ecossistema fabril.

**Palavras-chave:** *edge*; internet das coisas; indústria 4.0; inteligência artificial; fábrica de fios.

**ABSTRACT**

Technological innovations have revolutionized the industry in the last decade. With a focus on efficiency, sustainability, and cost reduction, industry 4.0 has incorporated emerging technologies such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), edge processing, cloud computing, and, more recently, fog computing. The convergence of these technologies has given rise to the concept of Edge Cloud Computing (ECC), an integrated approach that optimizes the processing and transmission of data in industrial environments. This work brings together the application of these technologies, proposing an architecture for an Intelligent Monitoring System applied to Electrical Wire Factories using low-cost hardware and a proposal with ECC. The results confirm the research hypotheses, which involved the feasibility of executing AI models at the edge and the effectiveness of the ECC architecture, indicating improvements in the manufacturing ecosystem.

**Keywords:** edge; internet of things; industry 4.0; artificial intelligence; yarn factory.

**1 INTRODUÇÃO**

O destaque na inovação industrial na última década se deu, sobretudo, pela aplicação da tecnologia da informação em processos e equipamentos fabris. A convergência de tecnologias emergentes na Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), processamento em borda (*Edge*) e computação em nuvem (*Cloud*), têm redefinido os paradigmas de processamento de dados e otimização de recursos no chão de fábrica. Com a implantação de sistemas embarcados de monitoramento, controle e atuação em parques fabris, a demanda por potência de cálculo do setor industrial teve crescimento exponencial. Esta demanda suscitou o desenvolvimento de novas pesquisas na área de Computação de Alto Desempenho (HPC), vinculando-as a IA, *Edge*, IoT e *Cloud*.

A Indústria 4.0 promove a automação e a troca de dados em tempo real, resultando em fábricas inteligentes nas quais máquinas, sistemas e produtos se comunicam e colaboram de forma autônoma (BELGOUMRI et al. 2024). O objetivo é aumentar a eficiência, a flexibilidade e a personalização da produção, ao mesmo tempo em que se reduz o desperdício e os custos operacionais. Os desafios e as necessidades do chão de fábrica diferem de indústria para indústria. A Fábrica de Fios Elétricos, foco deste artigo, caracteriza-se como um ambiente limpo (poucos resíduos no ar), ruidoso, vibratório e amplo. Se por um lado, a ausência de resíduos corrosivos no ar facilita a instalação de dispositivos IoT, o ruído, a vibração e a extensão da área a ser coberta são desafios significativos para o bom funcionamento desses equipamentos. Projetos físicos de implantação de dispositivos e sistemas precisam ponderar conflitos entre latência de rede, largura

de banda, tempo de resposta, segurança de dados e de pessoal, poder de processamento dos dispositivos, inteligência requerida e autonomia de energia (HAO et al. 2021).

A era da Indústria 4.0 já é uma realidade dentro do setor produtivo, como ocorre na Fábrica de Fios Elétricos. No entanto, a otimização do uso dos recursos fabris e o potencial dos dispositivos e sistemas ainda possibilitam exploração científica. A contribuição deste artigo é sistematizar o chão de fábrica de uma Fábrica de Fios Elétricos, já instrumentalizada para Indústria 4.0, e apresentar uma arquitetura distribuída que explore características potenciais da IA, *edge*, *cloud* e IoT neste ambiente. Para isso, baseando-se no conceito de *Edge-Cloud Continuum* (HAO et al. 2021), associou-se HPC e IA na *edge*, apoiado por uma arquitetura em camadas. Serviços são disponibilizados em função de suas necessidades. A viabilidade técnica das necessidades de processamento de IA em IoT foi testada com um dispositivo de baixo custo, o Raspberry Pi 4, e os testes na Cloud foram realizados utilizando uma conta gratuita no Google. Os resultados mostram a importância da definição do serviço na camada mais adequada, visto que os tempos de processamento dos modelos de IA testados chegam a ter diferenças de mais de seis vezes no caso de treinamento de novos modelos (HAO et al. 2021).

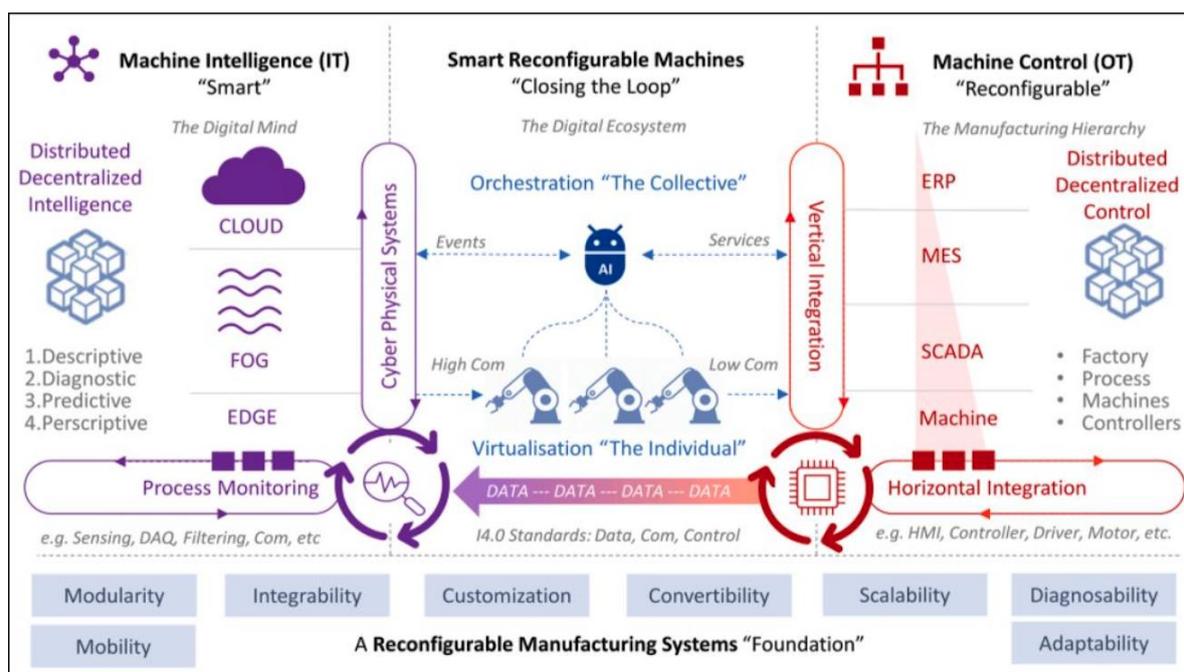
O objetivo geral deste trabalho é propor e validar uma arquitetura baseada em Edge Cloud Computing (ECC), com suporte à Inteligência Artificial, para monitoramento inteligente de Fábricas de Fios Elétricos, utilizando hardwares de baixo custo. O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: Na primeira seção, descrevem-se os conceitos da Indústria 4.0, os componentes de uma Fábrica de Fios Elétricos, as áreas de IA e IoT no contexto da Indústria 4.0 e, finalmente, uma breve revisão de literatura. A proposta de arquitetura com *Edge-Cloud Continuum* (ECC) aplicado à Indústria 4.0 para monitoramento de sistema é apresentada na segunda seção. A terceira seção inclui a descrição do Estudo de Caso aplicado a uma Fábrica de Fios. A metodologia para o desenvolvimento do protótipo e a análise dos resultados são apresentados na seção 5. Finalmente, a última seção apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2 INDÚSTRIA 4.0

