



IX Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica
IX EnICT
ISSN: 2526-6772
IFSP – Campus Araraquara
6 de dezembro de 2025



INTEGRAÇÃO DE IOT, IA E GÊMEOS DIGITAIS PARA A ROBÓTICA AGRÍCOLA INTELIGENTE

ISABELLE MELO GARCIA FERREIRA¹, CLAYTON JOSÉ TORRES², FERNANDO HENRIQUE MORAIS DA ROCHA³, ARTUR VITÓRIO ANDRADE SANTOS⁴

¹ Graduanda em Engenharia Mecânica, IFSP Campus Araraquara, isabelle.garcia@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor em Sistemas de Controle, Engenharia Mecânica, Docente IFSP Campus Araraquara, clayton@ifsp.edu.br

³ Doutor em Sistemas Dinâmicos, Engenharia Elétrica, Docente IFSP Campus Araraquara, fernandoro Rocha@ifsp.edu.br

⁴ Doutorando em Engenharia Agrícola, Docente IFRO, Campus Porto Velho, artur.santos@ifro.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Robotização – 3.05.05.04-6

RESUMO: O panorama tecnológico contemporâneo é profundamente transformado pela convergência da Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Gêmeos Digitais (Digital Twins - DT). Este estudo visa informar e sumarizar os principais conceitos, modelos e aplicações dessas tecnologias, investigando o papel da IoT como geradora de dados de tempo real, a capacidade da IA em transformar esses dados em inteligência açãoável e a função dos Gêmeos Digitais como representações virtuais dinâmicas e preditivas de ativos físicos. Serão examinados as arquiteturas e os desafios de implementação, especialmente em ambientes complexos, como a robótica agrícola. A principal conclusão esperada é que a sinergia entre IoT, IA e DT é fundamental para a próxima fase da transformação digital, permitindo monitoramento de alta fidelidade, simulação preditiva e tomada de decisão automatizada.

PALAVRAS-CHAVE: Arquiteturas de IoT; Gêmeos Digitais; Inteligência Artificial; Manutenção preditiva; Robótica agrícola; Simulação virtual.

INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial é marcada pela intensa troca de dados e informações mediada por tecnologias emergentes. Neste cenário, a tríade composta pela Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Gêmeos Digitais (DT) estabelece uma infraestrutura fundamental para a digitalização e a inteligência em diversos setores, desde a manufatura até a agricultura. Dessa forma, a relevância desta tríade se encontra em sua capacidade de unir o mundo físico ao virtual, permitindo uma gestão de sistemas complexos com níveis de controle e previsão nunca alcançados.

Nesse contexto, o setor agrícola, busca cada vez mais a automação e a robótica para aumentar a eficiência e a qualidade, respondendo a desafios como a escassez de mão de obra e as variações ambientais. Plataformas robóticas móveis (RAM) utilizam múltiplos sensores e algoritmos de fusão de dados para navegação e controle, ilustrando um campo de aplicação direta para esta convergência tecnológica.

O presente artigo se propõe a apresentar o universo teórico e prático desses modelos tecnológicos. Nesse sentido, o problema central a ser investigado é a complexidade inerente à modelagem, integração e implementação dessas tecnologias em sistemas reais, bem como a necessidade de estabelecer uma estrutura conceitual clara para a sua utilização e desenvolvimento.

Os objetivos gerais deste estudo são: (1) posicionar o leitor no contexto da relevância da IoT, IA e DT; (2) definir e sumarizar os modelos e arquiteturas de cada tecnologia; (3) descrever a sinergia entre a IoT, a IA e os DTs, e (4) apresentar as aplicações mais expressivas em setores-chave, como a robótica agrícola e a manutenção de estruturas.

