



CAPTURA DE CONHECIMENTO COMO UM PROBLEMA DE CONTROLE EM OPERAÇÕES INDUSTRIAIS: UMA ABORDAGEM DE ENGENHARIA PARA A CAPTURA DE CONHECIMENTO OPERACIONAL EM SISTEMAS DINÂMICOS

KNOWLEDGE CAPTURE AS A CONTROL PROBLEM IN INDUSTRIAL OPERATIONS: AN ENGINEERING APPROACH TO OPERATIONAL KNOWLEDGE CAPTURE IN DYNAMIC SYSTEMS

LA CAPTURA DE CONOCIMIENTO COMO PROBLEMA DE CONTROL EN OPERACIONES INDUSTRIALES: UN ENFOQUE DE INGENIERÍA PARA LA CAPTURA DE CONOCIMIENTO OPERACIONAL EN SISTEMAS DINÁMICOS



<https://doi.org/10.56238/levv14n32-048>

Data de submissão: 11/02/2024

Data de publicação: 11/03/2024

Carolina Lago Pena Maia

RESUMO

A captura de conhecimento operacional em ambientes industriais conectados é frequentemente abordada na literatura recente por perspectivas voltadas à digitalização e à gestão do conhecimento, porém sem um enquadramento técnico que represente sua dinâmica ao longo do tempo em condições reais de operação. Este artigo tem como objetivo propor uma abordagem de engenharia que trata a captura de conhecimento operacional como um problema de sistemas dinâmicos e controle, permitindo descrevê-la por meio de estados, distúrbios e atuadores técnicos. A metodologia adotada é teórico-conceitual, baseada em revisão analítica de estudos publicados nos últimos cinco anos e na construção de um modelo conceitual que integra fundamentos de sistemas ciber-físicos, arquiteturas human-in-the-loop, automação adaptativa e estruturas de suporte cognitivo. Os resultados organizam a literatura em torno de uma formalização do “sistema de conhecimento”, definindo estados associados à externalização, acessibilidade e reutilização do conhecimento, distúrbios operacionais ligados à variabilidade e eventos inesperados, e atuadores técnicos como sensores, registros multimodais, plataformas digitais e mecanismos de assistência por IA. A discussão evidencia que processos puramente manuais tendem a gerar instabilidade informacional, baixa rastreabilidade e perda recorrente de aprendizagem operacional, enquanto arquiteturas integradas favorecem consolidação e reutilização do conhecimento como parte do comportamento do sistema produtivo. Conclui-se que a formalização da captura de conhecimento como problema técnico amplia a capacidade de análise e projeto de soluções industriais autoaprendentes, fortalecendo a integração entre cognição humana, automação e desempenho operacional.

Palavras-chave: Conhecimento Operacional. Captura de Conhecimento. Sistemas Dinâmicos. Engenharia de Controle. Human-In-The-Loop.

ABSTRACT

Operational knowledge capture in connected industrial environments has often been discussed in recent literature through digitalization and knowledge management perspectives, yet without a technical framing that represents its temporal dynamics under real operating conditions. This article aims to propose an engineering approach that treats operational knowledge capture as a dynamic

systems and control problem, enabling its description in terms of states, disturbances, and technical actuators. The methodology is theoretical and conceptual, based on an analytical review of studies published over the last five years and on the development of a conceptual model integrating cyber-physical systems foundations, human-in-the-loop architectures, adaptive automation, and cognitive support structures. The results organize the literature around a formalization of a “knowledge system”, defining states related to knowledge externalization, accessibility, and reuse, operational disturbances associated with variability and unexpected events, and technical actuators such as sensors, multimodal records, digital platforms, and AI- based assistance mechanisms. The discussion shows that purely manual processes tend to produce informational instability, low traceability, and recurring loss of operational learning, whereas integrated architectures support knowledge consolidation and reuse as part of production system behavior. It is concluded that formalizing knowledge capture as a technical problem strengthens analytical and design capabilities for self-learning industrial solutions, enhancing the integration between human cognition, automation, and operational performance.

Keywords: Operational Knowledge. Knowledge Capture. Dynamic Systems. Control Engineering. Human-In-The-Loop.