O ambiente industrial é inerentemente complexo, constituído por infraestrutura física específica, sistemas de controle e automação, infraestrutura de redes e comunicação, segurança e proteção, gestão de dados e análise, logística e cadeia de suprimentos, aspectos humanos e, finalmente, aspectos regulatórios e de conformidade. A Indústria 4.0 agregou sistemas de gerência e automação com o intuito de promover a automação e a troca de dados em tempo real, resultando em fábricas inteligentes, permitindo que a interação entre máquinas, sistemas e produtos flua mais rapidamente por meio de colaboração autônoma entre humanos e máquinas.

Este ambiente denso e complexo pode ser descrito em três grandes módulos: Módulo de Infraestrutura (MI), Módulo de Redes e Sistemas de Gerenciamento (SRM) e Módulo de Controle (MC) como apresentado por (PATEL et al. 2023). O processamento, o armazenamento e a transferência dos dados estão situados nos módulos MI e SRM, componentes já aplicados à Fábrica de Fios Elétricos, estudo de caso deste trabalho, e tecnologias de atuação do projeto, como *Cloud*, *Edge* e IA.

Figura 1: Componentes da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Patel et al. (2025)

## 2.1 Fábrica de Fios Elétricos 4.0

Fábricas pertencentes à Era da Indústria 4.0 seguem as diretrizes de integração humano-máquina e automação (Allen et al. 2024). Todavia, cada setor apresenta suas especificidades. No estudo de caso deste trabalho, o chão de fábrica de uma Fábrica de Fios Elétricos é composto pelos seguintes componentes:

- **Máquinas de extrusão:** utilizadas para derreter e moldar materiais como cobre ou alumínio em fios.
- **Linhas de encapsulamento:** usadas para revestir e curar os fios com materiais isolantes, como PVC ou borracha.
- **Equipamentos de resfriamento:** responsáveis pela solidificação dos materiais extrudados e revestidos.
- **Máquinas de enrolamento e bobinagem:** utilizadas para enrolar os fios em bobinas ou carreteis para facilitar o transporte e armazenamento.

- **Sistemas de controle de qualidade:** compostos por sensores e sistemas de monitoramento para verificar a espessura, resistência e integridade dos fios durante o processo de fabricação.
- **Armazenamento e logística:** áreas designadas para o armazenamento de matérias-primas e produtos acabados.
- **Segurança e conformidade:** incluem medidas de segurança para proteger os trabalhadores, como o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs).

A integração desses componentes e sua atuação orquestrada garantem a eficiência da fábrica, promovendo redução de custos e aumento da produtividade.

A influência do monitoramento inteligente com processamento, seja na *edge* ou na *cloud*, é essencial para a tomada de decisão, tanto autônoma quanto gerencial. (KHAN et al., 2019)

## 2.2 Inteligência Artificial e Internet das Coisas

A integração de IA (Inteligência Artificial) e IoT (Internet das Coisas) tem gerado produtos tecnológicos inovadores em aplicações industriais (HERGYS and SEBASTIEN, 2021). Uma das principais áreas de aplicação é a análise preditiva de equipamentos, produtos e processos (ALLEN et al., 2024). Com a capacidade de coletar e processar grandes volumes de dados provenientes de dispositivos IoT, viabilizada pela área de HPC (*High-Performance Computing*), algoritmos de IA identificam padrões e preveem eventos baseados em históricos de dados (ALLEN et al. 2024). Na indústria, a manutenção preditiva de equipamentos reduz significativamente o tempo de parada do fluxo de produção, impactando diretamente na redução de custos operacionais (LI et al. 2015).

Além disso, sistemas inteligentes têm sido utilizados para otimização de processos produtivos. A análise em tempo real de grandes volumes de dados, coletados por sensores IoT, permite que algoritmos de IA realizem o gerenciamento inteligente de energia e logística. Isso não só melhora a eficiência operacional, como também reduz o desperdício de recursos, contribuindo para práticas industriais mais sustentáveis (CHANG et al., 2019).

Embora a aplicação de IA e IoT na indústria esteja em expansão, a associação com tecnologias inovadoras, como *edge computing*, HPC na *edge* e ECC, ainda carece de estudos e investigações científicas.

## 2.3 Trabalhos correlatos

O ecossistema da Indústria 4.0 tem sido um tema central no desenvolvimento de pesquisas científicas, produtos tecnológicos e inovação. Este estudo apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com o objetivo de analisar os impactos do uso de *High-Performance Computing* (HPC) associado ao *Cloud-Edge Continuum* em modelos de Inteligência Artificial (IA) aplicados ao estudo de caso da Fábrica de Fios Elétricos.