A justificativa para esta pesquisa reside na necessidade de consolidar o conhecimento sobre esses modelos que, embora promissores, ainda carecem de maior exploração em termos de implementação prática e padronização. A metodologia adotada consistirá em uma revisão bibliográfica aprofundada dos modelos, seguida de uma análise e discussão de casos de estudo e conceitos arquiteturais, visando fornecer uma base sólida para o avanço das pesquisas e a aplicação tecnológica.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Internet das Coisas (IoT) pode ser conceituada como uma rede de objetos físicos que incorporam sensores, software e outras tecnologias com o propósito de conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet. Em ambientes industriais e agrícolas, a IoT é o principal habilitador da digitalização, permitindo o monitoramento de ativos físicos em tempo real e em alta resolução espacial, sua capacidade em coletar dados massivos em tempo real é vital para a operação de sistemas complexos.

As arquiteturas da IoT são tipicamente divididas em camadas para gerenciar a complexidade do sistema. Um modelo comum inclui: (1) Camada de Percepção, responsável pela coleta de dados a partir do ambiente físico, utilizando diversos tipos de sensores (e.g., GPS, IMU, câmeras, sensores de temperatura, etc.); (2) Camada de Rede, garante a transmissão segura e eficiente dos dados dos dispositivos para as plataformas de processamento (e.g., usando protocolos como CAN, RS-232, ou TCP/IP); (3) Camada de Aplicação, onde os dados são processados para gerar serviços e valor para o usuário (e.g., monitoramento em tempo real, otimização de operações).

A Inteligência Artificial (IA), no contexto da IoT, é a tecnologia responsável por processar o grande volume de dados (Big Data) gerado pelos sensores, transformando-os em informações úteis e fornecendo capacidades de análise e tomada de decisão. Nesse sentido, a fusão da IA com a IoT resulta em sistemas mais inteligentes, com destaque para as seguintes funções a seguir:

TABELA 1. Funções Essenciais da Inteligência Artificial no Contexto de Sistemas Inteligentes.

Análise Preditiva e de Falhas	Algoritmos de Machine Learning (ML) podem analisar dados históricos e em tempo real para prever falhas de sistemas, como equipamentos agrícolas, permitindo a manutenção preventiva.
Melhoria da Percepção e Navegação	A visão computacional da IA, é fundamental para que robôs agrícolas identifiquem caminhos navegáveis, detectem e classifiquem obstáculos, e realizem a sua função de forma precisa.
Otimização de Processos	Modelos de IA podem ser usados para otimizar parâmetros de operação, como no caso da otimização de fertilização e irrigação.

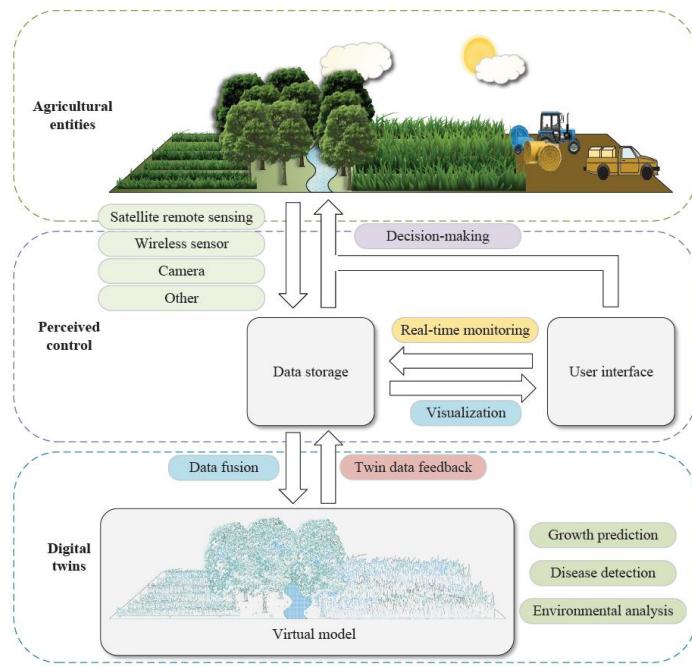
Fonte: NIE, J. et al (2022).