RESUMEN

La captura de conocimiento operativo en entornos industriales conectados se aborda con frecuencia en la literatura reciente desde perspectivas centradas en la digitalización y la gestión del conocimiento, pero sin un marco técnico que represente su dinámica a lo largo del tiempo en condiciones operativas reales. Este artículo pretende proponer un enfoque de ingeniería que considera la captura de conocimiento operativo como un problema dinámico de sistemas y control, permitiendo su descripción mediante estados, perturbaciones y actuadores técnicos. La metodología adoptada es teórico-conceptual, basada en una revisión analítica de estudios publicados en los últimos cinco años y en la construcción de un modelo conceptual que integra fundamentos de sistemas ciberfísicos, arquitecturas con interacción humana (human-in-the-loop), automatización adaptativa y estructuras de soporte cognitivo. Los resultados organizan la literatura en torno a una formalización del «sistema de conocimiento», definiendo estados asociados con la externalización, la accesibilidad y la reutilización del conocimiento, perturbaciones operativas vinculadas a la variabilidad y eventos inesperados, y actuadores técnicos como sensores, registros multimodales, plataformas digitales y mecanismos de asistencia de IA. El análisis destaca que los procesos puramente manuales tienden a generar inestabilidad informativa, baja trazabilidad y pérdida recurrente de aprendizaje operativo, mientras que las arquitecturas integradas favorecen la consolidación y reutilización del conocimiento como parte del comportamiento del sistema productivo. Se concluye que formalizar la captura de conocimiento como un problema técnico amplía la capacidad de análisis y diseño de soluciones industriales de autoaprendizaje, fortaleciendo la integración entre la cognición humana, la automatización y el rendimiento operativo.

Palabras clave: Conocimiento Operacional. Captura de Conocimiento. Sistemas Dinámicos. Ingeniería de Control. Human-In-The-Loop.



1 INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos sistemas industriais contemporâneos tem ampliado a dependência de decisões humanas situadas, tomadas em tempo real, em ambientes marcados por variabilidade operacional e acoplamento intenso entre processos físicos e digitais, o que torna o conhecimento operacional um elemento estruturante do desempenho produtivo (Ciccarelli, 2023). Em arquiteturas industriais baseadas em *cyber- physical systems*, esse conhecimento emerge como um componente distribuído, dinâmico e fortemente contextualizado, cuja ausência de formalização compromete a adaptabilidade do sistema técnico como um todo (Harrison, 2021).

O conhecimento adquirido por operadores experientes é construído progressivamente a partir da interação contínua com o processo produtivo, manifestando-se por meio de ajustes finos, antecipações e interpretações que raramente são explicitadas de forma verbal ou documental (Ribeiro, 2022). Esse tipo de conhecimento apresenta natureza implícita, situacional e dependente da experiência, sendo ativado sobretudo em condições não previstas pelos modelos formais de operação (Turner, 2021).

Os mecanismos tradicionais de documentação, como *standard operating procedures* e treinamentos formais, foram historicamente concebidos para contextos de estabilidade operacional e repetitividade de tarefas, assumindo que o conhecimento pode ser completamente descrito e transferido por meio de instruções estáticas (Iheukwumere- Esotu, 2022). Em sistemas produtivos altamente dinâmicos, tais mecanismos mostram-se limitados ao não capturar variações contextuais, exceções operacionais e adaptações realizadas no nível da prática cotidiana (Anshari, 2022).

A intensificação da pressão por produtividade, associada à redução de margens operacionais e à crescente automação dos processos, favorece a tomada de decisões rápidas e improvisadas que permanecem restritas ao operador no momento da ação (Chacón, 2021). Nessas condições, o conhecimento gerado durante a resolução de exceções tende a se dissipar após o evento, produzindo uma perda sistemática de aprendizado organizacional ao longo do tempo (Cimini, 2020).

A recorrente falha na captura desse conhecimento em ambientes reais não decorre de ausência de tecnologias digitais, mas da inexistência de uma estrutura conceitual capaz de representar a dinâmica entre operadores, processos e sistemas automatizados (Kalaboukas, 2021). A literatura indica que, sem um modelo que integre cognição humana e controle técnico, iniciativas de *knowledge capture* permanecem fragmentadas e reativas, limitando sua efetividade operacional (Lu, 2022).