A metodologia baseou-se em buscas realizadas nos portais IEEE Xplore, Scopus, Springer Link, ACM Digital Library e Google Scholar. A busca foi exploratória e delimitada por critérios de inclusão e exclusão, considerando apenas artigos escritos em inglês e publicados nos últimos dez anos, para garantir relevância e abrangência. As palavras-chave utilizadas incluíram HPC, AI, *Internet of Things* (IoT), Industry 4.0, *Edge-Cloud Continuum*, *Cloud Computing*, *Edge Computing* e Edge-AI. O levantamento explorou combinações dessas palavras-chave, com os resultados sumarizados em uma tabela.

Tabela 1. Resultado da Revisão Sistemática de Literatura (RSL)

<i>Expressões de busca</i>	<i>IEEE</i>	<i>Scopus</i>	<i>Springer</i>	<i>ACM DL</i>	<i>Scholar</i>
AI AND Internet of Things AND Industry 4.0 AND edge	127	143	1383	1343	2
Edge-Cloud Continuum AND Industry 4.0	5	4	15	1756	1
HPC AND Industry 4.0	10	678	15	606	4
Edge-AI AND Industry 4.0	13	20	4265	1173	1

Fonte:

Dos autores (2025)

Os resultados indicam que a aplicação de Edge-AI na Indústria 4.0, em combinação com IoT, tem sido amplamente estudada. Por exemplo, o trabalho de (HERGYS and SEBASTIEN, 2021), propõe um *framework* que realiza a detecção de objetos na *edge* utilizando FPGA, enquanto o processamento da telemetria ocorre na *Cloud*. Esse *framework* tem aplicações potenciais em sistemas de carros autônomos, conforme sugerido pelos autores.

Adicionalmente, avanços significativos têm sido registrados em áreas como sistemas de produção (KOCHER et al., 2022) , redução de emissões de carbono (WEN et al., 2024), monitoramento de emissões químicas (ADDABOO et al., 2018) e mecanismos de criptografia para Edge-AI. Esses avanços são fundamentais para a melhoria dos processos industriais, mas também destacam lacunas. Até o momento, nenhum estudo explora de forma abrangente o uso de HPC ou ECC na *edge* para maximizar o desempenho de aplicações industriais baseadas em IA.

A análise dos dados obtidos revela o crescente interesse pela integração de IA e IoT na Indústria 4.0. No entanto, a literatura carece de abordagens mais integradas que aproveitem os avanços computacionais na *edge* para criar soluções mais eficientes e sustentáveis.

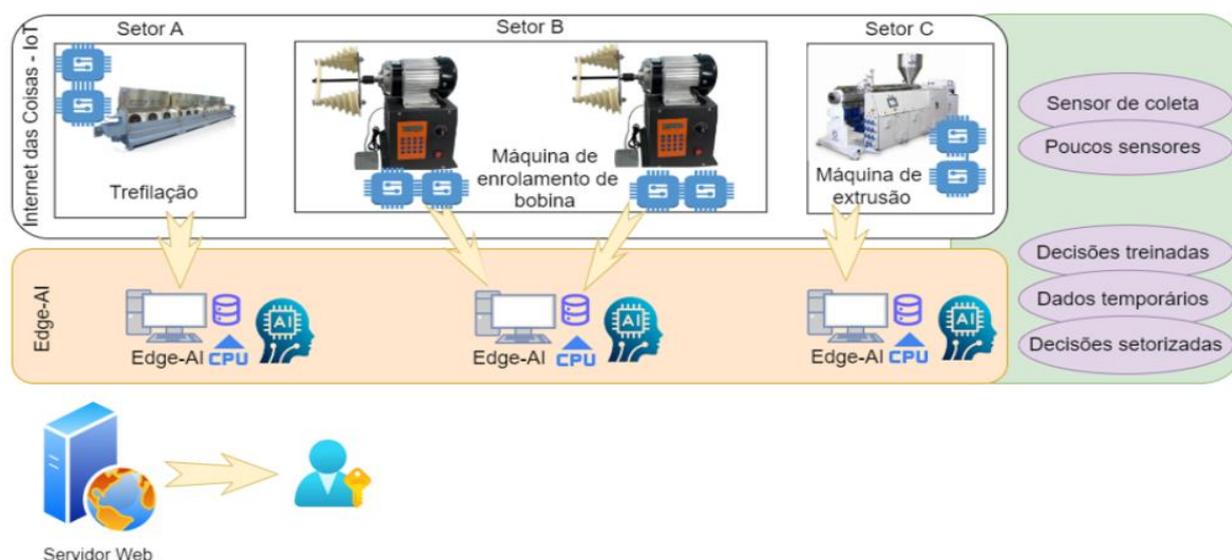
Pesquisas futuras devem focar na associação de HPC e ECC, buscando otimizar o uso de IA em ambientes industriais. Isso inclui a implementação de novos modelos computacionais que possam suportar cargas de trabalho intensivas e, simultaneamente, atender às demandas de baixo consumo de energia e alta eficiência operacional.

Em conclusão, o tema apresenta um vasto campo para exploração científica e inovação tecnológica, com potencial significativo para transformar práticas industriais e promover maior eficiência, sustentabilidade e integração de sistemas inteligentes.

### **3 EDGE-CLOUD CONTINUUM AI MONITORING SYSTEM**

Na Indústria 4.0, os dados são gerados continuamente e precisam ser processados de acordo com suas características e prioridades. Este trabalho propõe a aplicação dos conceitos de ECC associados ao HPC na concepção de um sistema de monitoramento inteligente, conforme destacado por (HAO et al. 2021). A aplicação proposta considera um cenário na Indústria 4.0, especificamente em uma hipotética fábrica de fios elétricos. A estrutura da fábrica inclui máquinas de extrusão, enrolamento e bobinagem, que estão localizadas em setores distintos (A, B e C) dentro de um mesmo galpão, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Edge-AI Setorizada



