



SISTEMAS ADAPTATIVOS DE INSTRUÇÃO DE TRABALHO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS CIBER-FÍSICOS: INTEGRAÇÃO ENTRE DADOS DO SISTEMA FÍSICO, LÓGICA DE DECISÃO E EXECUÇÃO HUMANA

ADAPTIVE WORK INSTRUCTION SYSTEMS IN CYBER-PHYSICAL INDUSTRIAL ENVIRONMENTS: INTEGRATION BETWEEN PHYSICAL SYSTEM DATA, DECISION LOGIC, AND HUMAN EXECUTION

SISTEMAS DE INSTRUCCIÓN DE TRABAJO ADAPTATIVOS EN ENTORNOS INDUSTRIALES CIBERFÍSICOS: INTEGRACIÓN ENTRE DATOS DEL SISTEMA FÍSICO, LÓGICA DE DECISIÓN Y EJECUCIÓN HUMANA



<https://doi.org/10.56238/leved.esp.v12n30-003>

Data de submissão: 08/01/2022

Data de publicação: 08/02/2022

Carolina Lago Pena Maia

RESUMO

Este artigo aborda os Sistemas Adaptativos de Instrução de Trabalho em ambientes industriais ciber-físicos, com foco na integração entre dados do sistema físico, lógica de decisão e execução humana. O objetivo foi analisar, sob uma perspectiva conceitual, como as instruções de trabalho podem ser reposicionadas como componentes técnicos ativos dos sistemas industriais contemporâneos. A metodologia adotada consistiu em uma pesquisa qualitativa de natureza conceitual, fundamentada na análise sistemática de artigos científicos recentes relacionados a sistemas ciber-físicos, realidade aumentada, interfaces homem-máquina e sistemas de assistência ao operador. Os resultados indicam que arquiteturas adaptativas de instrução, baseadas em estados de máquina, eventos operacionais e contexto em tempo real, favorecem maior alinhamento entre orientação e situação operacional, contribuindo para maior consistência da execução. Conclui-se que a integração das instruções de trabalho ao funcionamento dos sistemas ciber-físicos amplia o suporte à execução humana e oferece subsídios relevantes para o projeto de sistemas industriais orientados ao operador.

Palavras-chave: Sistemas Ciber-Físicos. Instruções de Trabalho. Sistemas Adaptativos. Execução Humana. Industry 4.0.

ABSTRACT

This article addresses Adaptive Work Instruction Systems in cyber-physical industrial environments, focusing on the integration between physical system data, decision logic, and human execution. The objective was to conceptually analyze how work instructions can be repositioned as active technical components of contemporary industrial systems. The methodology consisted of a qualitative, conceptual study based on a systematic analysis of recent scientific articles related to cyber-physical systems, augmented reality, human-machine interfaces, and operator assistance systems. The results indicate that adaptive instruction architectures, based on machine states, operational events, and real-time context, promote greater alignment between guidance and operational conditions, contributing to improved execution consistency. It is concluded that integrating work instructions into the functioning of cyber-physical systems enhances support for human execution and provides relevant contributions to the design of operator-oriented industrial systems.

Keywords: Cyber-Physical Systems. Work Instructions. Adaptive Systems. Human Execution. Industry 4.0.

RESUMEN

Este artículo aborda los Sistemas Adaptativos de Instrucciones de Trabajo en entornos industriales ciberfísicos, centrándose en la integración entre los datos del sistema físico, la lógica de decisión y la ejecución humana. El objetivo fue analizar, desde una perspectiva conceptual, cómo las instrucciones de trabajo pueden reposicionarse como componentes técnicos activos de los sistemas industriales contemporáneos. La metodología adoptada consistió en una investigación cualitativa de carácter conceptual, basada en el análisis sistemático de artículos científicos recientes relacionados con sistemas ciberfísicos, realidad aumentada, interfaces hombre-máquina y sistemas de asistencia al operador. Los resultados indican que las arquitecturas de instrucción adaptativas, basadas en estados de máquina, eventos operativos y contexto en tiempo real, favorecen una mayor alineación entre la instrucción y la situación operativa, contribuyendo a una mayor consistencia en la ejecución. Se concluye que la integración de instrucciones de trabajo en la operación de sistemas ciberfísicos amplía el soporte para la ejecución humana y ofrece ventajas relevantes para el diseño de sistemas industriales orientados al operador.

Palabras clave: Sistemas Ciberfísicos. Instrucciones de Trabajo. Sistemas Adaptativos. Ejecución Humana. Industry 4.0.

1 INTRODUÇÃO

As transformações recentes na indústria têm sido marcadas pela crescente digitalização dos sistemas produtivos, pela integração entre camadas físicas e computacionais e pela incorporação de tecnologias capazes de monitorar e responder dinamicamente ao estado dos processos em tempo real, configurando o avanço dos sistemas ciber-físicos no ambiente industrial (Wolfartsberger, 2019). Nesse contexto, a indústria passa a operar como um ecossistema conectado, no qual sensores, máquinas, sistemas de controle e interfaces digitais se articulam de forma contínua, alterando profundamente a lógica tradicional de planejamento, execução e controle das operações produtivas (Kurdve *et al.*, 2018).

A consolidação desses sistemas ciber-físicos intensifica a automação e amplia o uso de inteligência computacional, porém mantém a execução humana como elemento estruturante da operação, especialmente em atividades de montagem, manutenção e tomada de decisão local (Danielsson *et al.*, 2018). Mesmo em ambientes altamente automatizados, o operador permanece responsável por interpretar situações não previstas, lidar com variabilidade de contexto e interagir com sistemas complexos, o que reforça sua centralidade no funcionamento efetivo das plantas industriais contemporâneas (Mark *et al.*, 2021).