Os Gêmeos Digitais (DT) são representações virtuais dinâmicas e de alta fidelidade de um ativo, sistema ou processo físico. O conceito evoluiu de modelos virtuais estáticos para réplicas virtuais que se mantêm sincronizadas com o ambiente real ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

Um DT, em sua concepção mais aceita, requer três componentes essenciais: (1) Objeto Físico, ativo real que está sendo replicado (e.g., um robô agrícola, uma estrutura de construção, um sistema de produção); (2) Objeto Digital, modelo virtual, que deve ser multidimensional, multi-escala e probabilístico, contendo geometria, física, comportamento e regras; (3) Conexão, fluxo de dados e informações, idealmente bidirecional e automático, entre o objeto físico e o virtual, garantindo a sincronização em tempo real ou periódica.

O diagrama a seguir ilustra um sistema de agricultura inteligente dividido em três níveis essenciais. O nível superior, Entidades Agrícolas, representa o ambiente físico real incluindo culturas, paisagem e maquinário. Este é o mundo onde as ações e as coletas de dados ocorrem. O nível central, Controle Percebido, foca na gestão da informação. O nível inferior, Gêmeos Digitais, é o modelo virtual preditivo, utilizando a fusão dos dados armazenados para criar uma representação digital detalhada.

FIGURA 1. Diagrama esquemático típico de sistema gêmeo digital agrícola.



Fonte: NIE, J. et al (2022).

Os DTs proporcionam serviços cruciais como simulação de cenários "e se" (what-if scenarios), monitoramento de saúde do sistema, previsão de desempenho e suporte à decisão. Desse modo, existem classificações que distinguem o nível de sincronização e fluxo de dados, sendo o Gêmeo Digital caracterizado pela comunicação bidirecional e automática, permitindo que o modelo virtual interfira no objeto físico. Sua plena realização e aplicação depende intrinsecamente da combinação das capacidades da IoT e da IA formando um ecossistema sinérgico de dados.

Essa sinergia cria um ciclo de retroalimentação: a IoT coleta, a IA aprende e prediz, e o DT simula, otimiza e aplica o controle, tornando todo o sistema mais robusto, adaptável e eficiente.

TABELA 2. Funções Interconectadas da IoT, IA e Gêmeos Digitais (DT).

IoT como Fonte de Dados Essencial	Os sensores da IoT fornecem o fluxo contínuo e massivo de dados em tempo real que são injetados no DT para manter sua fidelidade ao ativo físico. Sem esses dados, o modelo virtual perde sua capacidade de refletir o estado atual do objeto real.
IA como Motor de Inteligência e Predição	A IA processa e analisa os dados coletados pela IoT, extraíndo padrões que seriam inviáveis para a análise humana. Essa inteligência permite que o DT analise o estado atual, e também preveja o comportamento futuro e proponha optimizações.
DT como Plataforma de Integração e Serviço	O Gêmeo Digital atua como uma plataforma centralizada e contextualizada, onde a informação bruta da IoT e a inteligência da IA são consolidadas em um modelo visual e interativo.

Fonte: PYLIANIDIS. et al N (2021).

Edição 2023 ISSN: 2526-6772

METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo é baseada na Revisão Sistemática de Literatura (SLR) e na Análise de Casos de Estudo (CS), seguindo as diretrizes de pesquisa acadêmica para garantir a fidelidade das fontes e a clareza das informações. Nesse contexto, a pesquisa bibliográfica foi focada em artigos e documentos técnicos que abordam as estruturas, a fusão de dados e as aplicações de IoT, IA e DTs. As áreas de interesse primárias foram Robótica Agrícola Móvel (RAM), Agricultura Inteligente (Smart Agriculture) e Inspeção e Manutenção de Estruturas (Structural Inspection and Maintenance).

TABELA 3. Elementos-Chave Extraídos na Etapa de Análise Documental.

Modelos de Arquitetura de IoT	Foco na estrutura de camadas (percepção, rede, aplicação).
Algoritmos de IA	Identificação de técnicas de Machine Learning e Swarm Intelligence (e.g., EKF, Filtro Complementar, ACO) aplicadas ao processamento e fusão de dados sensoriais e otimização de rotas.
Estruturas de Gêmeos Digitais	Distinção entre Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital e seus componentes essenciais (Geometria, Física, Comportamento, Regras/Restrições).
Mecanismos de Sinergia	Como a fusão de dados (IoT) e a inteligência (IA) sustentam a precisão e a funcionalidade preditiva dos DTs.