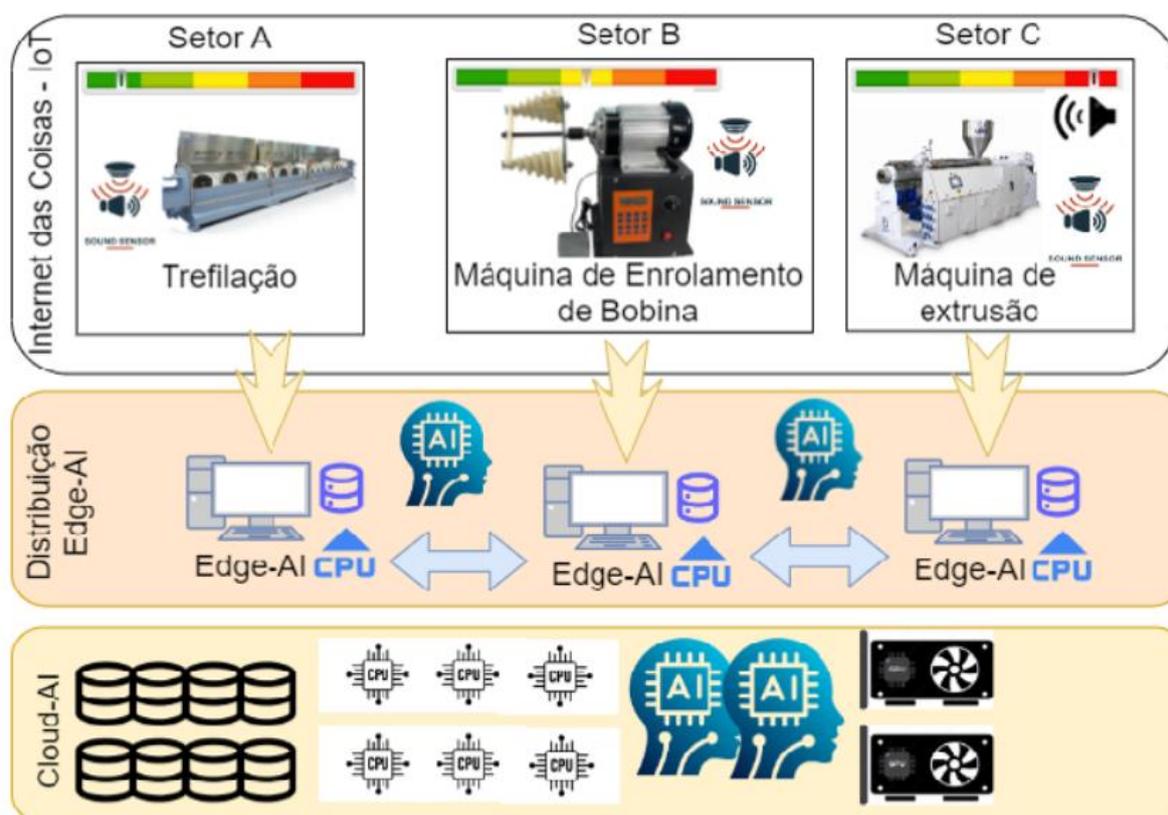
Fonte: Dos autores (2025)

Esses equipamentos possuem sensores de ruído que monitoram continuamente suas operações. Na camada de IoT, os dados desses sensores são coletados; na Edge-AI, as decisões são tomadas e os dados temporários armazenados; e, finalmente, um servidor *web* disponibiliza as informações de monitoramento para os gestores.

Embora essa estrutura seja comum em ambientes industriais já implantados, os desafios são significativos, especialmente devido ao ambiente ruidoso. Por exemplo, na fábrica de fios elétricos, o funcionamento de uma máquina pode interferir no monitoramento de outra. A intensidade e frequência do ruído são indicadores importantes que podem auxiliar na identificação de defeitos de equipamentos. Contudo, isso requer modelos de IA bem treinados, cuja acurácia depende de bases de treinamento robustas e decisões baseadas em heurísticas.

Uma das principais limitações dos sistemas atuais é a tendência de imputar erros às decisões inteligentes quando os dados são tratados individualmente por setores. Considerando um cenário no qual um ruído estridente é emitido no setor C, esse ruído também pode ser detectado pelos sensores dos setores A e B, mas com intensidades distintas. Essa situação é ilustrada na Figura 3. O tratamento isolado dos dados em cada setor pode resultar em decisões equivocadas.

Figura 3 - Arquitetura em camadas da Edge-Cloud Continuum AI



Fonte: Dos autores (2025)

A integração das camadas de distribuição de Edge-AI e comunicação entre módulos proporciona maior poder computacional (HPC) próximo aos dados e acesso mais amplo às informações para a tomada de decisão. Essa abordagem reduz a necessidade de enviar dados para a Cloud, melhorando a eficiência e o tempo de resposta, como argumentado em (KHAN et al. 2019).

Finalmente, a camada de Cloud-AI desempenha um papel fundamental ao garantir tolerância a falhas, elasticidade da plataforma, potência computacional superior à Edge-AI e resiliência no armazenamento de dados. Essa arquitetura de ECC aplicada à fábrica de fios elétricos é ideal para sistemas de monitoramento inteligente. Ela possibilita a detecção de falhas em tempo real, ajustes autônomos de equipamentos, manutenção preventiva e preditiva, otimização dos processos produtivos e maior segurança para os trabalhadores.