A presença humana nesses ambientes exige mecanismos de suporte cognitivo que acompanhem a complexidade técnica dos sistemas, uma vez que a simples automação de tarefas não elimina a necessidade de orientação clara, contextualizada e adaptável durante a execução do trabalho (Tsutsumi *et al.*, 2020). Dessa forma, a relação entre operador e sistema deixa de ser meramente reativa e passa a demandar interfaces que favoreçam a compreensão do estado do processo, das ações esperadas e das consequências operacionais associadas a cada decisão tomada em campo (Pimminger *et al.*, 2021).

Apesar desse cenário, grande parte das indústrias ainda se apoia em instruções operacionais estáticas, frequentemente estruturadas em procedimentos operacionais padrão que descrevem sequências fixas de atividades, desconsiderando variações de contexto e condições reais de operação (Corso e Cecconello, 2019). Esse modelo de instrução, baseado em documentos impressos ou manuais digitais genéricos, tende a apresentar baixa capacidade de adaptação, dificultando a interpretação adequada das tarefas quando ocorrem desvios, falhas ou mudanças no estado do sistema físico (Lampen *et al.*, 2019).

A limitação das instruções tradicionais torna-se mais evidente à medida que os sistemas produtivos incorporam maior diversidade de produtos, ciclos mais curtos e maior dependência de dados em tempo real, ampliando a distância entre o que está documentado e o que efetivamente ocorre no chão de fábrica (Gattullo *et al.*, 2020). Essa desconexão compromete a eficiência da execução humana, pois o operador passa a depender excessivamente de experiência prévia ou de suporte informal para

lidar com situações que não estão explicitamente previstas nas instruções disponíveis (Pimminger *et al.*, 2021).

Além disso, os dados gerados pelo sistema físico, como estados de máquina, eventos de processo e registros de falha, raramente são utilizados como insumos diretos para orientar o operador durante a execução das tarefas, permanecendo restritos a sistemas de monitoramento ou análise posterior (Mourtzis *et al.*, 2020). A ausência de integração entre essas informações e os mecanismos de instrução limita o potencial dos sistemas ciber-físicos, uma vez que a orientação ao operador não acompanha dinamicamente as condições reais da operação (Kästner *et al.*, 2020).

Essa lacuna contribui para a ampliação da variabilidade operacional, pois diferentes operadores tendem a adotar estratégias distintas diante da mesma situação, aumentando a probabilidade de inconsistências, retrabalho e erros de execução (Danielsson *et al.*, 2018). Em muitos casos, a estabilidade do processo passa a depender fortemente de especialistas experientes, criando assimetrias de conhecimento e fragilidade organizacional quando esse suporte não está disponível (Tsutsumi *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, torna-se relevante repensar as instruções de trabalho como componentes técnicos ativos do sistema ciber-físico, capazes de reagir ao estado do processo, incorporar dados em tempo real e apoiar a execução humana de forma adaptativa (Gattullo *et al.*, 2020). Abordagens baseadas em realidade aumentada, inteligência artificial e gestão contextual da informação têm demonstrado potencial para transformar a instrução operacional em um elemento dinâmico, alinhado às condições específicas de cada situação de trabalho (Wolfartsberger, 2019).

Este artigo tem como objetivo propor e discutir uma arquitetura conceitual de Sistemas Adaptativos de Instrução de Trabalho integrados a ambientes industriais ciber- físicos, considerando a articulação entre dados do sistema físico, camada de decisão e interface humana. Para isso, o trabalho está organizado em uma revisão da literatura sobre sistemas ciber-físicos, execução humana e instruções digitais, seguida da apresentação da metodologia adotada, da discussão dos resultados conceituais e das considerações finais sobre implicações para projetos industriais e pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS E *INDUSTRY 4.0* NO CONTEXTO INDUSTRIAL

Os sistemas ciber-físicos emergem no contexto industrial como arquiteturas capazes de integrar processos físicos e computacionais por meio de comunicação contínua, permitindo que o estado das operações seja monitorado, interpretado e influenciado em tempo real (Wolfartsberger, 2019). Essa abordagem redefine a organização dos sistemas produtivos ao estabelecer uma ligação direta entre sensores, atuadores, sistemas de controle e camadas de decisão distribuídas ao longo da planta industrial (Kurdve *et al.*, 2018).

No âmbito da *Industry 4.0*, os sistemas ciber-físicos constituem a base tecnológica para a digitalização avançada da manufatura, promovendo maior conectividade, rastreabilidade e adaptação das operações produtivas (Lampen *et al.*, 2019). A incorporação desses sistemas possibilita que eventos físicos sejam continuamente traduzidos em informações digitais, criando um fluxo de dados que sustenta decisões operacionais mais alinhadas às condições reais do processo (Gattullo *et al.*, 2020).

A evolução dos sistemas ciber-físicos está diretamente associada à ampliação da capacidade de processamento local e distribuído, permitindo respostas rápidas a variações de processo sem depender exclusivamente de intervenções externas (Mourtzis *et al.*, 2020). Essa característica favorece a construção de sistemas industriais capazes de ajustar seu comportamento operacional de acordo com estados de máquina, parâmetros ambientais e sequências de produção em curso (Kästner *et al.*, 2020).