Fonte: Fonte: NIE, J. et al (2022).

A aplicabilidade prática dos modelos foi avaliada por meio da análise de cenários reais e protótipos em dois domínios principais: na Robótica Agrícola (RAM), focando no estudo de sistemas de Controle e Supervisão (middleware) que utilizam a fusão de dados sensoriais (como IMU, GPS e Visão Computacional) para garantir a navegação e a segurança operacional; e na Manutenção de Estruturas, examinando propostas de Gêmeos Digitais (DT) projetadas para otimizar a inspeção e manutenção através do uso de tecnologias de coleta de dados como laser scanning e sensores.

O Filtro de Kalman Estendido (EKF) é empregado para a fusão de dados do acelerômetro e do giroscópio, estimando os ângulos de Euler (Roll, Pitch e Yaw) para a orientação do robô, modelagem é essencial para a precisão da navegação autônoma. A equação de previsão de estado para um sistema não linear é:

$$\hat{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k) + w_k \quad (1)$$

onde,

\hat{x}_{k+1} – estimativa do vetor de estado no tempo $k + 1$

$f(\hat{x}_k)$ – função de transição não linear (utilizando velocidades angulares ω e ângulos de Euler ϕ, θ, ψ)

w_k – representa o ruído do processo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da revisão demonstram que a convergência de IoT, IA e DT não é apenas teórica, mas se manifesta em modelos funcionais com aplicações significativas, apresentadas a seguir:

O conceito de DTs avançou de simples modelos de representação para a criação de sistemas complexos, multiescala e multi-cenário. Nesse contexto, a arquitetura 4C (Composição, Contexto, Componente, Código) proposta para DTs complexos evidencia essa necessidade de modularidade e reuso de componentes.

Embora o conceito de DTs na agricultura seja recente (primeiras referências em 2017), algumas aplicações, especialmente em logística e maquinário, já atingiram o nível de implementação (deployed).

Contudo, a maioria dos projetos, particularmente aqueles envolvendo sistemas vivos (plantas e animais), ainda se encontram em estágios conceituais ou de protótipo, devido à complexidade da modelagem biológica e aos custos elevados.

O desenvolvimento de um Sistema de Controle e Supervisão (middleware), como demonstrado na plataforma RAM, valida a aplicabilidade da fusão sensorial na condução autônoma. O uso do Filtro de Kalman Estendido (EKF) em cascata com o Filtro Complementar (FC) melhora a estimativa dos ângulos de Euler e do deslocamento angular (Yaw), fornecendo dados de alta confiança para a camada de tomada de decisão, o que é crucial em ambientes não estruturados.

A discussão central reside na tradução dos modelos conceituais de alta fidelidade para a realidade operacional. Enquanto o DT ideal exige fidelidade máxima (fidelity) e sincronização bidirecional e automática (digital twin), a realidade da agricultura, com seus sistemas vivos e ambientes variáveis, muitas vezes se restringe a uma Sombra Digital (digital shadow). O fluxo de dados da IoT é automático (sensores) e a IA gera as previsões, mas o controle da "parte física" (plantas, animais) ainda exige intervenção humana em muitas etapas.

Nesse sentido, a introdução de DTs acarreta altos custos de investimento e de requalificação de pessoal. O estudo sugere que a implementação inicial deve ser priorizada em ativos críticos ou em situações de alto retorno, como a otimização de grandes frotas de maquinário agrícola, onde a justificativa econômica é mais evidente

A IA não apenas processa, mas também aprimora a qualidade dos dados. A fusão sensorial, como a observada nos experimentos do RAM, demonstra que a combinação de diferentes fontes de dados (e.g., IMU, GPS, Odometria, Visão) por meio de algoritmos avançados (EKF, FC) é essencial para superar as limitações de sensores individuais e atingir o nível de precisão exigido por um DT funcional. Isso cria um ciclo de retroalimentação virtuoso, onde a IA viabiliza a confiabilidade do DT.