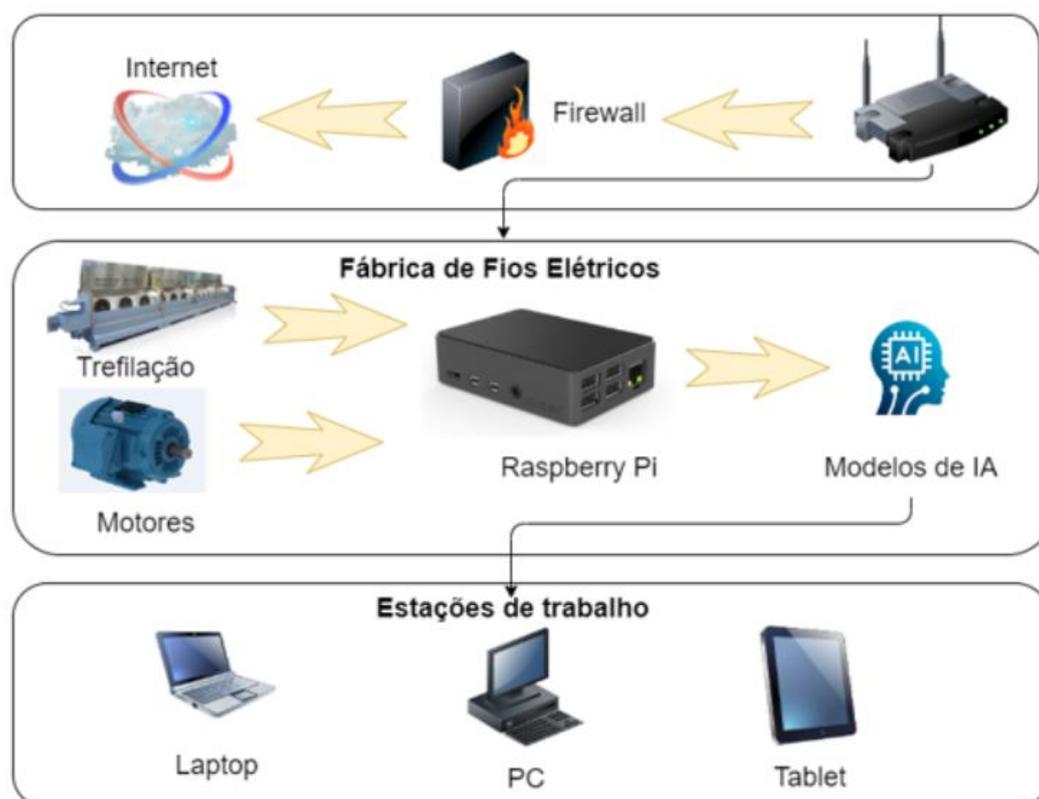
## 4 ESTUDO DE CASO: FÁBRICA DE FIOS ELÉTRICOS

Este estudo de caso tem por objetivo descrever uma Fábrica de Fios Elétricos 4.0, candidata a aplicação da arquitetura proposta. No presente artigo, a investigação da questão de pesquisa está direcionada à identificação da viabilidade de execução de modelos de IA na *edge* ou à necessidade de uso da *cloud*. A automação do processo de fabricação de fios elétricos desta fábrica é iniciada pelo processo de trefilação. Máquinas trefiladoras possuem motores e controles independentes e, no caso desta fábrica, sensores WEGscan100 (WEG S.A., 2025) acoplados em seus mancais (rolamentos). Os sensores são responsáveis por coletar dados dos motores, ou seja, vibração, nível de carga, consumo de energia e temperatura. Estes sensores são configuráveis e permitem a variação do intervalo de coleta entre 5 e 60 minutos.

O posicionamento do sensor é essencial. Nesta fábrica, ele está localizado no centro do motor, tendo como intuito a coleta mais precisa de dados. As especificações do sensor WEGScan100 indicam a possibilidade de instalação de até 3 sensores por motor. A medição de vibração, a título de exemplo, atinge a sua precisão máxima com a instalação do segundo sensor. Um exemplo de métrica coletada pelo sensor é o tempo de operação. Este dado simples permite a programação preventiva de paradas de manutenção para lubrificação dos mancais. A correta lubrificação prolonga a vida útil dos equipamentos e reduz o tempo de parada.

O esquema de processamento da informação de parte do processo de fabricação dos fios está descrito na Figura 4.

Figura 4. Fábrica de Fios Elétricos



Fonte: Dos autores (2025)

O fluxo de dados e processamento, inclusive as descrições dos dispositivos, foram inspirados na planta física da fábrica real. São eles:

**(i) Coleta de dados:** Sensores WEGscan100 coletam, periodicamente, dados de vibração e temperatura.

**(ii) Transferência dos dados:** Imediatamente após a coleta, os dados são enviados para um *gateway* (modelos X1000/X2000).

**(iii) Armazenamento temporário dos dados brutos:** Os dados dos sensores são repassados pelo *gateway* e chegam ao portal (*datacenter* interno ou *Cloud*) sem processamentos (brutos).

**(iv) Processamento dos dados:** No *datacenter* ou *cloud* os dados dos sensores são processados.

**(v) Armazenamento persistente e relatórios:** Após processados, os dados brutos são descartados e os dados processados são armazenados. Os sistemas de gerenciamento fazem uso destes dados para a geração e publicação de relatórios gerenciais.

Atualmente, os principais serviços disponíveis no portal referem-se às condições dos motores, facilitando a detecção de anomalias ou falhas. O tratamento dos dados ainda prevê filtragem de ruídos, análises estatísticas e aplicação de modelos de IA para caracterização de comportamentos.

## 5 METODOLOGIA E RESULTADOS

Esta seção descreve a metodologia experimental adotada para avaliar a arquitetura proposta com *Edge Cloud Computing* (ECC) e Inteligência Artificial (IA) em ambientes industriais. O modelo experimental buscou simular o fluxo de dados dos sensores industriais, desde a coleta até o processamento, passando por dispositivos de borda e ambiente em nuvem. Para garantir a reprodutibilidade e isolar variáveis externas, os testes foram realizados em ambiente controlado. A metodologia e os resultados compreendem o detalhamento do ambiente de teste, ferramentas utilizadas, plano de execução das cargas de trabalho e critérios para análise de desempenho, incluindo métricas de consumo computacional, tempo de resposta e comportamento dos modelos de IA em diferentes camadas do ECC.

### 5.1 Análise Experimental

O processamento da informação descrito na Seção 4 serve como base à análise experimental deste trabalho. Parte do ambiente físico do chão de fábrica foi reproduzido em laboratório com o intuito de aplicar testes sintéticos sem interferir no processo de fabricação. A análise experimental tem como foco fornecer subsídios para a definição em que camada da ECC cada fase ou modelo de IA deve estar na arquitetura proposta do sistema de monitoração da fábrica.

Portanto, três componentes da Figura 4 são reproduzidos: (i) o dispositivo da *edge*; (ii) a *cloud*; e (iii) execução de um modelo de IA. A simplificação do cenário visa garantir a reprodutibilidade dos testes e a precisão da análise.