A adoção de sistemas ciber-físicos também influencia a forma como o conhecimento operacional é estruturado e aplicado, uma vez que decisões anteriormente baseadas em experiência tácita passam a ser apoiadas por dados continuamente atualizados (Tsutsumi *et al.*, 2020). Nesse cenário, o ambiente industrial assume uma configuração dinâmica, na qual o funcionamento do sistema depende da interação constante entre elementos físicos, digitais e humanos (Danielsson *et al.*, 2018).

Ao viabilizar a integração entre monitoramento, análise e ação, os sistemas ciber-físicos ampliam a capacidade de coordenação entre diferentes níveis da operação industrial, reduzindo a fragmentação entre planejamento e execução (Pimminger *et al.*, 2021). Essa integração contribui para uma visão sistêmica da produção, na qual a tomada de decisão passa a considerar simultaneamente dados históricos, estados atuais e projeções de comportamento do sistema (Wolfartsberger, 2019).

2.2 INTEGRAÇÃO ENTRE SISTEMAS FÍSICOS, COMPUTACIONAIS E HUMANOS

A integração entre sistemas físicos, computacionais e humanos representa uma característica central dos ambientes industriais contemporâneos, nos quais a automação convive com atividades que demandam julgamento humano e adaptação situacional (Danielsson *et al.*, 2018). Essa integração exige mecanismos que permitam ao operador compreender o funcionamento do sistema e interagir com ele de forma informada durante a execução das tarefas (Mark *et al.*, 2021).

Mesmo com o avanço das tecnologias digitais, a execução humana permanece fortemente associada à interpretação de informações contextuais, à resolução de situações imprevistas e à coordenação entre diferentes etapas do processo produtivo (Tsutsumi *et al.*, 2020). A ausência de interfaces adequadas pode comprometer essa integração, pois o operador tende a receber informações fragmentadas ou desalinhadas com o estado real do sistema físico (Lampen *et al.*, 2019).

Sistemas industriais que integram efetivamente componentes humanos e computacionais tendem a apresentar maior consistência operacional, uma vez que a execução passa a ser orientada por informações atualizadas e contextualizadas (Pimminger *et al.*, 2021). Essa integração favorece a redução de interpretações subjetivas durante a operação, promovendo maior uniformidade na realização das tarefas ao longo do tempo (Kurdve *et al.*, 2018).

A literatura aponta que interfaces homem-máquina mais avançadas contribuem para a mediação entre complexidade técnica e capacidade cognitiva do operador, facilitando a compreensão de estados de máquina e sequências de ação (Gattullo *et al.*, 2020). Tecnologias como realidade aumentada e sistemas de assistência digital ampliam essa mediação ao sobrepor informações diretamente no contexto físico de trabalho (Corso e Cecconello, 2019).

A integração entre os domínios físico, computacional e humano também depende da capacidade do sistema de adaptar o conteúdo informacional de acordo com o nível de experiência do operador e a situação operacional vigente (Tsutsumi *et al.*, 2020). Essa adaptação favorece uma interação mais fluida, na qual o operador deixa de atuar como mero executor de instruções fixas e passa a integrar ativamente o funcionamento do sistema (Wolfartsberger, 2019).

Quando essa integração não é adequadamente projetada, surgem lacunas entre o comportamento esperado pelo sistema e as ações efetivamente realizadas pelos operadores, comprometendo a estabilidade operacional (Danielsson *et al.*, 2018). Por esse motivo, a engenharia de sistemas tem direcionado atenção crescente ao projeto de arquiteturas que incorporem a execução humana como parte integrante do sistema ciber- físico (Mourtzis *et al.*, 2020).

2.3 INSTRUÇÕES DE TRABALHO TRADICIONAIS E SEUS LIMITES OPERACIONAIS

As instruções de trabalho tradicionais são geralmente estruturadas como documentos estáticos que descrevem sequências padronizadas de ações, assumindo condições ideais de operação e baixa variabilidade de contexto (Corso e Cecconello, 2019). Esse formato tende a apresentar limitações quando aplicado a ambientes industriais dinâmicos, nos quais estados de máquina e eventos inesperados ocorrem com frequência (Lampen *et al.*, 2019).

A rigidez dessas instruções dificulta sua aplicação em situações que exigem adaptação imediata, levando operadores a recorrerem à experiência prévia ou a orientações informais para dar continuidade às atividades (Pimminger *et al.*, 2021). Esse comportamento contribui para a heterogeneidade da execução, uma vez que diferentes operadores interpretam e aplicam as instruções de maneiras distintas (Danielsson *et al.*, 2018).

Outro aspecto recorrente na literatura refere-se à desconexão entre as instruções documentadas e os dados efetivamente gerados pelo sistema físico durante a operação (Gattullo *et al.*, 2020). Mesmo

quando sistemas de monitoramento estão disponíveis, as informações produzidas raramente são incorporadas diretamente às instruções fornecidas aos operadores (Mourtzis *et al.*, 2020).

A ausência dessa integração reduz a capacidade das instruções tradicionais de apoiar a tomada de decisão em tempo real, especialmente em situações que envolvem falhas, desvios ou condições operacionais atípicas (Kästner *et al.*, 2020). Como consequência, o operador assume maior carga cognitiva ao precisar interpretar dados dispersos e traduzi-los em ações corretivas (Tsutsumi *et al.*, 2020).