Os resultados apontam para uma conclusão fundamental: a transição de um simples modelo digital para um DT complexo e funcional em ambientes não estruturados exige uma arquitetura modular que não dependa de um único sensor ou algoritmo (a modularidade é chave).

CONCLUSÕES

O desenvolvimento de uma arquitetura de controle e supervisão baseada na fusão de dados sensoriais para a robótica agrícola e a aplicação do conceito de Gêmeos Digitais para a manutenção de estruturas confirmam o papel central da tríade tecnológica IoT, IA e DT na evolução da engenharia e da produção.

Os objetivos propostos foram integralmente alcançados: o estudo definiu os conceitos e delineou as arquiteturas fundamentais da IoT (baseada em camadas), da IA (focada em processamento e otimização de dados) e dos Gêmeos Digitais (estruturados em partes física, virtual e conexões).

Adicionalmente, foi confirmada a sinergia essencial entre essas tecnologias, na qual a IoT atua como a fonte de dados, a IA fornece a inteligência preditiva, e o Gêmeo Digital integra e contextualiza ambos em um modelo de serviço dinâmico.

A análise dos modelos de fusão sensorial, como o uso do Filtro de Kalman Estendido (EKF) e do Filtro Complementar (FC) em cascata, demonstrou ser um mecanismo robusto para conferir confiabilidade aos dados de orientação e deslocamento angular de plataformas robóticas. Este achado é crucial, pois a confiabilidade dos dados da "vida real" é o que permite ao DT manter sua fidelidade. A demonstração de que a precisão melhora significativamente ao se integrar fontes de dados independentes (e.g., IMU, GPS, e até um aplicativo de smartphone) sublinha a importância de uma arquitetura multissensorial.

A principal limitação atual reside na implementação do controle bidirecional e na escalabilidade dos modelos de Gêmeos Digitais (DT) em ambientes vastos com sistemas vivos. Trabalhos futuros devem, portanto, concentrar-se no desenvolvimento de padrões de interoperabilidade para criar um modelo de padronização industrial análogo ao BIM para DTs, facilitando a fusão de modelos de diferentes fornecedores como IA e sensores. Além disso, é necessário um avanço significativo na modelagem preditiva de sistemas vivos, como plantas e animais, superando a complexidade biológica que hoje restringe o DT agrícola ao estágio de protótipo. Por fim, estudos de caso práticos e detalhados de custo-benefício são essenciais para quantificar o Retorno sobre o Investimento (ROI) dos DTs em ativos não-críticos, fornecendo assim a justificativa econômica para a adoção em larga escala.

Em síntese, a arquitetura de Sistema de Controle e Supervisão (Middleware) proposta é um passo fundamental para o desenvolvimento de DTs independentes de plataforma, pavimentando o caminho para a plena automação e inteligência em ambientes complexos.

REFERÊNCIAS

- JIA, W. et al. From simple digital twin to complex digital twin Part I: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin. *Advanced Engineering Informatics*, v. 53, p. 101706, 2022.
- JIANG, F. et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*, v. 130, p. 103838, 2021.
- KRITZINGER, W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018.
- LUPATSKII, V. A. et al. Digital twins as a tool for systemic integration of innovative digital technologies in agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1069, n. 1, p. 012042, 2022.
- MENEGON, J.; ISATTO, E. L. Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance. *Gestão & Produção*, v. 30, e4922, 2023.
- NIE, J. et al. Artificial intelligence and digital twins in sustainable agriculture and forestry: a survey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 46, n. 5, p. 642-661, 2022.
- PYLIANIDIS, C.; OSINGA, S.; ATHANASIADIS, I. N. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 184, p. 105942, 2021.
- TAO, F.; ZHANG, M. Digital Twin Shop-Floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, v. 5, p. 20418-20427, 2017.
- TORRES, C. J. Sistema de Controle e Supervisão para Robô Agrícola Móvel Baseado em Fusão de Dados Sensoriais. 2018. 194 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.