A Fábrica de Fios Elétricos 4.0 enfatiza a aplicação de ações de baixa latência e eficiência operacional. Recentemente, tem explorado a IA sobre dados dos sensores WEGscan100 para processamento de dados em tempo real, buscando detectar padrões e tendências nos dados de vibração e temperatura dos motores. A dicotomia está na definição do dispositivo mais adequado para processamento dos dados, *Edge*, *Cloud*, redundante em ambos, ora na *Edge*, ora na *Cloud* ou, ainda, algumas etapas sempre na *Edge* e outras sempre na *Cloud*. Neste estudo, desconsiderou-se a possibilidade de uso da infraestrutura de alto desempenho (*datacenter*) instalada na empresa visto que a motivação é a investigação de ambientes ECC.

## 5.2 Ambiente de teste

O ambiente de teste implementado em laboratório foi constituído de: (i) dispositivo da *edge* instalado em um Raspberry Pi 4 Model B, com processador quad-core Cortex-A72 de 64 bits, 1.5GHz, 8GB de RAM, interfaces USB 3.0, conectividade via Wireless (2.4 GHz e 5.0 GHz), Gigabit Ethernet e Bluetooth 5.0; e (ii) Google cloud com conta gratuita, o qual disponibiliza um processador quad-core Intel Xeon de 3.0 GHz, uma GPU NVIDIA Tesla K80 com 12GB de memória e 12GB RAM.

O sistema operacional escolhido foi o Raspberry Pi OS Bullseye, uma distribuição Linux baseada no Debian 11. Além disso, foram utilizadas a biblioteca de IA Ultralytics na versão 8.0.0 e a base de dados pré-treinada YOLO da Ultralytics na versão 8.

Adicionalmente, foi instalado e configurado o banco de dados SQLite na versão 3.47.0 para armazenar os dados coletados pelos dispositivos IoT e as informações processadas pelos modelos de IA.

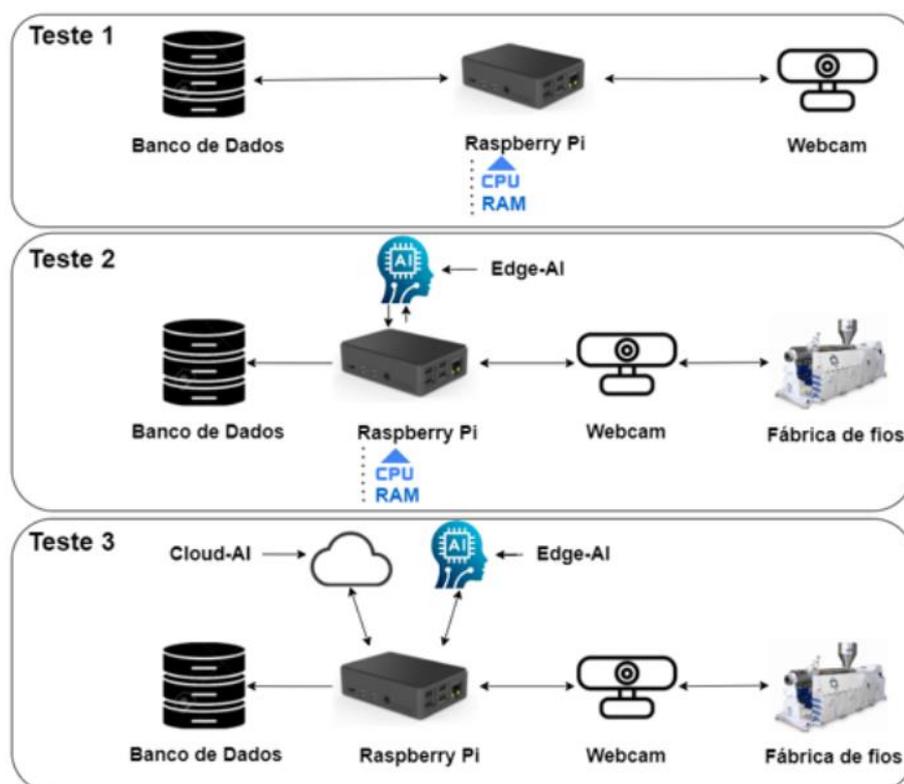
No Google CloudCloud, o sistema operacional foi o Ubuntu 20.04 LTS (Focal Fossa), a biblioteca de IA Ultralytics na versão 8.0.0 released e a base de dados pré-treinada da Ultralytics YOLO na versão 8.

Os modelos de IA desenvolvidos simulam a detecção de falhas no processo de trefilação. Cada novo conjunto de dados recebido é analisado e classificado pelo modelo de IA, que determina se o produto final está de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos. Caso sejam identificadas anomalias ou desvios em relação ao padrão esperado, o sistema gera alertas que auxiliam o suporte na tomada de decisões, seja ela, manutenção preventiva ou ajustes nas máquinas de trefilação.

### 5.3 Plano de teste

Um plano de teste foi elaborado para permitir a avaliação dos dispositivos de *edge* e *cloud* quanto à capacidade de processamento, de comunicação e de armazenamento. A aplicação escolhida foi o modelo de IA para treinamento e detecção de falhas em uma máquina hipotética de trefilação. As métricas selecionadas para a avaliação do dispositivo de *edge*, neste estudo, foram a taxa de utilização de CPU e a quantidade de memória RAM alocada. Aplicou-se, empiricamente, a carga de 385 transações, que compreendem operações de leitura, processamento e envio dos dados. O plano de testes foca em três principais tipos de uso do dispositivo, conforme pode ser observado na Figura 5. São eles:

Figura 5: Tipos de uso do dispositivo no plano de testes



Fonte: Dos autores (2025)

O primeiro tipo de uso se refere à capacidade do Raspberry Pi em suportar as cargas de comunicação e armazenamento de dados advindos dos dispositivos IoT. Para este teste, foram considerados o consumo de CPU e memória RAM, considerando uma rede local.

O segundo tipo de uso tem como objetivo avaliar a capacidade de processamento do Raspberry Pi como dispositivo em Edge-IA. Para este teste, foram considerados o consumo de CPU e memória RAM em dois cenários distintos: (i) detecção de padrões utilizando modelos de IA previamente treinados; e (ii) treinamento de novos modelos de IA.