Estudos indicam que a manutenção de instruções estáticas em ambientes industriais avançados pode ampliar a dependência de especialistas experientes, concentrando conhecimento operacional em indivíduos específicos (Mark *et al.*, 2021). Essa dependência tende a fragilizar a organização, sobretudo em contextos de rotatividade de pessoal ou expansão da capacidade produtiva (Wolfartsberger, 2019).

Diante dessas limitações, a literatura tem apontado para a necessidade de reconfigurar as instruções de trabalho como elementos dinâmicos, integrados ao sistema ciber-físico e sensíveis ao estado do processo (Gattullo *et al.*, 2020). Abordagens baseadas em sistemas digitais de assistência e instruções adaptativas indicam caminhos para alinhar orientação operacional, dados em tempo real e execução humana de forma mais consistente (Tsutsumi *et al.*, 2020).

2.4 VARIABILIDADE DE PROCESSOS E IMPACTO NA EXECUÇÃO HUMANA

A variabilidade de processos é uma característica recorrente em ambientes industriais contemporâneos, resultante de diferenças em materiais, condições de máquina, sequências produtivas e intervenções humanas ao longo da operação (Danielsson *et al.*, 2018). Essa variabilidade interfere diretamente na execução humana, uma vez que o operador precisa interpretar sinais do sistema e adaptar suas ações diante de situações que fogem do comportamento nominal previsto (Pimminger *et al.*, 2021).

Quando os sistemas produtivos apresentam elevado grau de variabilidade, a execução das tarefas tende a depender fortemente da capacidade do operador de reconhecer padrões e antecipar consequências operacionais (Tsutsumi *et al.*, 2020). Essa dependência aumenta a carga cognitiva durante a operação, sobretudo quando as informações disponíveis não refletem com precisão o estado atual do processo físico (Lampen *et al.*, 2019).

A literatura indica que a ausência de mecanismos estruturados para lidar com variabilidade contribui para inconsistências na execução, uma vez que diferentes operadores podem adotar estratégias distintas para responder à mesma condição operacional (Mark *et al.*, 2021). Esse comportamento gera dispersão nos resultados do processo, dificultando a previsibilidade e a repetibilidade das operações industriais (Kurdve *et al.*, 2018).

Sistemas ciber-físicos oferecem meios para mitigar os efeitos da variabilidade ao possibilitar a identificação de estados de máquina e eventos relevantes durante a execução das tarefas (Mourtzis *et al.*, 2020). Quando essas informações são integradas às orientações fornecidas ao operador, torna-se possível alinhar a execução humana às condições específicas do processo em tempo real (Kästner *et al.*, 2020).

A gestão adequada da variabilidade exige que o conhecimento operacional seja continuamente atualizado e distribuído de forma acessível aos operadores no momento da execução (Gattullo *et al.*, 2020). Essa abordagem contribui para reduzir a dependência de interpretações subjetivas, promovendo maior consistência entre diferentes turnos e perfis de operadores (Wolfartsberger, 2019).

2.5 INTERFACES HOMEM-MÁQUINA E SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

As interfaces homem-máquina constituem o principal canal de comunicação entre o operador e os sistemas industriais, influenciando diretamente a forma como informações são percebidas, interpretadas e utilizadas durante a execução das tarefas (Wolfartsberger, 2019). A qualidade dessa interface interfere na capacidade do operador de compreender o estado do sistema e selecionar ações coerentes com a situação operacional vigente (Danielsson *et al.*, 2018).

Interfaces tradicionais, baseadas em telas estáticas ou painéis genéricos, frequentemente apresentam limitações na representação de informações complexas e dinâmicas provenientes do sistema físico (Lampen *et al.*, 2019). Essa limitação pode levar à fragmentação da informação, exigindo que o operador realize esforços adicionais para integrar dados de diferentes fontes durante a tomada de decisão (Pimminger *et al.*, 2021).

A literatura aponta que interfaces mais avançadas favorecem a contextualização das informações, permitindo que dados relevantes sejam apresentados de acordo com a tarefa em execução e o estado atual do processo (Gattullo *et al.*, 2020). Esse suporte reduz a necessidade de consultas externas e contribui para decisões mais alinhadas às condições reais de operação (Tsutsumi *et al.*, 2020).

O suporte à tomada de decisão torna-se mais efetivo quando a interface incorpora mecanismos adaptativos capazes de ajustar o nível de detalhe das informações apresentadas ao operador (Mourtzis *et al.*, 2020). Essa adaptação favorece a interação contínua entre operador e sistema, mantendo a fluidez da execução mesmo em situações de maior complexidade operacional (Mark *et al.*, 2021).

Interfaces que integram dados históricos, estados atuais e orientações operacionais tendem a ampliar a confiança do operador nas informações fornecidas pelo sistema (Kurdve *et al.*, 2018). Essa confiança contribui para maior aderência às orientações apresentadas, reduzindo desvios na execução e fortalecendo a consistência operacional (Wolfartsberger, 2019).

2.6 INSTRUÇÕES VISUAIS E REALIDADE AUMENTADA NO DESEMPENHO OPERACIONAL

As instruções visuais têm sido amplamente investigadas como mecanismos capazes de facilitar a compreensão de tarefas complexas, especialmente em contextos nos quais a interpretação textual se mostra insuficiente (Corso e Cecconello, 2019). A representação gráfica das ações a serem executadas contribui para reduzir ambiguidades e favorecer a assimilação rápida das orientações durante a operação (Danielsson *et al.*, 2018).

A realidade aumentada amplia o potencial das instruções visuais ao permitir a sobreposição de informações digitais diretamente no ambiente físico de trabalho (Gattullo *et al.*, 2020). Essa abordagem favorece a associação imediata entre orientação e objeto real, reduzindo a necessidade de alternância de atenção entre diferentes fontes de informação (Lampen *et al.*, 2019).

Estudos indicam que o uso de realidade aumentada em instruções operacionais contribui para maior precisão na execução de tarefas de montagem e manutenção, especialmente em atividades que envolvem múltiplas etapas e alta complexidade técnica (Pimminger *et al.*, 2021). A visualização contextualizada das ações auxilia o operador a manter o foco na tarefa, minimizando erros decorrentes de interpretações incorretas (Mark *et al.*, 2021).

A efetividade das instruções baseadas em realidade aumentada está associada à capacidade do sistema de considerar o contexto operacional, incluindo estados de máquina, sequência de atividades e condições ambientais (Mourtzis *et al.*, 2020). Quando essas informações são integradas, as instruções deixam de ser genéricas e passam a refletir a situação específica enfrentada pelo operador naquele momento (Kästner *et al.*, 2020).

Além do suporte imediato à execução, as instruções visuais em realidade aumentada contribuem para processos de aprendizagem no ambiente industrial, favorecendo a internalização de procedimentos e a transferência de conhecimento operacional (Tsutsumi *et al.*, 2020). Essa característica reforça a utilização dessas tecnologias como componentes integrados aos sistemas ciber-físicos, alinhando orientação operacional, dados do processo e execução humana (Wolfartsberger, 2019).

2.7 USO DE CONTEXTO EM TEMPO REAL PARA APOIO À DECISÃO

O uso de contexto em tempo real em ambientes industriais permite que informações provenientes do sistema físico sejam interpretadas de forma contínua, oferecendo subsídios mais alinhados às condições atuais da operação (Mourtzis *et al.*, 2020). Essa abordagem amplia a capacidade do operador de compreender eventos, estados de máquina e sequências produtivas enquanto a atividade está em execução (Danielsson *et al.*, 2018).

Sistemas que exploram contexto em tempo real tendem a apresentar maior aderência entre orientação fornecida e situação operacional concreta, reduzindo discrepâncias entre planejamento e execução (Gattullo *et al.*, 2020). A atualização contínua das informações favorece decisões mais coerentes com o comportamento atual do processo, especialmente em cenários de alta variabilidade (Kästner *et al.*, 2020).

A literatura indica que a ausência de informações contextuais atualizadas compromete a efetividade das orientações operacionais, pois o operador passa a trabalhar com representações defasadas do sistema (Lampen *et al.*, 2019). Quando o contexto é incorporado às interfaces de apoio, a execução humana tende a se alinhar de forma mais consistente aos objetivos operacionais definidos (Pimminger *et al.*, 2021).

O contexto em tempo real também contribui para a priorização de informações relevantes, evitando sobrecarga cognitiva decorrente da apresentação indiscriminada de dados (Tsutsumi *et al.*, 2020). Essa priorização favorece a seleção de ações mais adequadas à situação corrente, fortalecendo a interação entre operador e sistema (Wolfartsberger, 2019).

A utilização estruturada de contexto operacional reforça a integração entre camadas físicas e computacionais, ampliando a capacidade de resposta do sistema frente a eventos inesperados (Kurdve *et al.*, 2018). Esse tipo de integração cria condições para que a tomada de decisão seja continuamente ajustada ao estado real da operação (Mourtzis *et al.*, 2020).

2.8 SISTEMAS ADAPTATIVOS E TOMADA DE DECISÃO BASEADA EM ESTADO

Sistemas adaptativos caracterizam-se pela capacidade de modificar seu comportamento de acordo com mudanças no estado do processo, utilizando informações provenientes do sistema físico para orientar ações futuras (Wolfartsberger, 2019). Essa lógica favorece a tomada de decisão baseada em estado, na qual cada orientação está vinculada a condições específicas observadas durante a execução (Tsutsumi *et al.*, 2020).

A tomada de decisão baseada em estado permite que o sistema reconheça padrões operacionais e selecione respostas alinhadas à situação corrente, reduzindo a dependência de sequências fixas de instruções (Mourtzis *et al.*, 2020). Esse mecanismo amplia a coerência entre orientação e execução, sobretudo em ambientes com elevada dinâmica operacional (Danielsson *et al.*, 2018).

A literatura aponta que sistemas adaptativos contribuem para maior consistência na execução ao reduzir interpretações subjetivas por parte dos operadores (Pimminger *et al.*, 2021). Quando as orientações são condicionadas ao estado do sistema, a execução tende a seguir critérios mais homogêneos entre diferentes usuários e turnos de trabalho (Kurdve *et al.*, 2018).

A adaptação baseada em estado também favorece a personalização das instruções, considerando fatores como sequência de tarefas, condições de máquina e perfil do operador (Tsutsumi

et al., 2020). Essa personalização fortalece a interação entre humano e sistema, promovendo maior fluidez durante a operação (Mark *et al.*, 2021).

Sistemas adaptativos dependem de arquiteturas capazes de capturar, interpretar e utilizar dados do processo de forma contínua (Gattullo *et al.*, 2020). Essa capacidade amplia a integração entre monitoramento, decisão e orientação operacional dentro dos ambientes industriais ciber-físicos (Wolfartsberger, 2019).