O terceiro cenário de uso tem um enfoque comparativo entre o processamento em *Edge* e *Cloud* para as tarefas de detecção e treinamento de modelos de IA, levando em consideração a latência para a tomada de decisão. Para analisar as vantagens e desvantagens de utilizar *Edge* ou *Cloud* para tarefas de IA no ambiente de testes deste estudo, este cenário foca na medição do

tempo de processamento (em milissegundos) para tarefas de detecção e treinamento, explorando a latência na transmissão de dados.

## 5.4 Análise de resultados

A seção de análise de resultados tem como objetivo examinar o desempenho dos modelos de IA implantados tanto em dispositivos de *Edge* quanto em *Cloud*, em um cenário de Fábrica de Fios Elétricos 4.0. A análise abrange a eficiência de processamento e o consumo de recursos computacionais, com o intuito de comparar as capacidades dos dispositivos utilizados e avaliar a adequação de cada abordagem para diferentes necessidades operacionais.

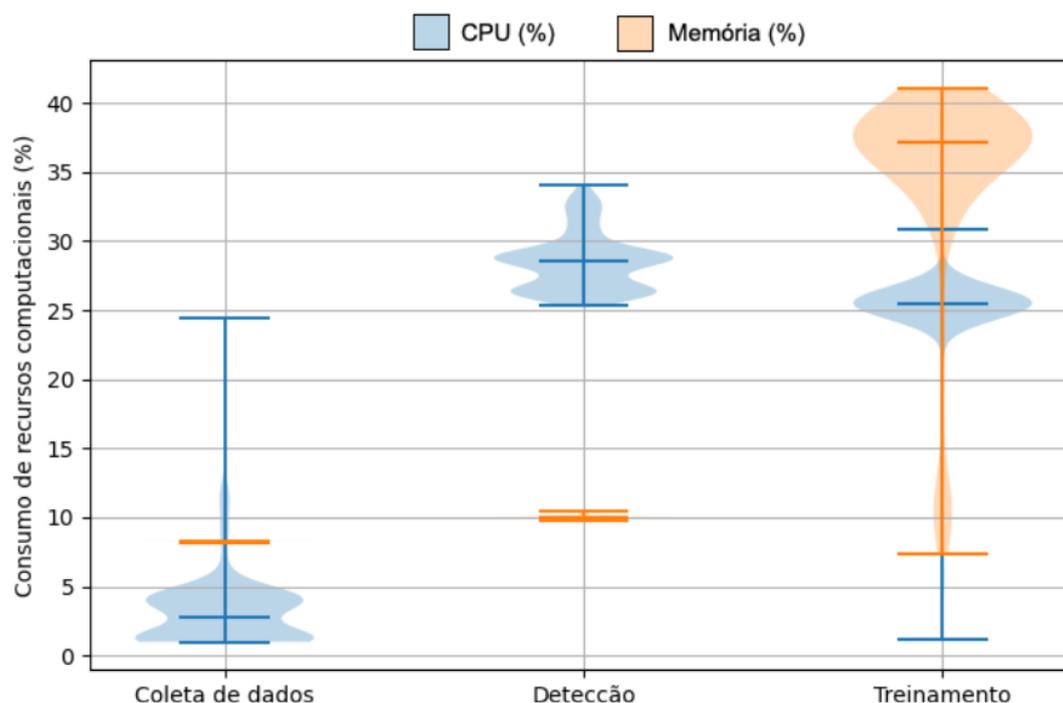
Os resultados subsidiam decisões estratégicas para alocação de modelos de IA em ECC aplicados a Fábricas de Fios Elétricos e infraestruturas de processamento de dados em ambientes industriais.

Em termos de comunicação e armazenamento (item 1 do plano de testes), o dispositivo não demonstrou instabilidade, tampouco falha no armazenamento dos dados. O uso de uma câmera com conexão USB permitiu a coleta dos dados, os quais foram armazenados no banco de dados relacional SQLite que também não apresentou gargalos. O uso médio de CPU para as tarefas de comunicação e armazenamento foi de 3,2%, enquanto o uso médio de memória foi de 8,2%.

A análise da capacidade de processamento como dispositivo em Edge-IA (item 2 do plano de testes) demonstrou que a capacidade de processamento do dispositivo em termos de CPU e memória foi satisfatória. Para as tarefas de detecção de falhas e treinamento, o uso médio de CPU foi, respectivamente, de 25,6% e de 26%. Em contrapartida, o uso médio de memória atingiu percentuais bem distintos, sendo 10,6% na detecção, e 39,3% no treinamento. A coleta de dados apresentou, na sua maioria, percentuais inferiores a 10%, embora seu máximo tenha sido próximo a 25%.

O Gráfico 1 apresenta o consumo médio de recursos computacionais nos três tipos de uso do dispositivo. A análise visual do gráfico completa a análise estatística, ressaltando a distribuição dos dados analisados.

Gráfico 1. Consumo de recursos na Edge



Fonte: Dos autores (2025)

Em relação ao estudo comparativo entre o processamento em *Edge* e *Cloud*, levando em consideração a latência para a tomada de decisão, foram observados resultados promissores em termos da comunicação e processamento das tarefas de detecção e treinamento. Inclui-se nesta análise o tempo de transmissão dos dados entre os dispositivos IoT e o dispositivo de processamento (Raspberry Pi ou Google Cloud). O tempo de detecção em *Edge* foi de 1.147ms, enquanto em *Cloud* foi de 1.995ms, destacando a eficiência da *Edge*. O custo para treinamento foi maior, o que já era esperado, atingindo, em *Edge*, o tempo médio de 47.187ms, e na *Cloud*, 8.909ms (5x vezes menor), destacando a eficiência da *Cloud*. A tarefa de treinamento atua no processamento de apenas uma época de uma rede neural profunda (*deep learning*). A Tabela 2 demonstra os resultados estatísticos estratificados dos testes.

Tabela 2. Tempos de processamento e comunicação na Edge e na Cloud

Estatísticas	Tipos de uso em Edge-AI			Tipos de uso em Cloud-AI		
	Detecção	Treinamento	Com.	Detecção	Treinamento	Com.
<b>Média</b>	1.147 ms	47.187 ms	10 ms	389 ms	7.303 ms	1.606 ms
<b>Mediana</b>	1.148 ms	46.660 ms	10 ms	350 ms	7.360 ms	1.592 ms
<b>Mínimo</b>	1.115 ms	42.340 ms	8 ms	329 ms	6.410 ms	1.355 ms
<b>Máximo</b>	1.203 ms	51.980 ms	13 ms	831 ms	7.980 ms	2.063 ms
<b>Desvio padrão</b>	9 ms	3.008 ms	1.48 ms	90 ms	427 ms	121 ms

Fonte: Dos autores (2025)

Desta forma, para este plano de teste realizado, o *Edge* se mostrou mais eficiente em tarefas de detecção utilizando modelos previamente treinados, enquanto a *Cloud* se mostrou mais eficiente em tarefas de treinamento de modelos, os quais exigem mais capacidade de processamento e elasticidade de recursos computacionais. Ressalta-se que a consideração do tempo de transmissão dos dados (comunicação) para a definição do provisionamento da tarefa é essencial em ECC aplicada a Fábrica de Fios Elétricos, estudo de caso deste trabalho.

Os resultados indicam que a *Edge* é mais adequada para tarefas de detecção em tempo real, devido à menor latência e proximidade dos dados. Por outro lado, a *Cloud* apresentou desempenho superior para tarefas de treinamento de modelos de IA, dada sua maior capacidade computacional. Além disso, o ambiente industrial, em especial a Fábrica de Fios Elétricos, é aderente aos conceitos de ECC e IA, e subsidiam decisões de projetos futuros na área.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A Indústria 4.0 está presente no parque industrial brasileiro e mundial. A automação industrial incorporou centenas de milhares de dispositivos de IoT, que monitoram e atuam de forma autônoma em parques fabris. O volume de dados coletados exige processamento de alto desempenho e algoritmos inteligentes para identificação de problemas, normalmente, com baixo tempo de resposta para a tomada de decisão.

O presente trabalho propôs uma arquitetura para um sistema de monitoramento para Fábricas de Fios Elétricos na Era 4.0, que envolve HPC, IA e aplica o modelo inovador de ECC na

Indústria 4.0. O ambiente de modelagem da arquitetura é uma Fábrica de Fios Elétricos real com parque instalado nos moldes da Indústria 4.0. Os experimentos foram aplicados em um ambiente controlado, reproduzido em laboratório, que simula as fases de interesse de investigação da Fábrica de Fios Elétricos real.

Testes foram analisados corroborando com as hipóteses da pesquisa que buscavam identificar os impactos do uso de HPC e ECC em cenários da Indústria 4.0 inteligente. O projeto de uma Fábrica de Fios Elétricos 4.0 eficiente deve contar com componentes de armazenamento e processamento em *edge* e *cloud*, sincronizados de forma a possibilitar serviços orquestrados adaptados a cada camada.

No pior caso, os tempos de processamento na *edge* chegaram a ser 6x mais lentos do que na *cloud*. Em contrapartida, o acesso aos dados é "instantâneo" na *edge* e, em alguns casos, levou até 1.606ms para chegar na *cloud*. Portanto, a escolha da camada e do dispositivo é essencial para a obtenção do melhor desempenho da aplicação.

A sinergia da ECC representa uma solução viável e eficaz para a Indústria 4.0, proporcionando maximização de eficiência e minimização de custos operacionais. A simulação foi feita em ambiente controlado de laboratório, o que pode não capturar todos os desafios do ambiente fabril real, como interferências externas e escalabilidade de rede. Além disso, a análise foi limitada a um único tipo de sensor e modelo de IA.

Como trabalhos futuros, o projeto visa expandir o protótipo de laboratório para o chão de fábrica. Uma vez que a arquitetura esteja implantada, modelos de IA nas camadas da ECC serão testados. A análise da correlação do comportamento dos dados e da tomada de decisão é o objetivo a médio prazo, possibilitando a aplicação dessas decisões no controle de qualidade, manutenção ou redução de custos.

## REFERÊNCIAS

ADDABBO, T. et al. An IoT framework for the pervasive monitoring of chemical emissions in industrial plants. In: **Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT**, 2018, p. 269-273.

ALLEN, L.; LU, H.; CORDINER, J. Knowledge-enhanced spatio-temporal analysis for anomaly detection in process manufacturing. **Computers in Industry**, v. 161, p. 1-+04111, 2024.

Belgoumri et al. 2024. Belgoumri, M. D., Bouadjenek, M. R., Aryal, S., and Hacid, H. (2024). **Data quality in edge machine learning: A state-of-the-art survey**. 2024.

CHANG, C.; SRIRAMA, S. N.; BUYYA, R. Internet of things (IoT) and new computing paradigms. In: ***Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms***, v. 6, p. 1–23, 2019.

HAO, T.; ZHAN, J.; HWANG, K.; GAO, W.; WEN, X. AI-oriented workload allocation for cloud-edge computing. In: **IEEE/ACM 21st International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid)**, 2021, p. 555-564.

HERGYS, R.; SEBASTIEN, L. Data collection and utilization framework for edge AI applications. In: **IEEE/ACM 1st Workshop on AI Engineering - Software Engineering for AI (WAIN)**, 2021, p. 105-108.

KHAN, W. Z.; AHMED, E.; HAKAK, S.; YAQOOB, I.; AHMED, A. Edge computing: a survey. ***Future Generation Computer Systems***, v. 97, p. 219–235, 2019.

KOCHER, A. et al. A research agenda for AI planning in the field of flexible production systems. In: **IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)**, 2022, p. 1-8. IEEE.

LI, S.; XU, L. D.; ZHAO, S. The internet of things: a survey. ***Information Systems Frontiers***, v. 17, p. 243–259, 2015.

PATEL, Deep; MAITI, Chayan; MUTHUSWAMY, Sreekumar. Real-Time Performance Monitoring of a CNC Milling Machine using ROS 2 and AWS IoT Towards Industry 4.0. In: **IEEE EUROCON 2023-20th International Conference on Smart Technologies**. IEEE, 2023. p. 776-781.

WEG S.A. *WEG - Soluções em equipamentos e sistemas para o mercado industrial*. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 15 jan. 2025.

WEN, Jinbo et al. Generative ai for low-carbon artificial intelligence of things with large language models. **IEEE Internet of Things Magazine**, v. 8, n. 1, p. 82-91, 2024.