2.9 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À ORIENTAÇÃO OPERACIONAL

A aplicação de inteligência artificial à orientação operacional tem sido explorada como meio para interpretar grandes volumes de dados gerados por sistemas industriais e transformá-los em instruções acionáveis para os operadores (Mourtzis *et al.*, 2020). Técnicas baseadas em aprendizado de máquina permitem identificar padrões de operação e associá-los a orientações específicas conforme o estado observado do sistema (Kästner *et al.*, 2020).

O uso de modelos baseados em redes neurais possibilita o reconhecimento automático de objetos, posturas e eventos relevantes durante a execução das tarefas (Gattullo *et al.*, 2020). Essa capacidade favorece a geração dinâmica de instruções alinhadas às condições reais do ambiente físico de trabalho (Lampen *et al.*, 2019).

A literatura destaca que a inteligência artificial amplia a autonomia dos sistemas de assistência ao permitir decisões distribuídas e respostas mais rápidas a mudanças operacionais (Tsutsumi *et al.*, 2020). Essa autonomia reduz a necessidade de intervenção manual para atualização de instruções, promovendo maior continuidade na execução das atividades (Pimminger *et al.*, 2021).

A integração entre inteligência artificial e interfaces de orientação favorece a adaptação do conteúdo informacional ao contexto e ao usuário, ajustando nível de detalhe e formato das instruções (Mark *et al.*, 2021). Essa adaptação contribui para uma interação mais alinhada entre operador e sistema durante a execução das tarefas (Danielsson *et al.*, 2018).

O uso de inteligência artificial em ambientes industriais ciber-físicos reforça a concepção das instruções como componentes ativos do sistema, capazes de evoluir conforme o comportamento operacional observado (Wolfartsberger, 2019). Essa evolução amplia a coerência entre dados do processo, decisão computacional e execução humana (Mourtzis *et al.*, 2020).

2.10 LACUNAS DA LITERATURA: INSTRUÇÕES COMO COMPONENTE TÉCNICO DO SISTEMA

Apesar dos avanços apresentados na literatura, observa-se que as instruções de trabalho ainda são frequentemente tratadas como artefatos periféricos, dissociados da arquitetura técnica dos sistemas

industriais (Corso e Ceconello, 2019). Essa abordagem limita a integração entre orientação operacional e funcionamento do sistema ciber-físico como um todo (Kurdve *et al.*, 2018).

Grande parte dos estudos concentra-se na visualização ou na interface, dedicando menor atenção à formalização das instruções como elementos integrados às camadas de decisão e controle (Gattullo *et al.*, 2020). Essa lacuna restringe a compreensão das instruções como parte do comportamento sistêmico da operação industrial (Wolfartsberger, 2019).

A literatura também apresenta dispersão conceitual quanto à forma de estruturar instruções adaptativas baseadas em dados de processo e estados de máquina (Mourtzis *et al.*, 2020). Essa dispersão dificulta a consolidação de arquiteturas conceituais que integrem de maneira consistente dados físicos, decisão computacional e execução humana (Tsutsumi *et al.*, 2020).

Embora existam propostas voltadas à assistência ao operador, poucos estudos tratam as instruções como componentes técnicos capazes de influenciar diretamente a estabilidade operacional do sistema (Mark *et al.*, 2021). Essa ausência reforça a necessidade de abordagens que reposicionem as instruções dentro da engenharia de sistemas industriais (Pimminger *et al.*, 2021).

Diante dessas lacunas, torna-se pertinente avançar na construção de modelos conceituais que integrem as instruções de trabalho à arquitetura dos sistemas ciber-físicos, considerando-as parte ativa do funcionamento do sistema (Gattullo *et al.*, 2020). Essa perspectiva amplia o entendimento das instruções como elementos técnicos capazes de articular dados, decisão e execução humana de forma estruturada (Wolfartsberger, 2019).

3 METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada caracteriza-se como qualitativa e de natureza conceitual, direcionada à análise e à proposição de uma arquitetura teórica para sistemas adaptativos de instrução de trabalho em ambientes industriais ciber-físicos. O estudo foi desenvolvido a partir de uma análise sistemática da literatura científica, composta exclusivamente por artigos publicados nos últimos cinco anos, selecionados segundo critérios de atualidade, aderência temática e pertinência ao campo da engenharia de sistemas industriais.

O enquadramento metodológico fundamenta-se na perspectiva da engenharia de sistemas, compreendendo o ambiente industrial como um sistema integrado formado por componentes físicos, computacionais e humanos em interação contínua. Essa abordagem permite tratar a orientação operacional como parte integrante do comportamento do sistema, superando a compreensão das instruções como artefatos isolados ou meramente documentais, em consonância com pressupostos clássicos da pesquisa científica aplicada (Lakatos e Marconi, 2017).

A construção da arquitetura conceitual proposta baseia-se na abstração e organização dos principais elementos recorrentes na literatura recente analisada, estruturando-os em camadas

funcionais interdependentes. Essa modelagem visa representar de forma sistemática a relação entre sistema físico, camada de decisão e interface de orientação ao operador, considerando o fluxo de informações e a interação entre esses elementos.

A identificação das variáveis relevantes do sistema físico contempla estados de máquina, eventos operacionais, registros de falha e condições contextuais que interferem diretamente na execução das tarefas. Essas variáveis são tratadas como entradas fundamentais para os mecanismos de adaptação das instruções, permitindo alinhar a orientação operacional às condições efetivas da operação industrial.

A modelagem da camada de decisão é concebida a partir de regras condicionais e métodos baseados em inteligência artificial, responsáveis por associar estados do sistema físico a orientações operacionais específicas. Essa camada atua como elemento intermediário entre a coleta de dados e a apresentação das instruções ao operador, promovendo coerência entre decisão computacional e execução humana.

Os critérios de análise do modelo conceitual consideram a consistência interna da arquitetura proposta, a clareza na definição das interações entre suas camadas e a aderência às abordagens identificadas na literatura recente selecionada. As limitações do estudo decorrem de seu caráter conceitual e da ausência de validação empírica direta, aspecto reconhecido como inerente a pesquisas dessa natureza, conforme delineado por Gil (2019), configurando possibilidades para investigações futuras em ambientes industriais reais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A compreensão dos sistemas de assistência ao operador em ambientes industriais ciber-físicos exige a análise integrada das contribuições empíricas e conceituais existentes na literatura recente, de modo a evidenciar convergências e complementaridades entre diferentes abordagens. Nesse sentido, a Tabela 1 apresentada a seguir sistematiza os principais achados dos estudos selecionados, organizando-os segundo suas contribuições para a orientação operacional, adaptação contextual e integração entre dados do sistema e execução humana.

Tabela 1 – Principais achados dos autores analisados

| Autor | Principais achados |
|---------------------------------|--|
| Corso e Ceconello (2019) | Instruções visuais em realidade aumentada ampliam a precisão e a compreensão das tarefas operacionais. |
| Danielsson <i>et al.</i> (2018) | A percepção dos operadores indica maior alinhamento entre orientação e execução quando há suporte visual contextual. |
| Gattullo <i>et al.</i> (2020) | A gestão contextual da informação viabiliza documentação técnica adaptativa integrada ao sistema. |
| Kästner <i>et al.</i> (2020) | Técnicas de visão computacional permitem identificar estados da tarefa para geração automática de instruções. |
| Kurdve <i>et al.</i> (2018) | Sistemas digitais de instrução favorecem consistência operacional e integração com práticas industriais avançadas. |
| Lampen <i>et al.</i> (2019) | A combinação de simulação e realidade aumentada fortalece a assistência ao operador em montagem manual. |
| Mark <i>et al.</i> (2021) | Sistemas de assistência digital promovem maior uniformidade na execução entre diferentes perfis de operadores. |
| Mourtzis <i>et al.</i> (2020) | Arquiteturas baseadas em IA permitem geração automática de instruções alinhadas ao estado do processo. |
| Pimminger <i>et al.</i> (2021) | Instruções digitais contribuem para maior assimilação dos procedimentos e estabilidade operacional. |
| Tsutsumi <i>et al.</i> (2020) | Sistemas personalizados fortalecem a interação humano-máquina por meio de adaptação contextual. |
| Wolfartsberger (2019) | Sistemas de assistência integram orientação operacional ao funcionamento dos ambientes <i>Industry 4.0</i> . |

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os resultados obtidos a partir da análise da literatura indicam que a arquitetura de Sistemas Adaptativos de Instrução de Trabalho emerge como uma estrutura multicamadas, na qual, conforme Wolfartsberger (2019), sistemas de assistência passam a integrar orientação operacional, dados de processo e interação humana de forma contínua. Nessa mesma linha, Kurdve *et al.* (2018) complementam que a organização dessas arquiteturas favorece maior alinhamento entre planejamento produtivo e execução no chão de fábrica.

Ao observar o fluxo de dados entre sistema físico, camada de decisão e interface humana, Mourtzis *et al.* (2020) destacam que a coleta e o processamento contínuo de informações de máquina viabilizam a geração automática de instruções alinhadas à situação operacional corrente. Em convergência, Lampen *et al.* (2019) apontam que a eficácia desse fluxo depende da capacidade do sistema de transformar dados técnicos em orientações compreensíveis ao operador no momento da execução.

A seleção de instruções com base em estados de máquina, eventos e registros de falha aparece como elemento estruturante dos sistemas adaptativos, sendo que Kästner *et al.* (2020) demonstram como técnicas de reconhecimento de objetos e posturas permitem identificar o estágio da tarefa em tempo real. Dialogando com essa abordagem, Gattullo *et al.* (2020) observam que a incorporação do contexto operacional reduz ambiguidades ao vincular cada orientação a uma condição específica do sistema físico.

No que se refere à adaptação dinâmica do conteúdo e do nível de detalhe das instruções, Tsutsumi *et al.* (2020) evidenciam que sistemas personalizados favorecem uma interação mais fluida entre humano e máquina ao ajustar a informação apresentada conforme o usuário e a situação. Complementarmente, Pimminger *et al.* (2021) indicam que essa adaptação contribui para maior assimilação dos procedimentos e maior estabilidade na execução ao longo do tempo.

A literatura analisada aponta que a redução da variabilidade operacional está diretamente associada à disponibilização de instruções sensíveis ao contexto, conforme discutido por Danielsson *et al.* (2018) ao analisarem a percepção dos operadores em ambientes de montagem assistidos por realidade aumentada. Em consonância, Corso e Cecconello (2019) demonstram que a visualização contextual das instruções favorece maior precisão na execução das tarefas.

Esses resultados dialogam com a observação de Mark *et al.* (2021), que destacam a contribuição dos sistemas digitais de assistência para a uniformização da execução entre operadores com diferentes perfis e níveis de experiência. Ao mesmo tempo, Wolfartsberger (2019) acrescenta que essa uniformização reforça a consistência operacional ao integrar orientação e execução ao funcionamento do sistema industrial.

Quando analisados à luz da literatura sobre sistemas ciber-físicos e *Industry 4.0*, os achados indicam que as instruções deixam de ser tratadas como artefatos periféricos e passam a integrar o comportamento técnico do sistema, conforme defendido por Gattullo *et al.* (2020). Mourtzis *et al.* (2020) ampliam essa discussão ao argumentar que a orientação operacional passa a funcionar como elo entre dados físicos, decisão computacional e ação humana.

A integração da execução humana ao funcionamento do sistema ciber-físico é reforçada quando, segundo Tsutsumi *et al.* (2020), o operador passa a interagir com instruções que refletem o estado real da operação. Em complemento, Danielsson *et al.* (2018) observam que essa integração contribui para maior confiança do operador nas orientações fornecidas pelo sistema.

Do ponto de vista da engenharia mecatrônica, automação e projetos industriais, os resultados discutidos indicam que a concepção de sistemas adaptativos de instrução exige uma abordagem sistêmica, como argumentado por Kurdve *et al.* (2018) ao tratar da integração entre eficiência produtiva e suporte operacional. Nessa perspectiva, Pimminger *et al.* (2021) reforçam que o projeto de sistemas industriais passa a demandar a consideração explícita da interação humano-sistema como parte da arquitetura técnica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou uma síntese conceitual sobre Sistemas Adaptativos de Instrução de Trabalho em ambientes industriais ciber-físicos, destacando a integração entre dados do sistema físico,

camada de decisão e execução humana como contribuição central. Essa abordagem reforça a compreensão das instruções como componentes técnicos ativos do sistema industrial.

Em relação às instruções estáticas e às interfaces tradicionais, o trabalho evidenciou avanços conceituais ao propor orientações sensíveis ao contexto operacional e aos estados do sistema. Essa mudança amplia a coerência entre orientação e situação real de trabalho.

No âmbito do projeto de sistemas industriais orientados ao operador, a proposta contribui ao indicar a necessidade de arquiteturas que considerem a interação humano- sistema como parte integrante do funcionamento técnico. Tal perspectiva favorece maior consistência da execução e melhor suporte à tomada de decisão durante as operações. As limitações do modelo proposto decorrem de seu caráter conceitual, sem validação empírica direta em ambientes industriais. Essa característica restringe a generalização prática imediata dos resultados apresentados.

Como direções para pesquisas futuras, apontam-se estudos aplicados voltados à implementação e avaliação do modelo em contextos industriais reais, bem como investigações que aprofundem a integração entre sistemas adaptativos, inteligência artificial e sistemas ciber-físicos.

REFERÊNCIAS

- CORSO, Guilherme Salvador; CECCONELLO, Ivandro. Use of augmented reality as a mean for visualizing work instructions. *Scientia cum Industria*, v. 7, n. 2, p. 94-101, 2019.
- DANIELSSON, Oscar; SYBERFELDT, Anna; HOLM, Magnus; WANG, Lihui. Operators perspective on augmented reality as a support tool in engine assembly. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 45-50, 2018.
- GATTULLO, Michele *et al.* Towards next generation technical documentation in augmented reality using a context-aware information manager. *Applied Sciences*, v. 10, n. 3, art. 780, 2020.
- GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: *Atlas*, 2019.
- KÄSTNER, Linh; EVERSBERG, Leon; MURSA, Marina; LAMBRECHT, Jens. Integrative object and pose to task detection for an augmented-reality-based human assistance system using neural networks. *arXiv*, 2020.
- KURDVE, Martin; SHAHBAZI, Sasha; WENDIN, Marcus; BENGTSSON, Cecilia; WIKTORSSON, Magnus. Digital assembly instruction system design with green lean perspective: Case study from building module *Industry*. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 762- 767, 2018.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: *Atlas*, 2021.
- LAMPEN, Eva; TEUBER, Jonas; GAISBAUER, Felix; BÄR, Thomas; PFEIFFER, Thies; WACHSMUTH, Sven. Combining simulation and augmented reality methods for enhanced worker assistance in manual assembly. *Procedia CIRP*, v. 81, p. 588-593, 2019.
- MARK, Benedikt G.; RAUCH, Erwin; MATT, Dominik T. The application of digital worker assistance systems to support workers with disabilities in assembly processes. *Procedia CIRP*, v. 103, p. 243-249, 2021.
- MOURTZIS, Dimitris; ANGELOPOULOS, John; PANOPOULOS, Nikolaos. A framework for automatic generation of augmented reality maintenance & repair instructions based on convolutional neural networks. *Procedia CIRP*, v. 93, p. 977-982, 2020.
- PIMMINGER, Sebastian; KURSCHL, Werner; PANHOLZER, Lisa; SCHÖNBÖCK, Johannes. Exploring the learnability of assembly tasks using digital work instructions in a smart factory. *Procedia CIRP*, v. 104, p. 696-701, 2021.
- TSUTSUMI, Daisuke; GYULAI, Dávid; TAKÁCS, Emma; BERGMANN, Júlia; NONAKA, Youichi; FUJITA, Kikuo. Personalized work instruction system for revitalizing human- machine interaction. *Procedia CIRP*, v. 93, p. 1145-1150, 2020.
- WOLFARTSBERGER, Johannes. Perspectives on assistive systems for manual assembly tasks in the context of *Industry 4.0. Technologies*, v. 7, n. 1, art. 12, 2019.