Diante desse cenário, este artigo propõe tratar a captura de conhecimento operacional como um problema de engenharia de controle, no qual estados, distúrbios e atuadores podem ser formalmente definidos em sistemas industriais dinâmicos. A estrutura do trabalho contempla uma

revisão crítica da literatura, a proposição de um modelo conceitual e a discussão de suas implicações para o projeto de sistemas industriais autoaprendentes baseados em *human-in-the-loop* e *Artificial Intelligence of Things*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONHECIMENTO OPERACIONAL EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

O conhecimento operacional em ambientes industriais é constituído por percepções e interpretações que emergem no contato direto com processos produtivos, onde a leitura de sinais do sistema, a compreensão do comportamento do processo e a antecipação de eventos formam uma base decisória situada e continuamente atualizada (Ciccarelli, 2023). Em cenários de automação avançada, esse conhecimento se manifesta como mediação humana sobre a operação, funcionando como uma camada interpretativa que conecta dados do processo, metas de produção e condições reais do chão de fábrica (Turner, 2021).

A literatura que discute força de trabalho na Indústria 4.0 descreve o operador contemporâneo como alguém inserido em ecossistemas digitais, com responsabilidades que transcendem a execução de tarefas e se deslocam para coordenação, supervisão e tomada de decisão em contextos de variabilidade operacional (Ciccarelli, 2023). Essa transição reorganiza a natureza do conhecimento exigido no ambiente industrial, pois os operadores passam a lidar com sistemas mais opacos do ponto de vista causal, o que amplia a necessidade de interpretações baseadas em experiência (Harrison, 2021).

Quando processos são modelados por arquiteturas conectadas, a operação passa a ser mediada por camadas digitais que coletam, agregam e exibem informações, mas a leitura final ainda depende da capacidade humana de produzir sentido a partir de eventos incompletos e ruídos presentes nas medições (Chacón, 2021). Por isso, o conhecimento operacional tende a ser associado a competências de reconhecimento de padrões, diagnóstico situacional e ajuste fino, características que se desenvolvem no tempo e se estabilizam como repertórios práticos, mais do que como conteúdos formalmente ensináveis (Ribeiro, 2022).

A perspectiva de sistemas dinâmicos aplicada ao ambiente industrial favorece compreender o conhecimento operacional como fenômeno temporal, no qual as decisões humanas respondem a distúrbios, atrasos e não linearidades que atravessam o processo produtivo, impondo adaptações contínuas (Harrison, 2021). Nessa direção, o conhecimento do operador pode ser visto como uma variável latente que influencia o desempenho do sistema, pois atua sobre escolhas de intervenção, priorização de ações e interpretação de indicadores que variam conforme o estado do processo (Cimini, 2020). Em análises sobre mediação humana na automação, a atuação do trabalhador aparece como elemento que preserva a robustez da operação quando

o sistema automatizado encontra condições não previstas, exigindo interpretação contextual e seleção de respostas sob restrições de tempo e recursos (Turner, 2021). Essa robustez, no entanto, depende de conhecimentos que costumam permanecer distribuídos na prática cotidiana e, por isso, são difíceis de representar em instruções estáticas ou bases documentais tradicionais (Iheukwumere-Esotu, 2022).

A literatura de gestão do conhecimento conectada à Indústria 4.0 discute que a digitalização altera os meios de circulação do conhecimento, mas não resolve automaticamente o problema de transformar experiência em representação compartilhável, pois a experiência é indexada ao contexto e se organiza em camadas tácitas (Ribeiro, 2022). Assim, compreender o conhecimento operacional requer reconhecer sua dependência de situação, sua sensibilidade a mudanças no processo e sua relação com a interação contínua entre humanos e sistemas técnicos (Ciccarelli, 2023).

O conceito de operador em paradigmas industriais recentes também aparece vinculado ao aumento de interações com interfaces digitais, alertas automatizados e recomendações geradas por modelos, criando um cenário em que a experiência passa a dialogar com saídas algorítmicas e com representações sintetizadas do processo (Angulo, 2023). Esse diálogo produz um arranjo cognitivo em que o operador mantém responsabilidade interpretativa, selecionando quais sinais são relevantes, quando agir e como ajustar a operação diante de incertezas e dados imperfeitos (Kalaboukas, 2021).

A operacionalização do conhecimento, nesse sentido, está associada à capacidade de lidar com variabilidade e com o caráter contingente das decisões, já que a produção real frequentemente inclui microeventos que não se repetem com fidelidade e exigem respostas adaptativas (Chacón, 2021). Esse fenômeno reforça que o conhecimento operacional é uma propriedade emergente do acoplamento entre indivíduo, tecnologia e processo, e não um conjunto fixo de instruções armazenadas em documentos (Horejši, 2020).

A noção de sistemas autoajustáveis sugere que a indústria caminha para arquiteturas capazes de reconfiguração e adaptação, mas tal movimento aumenta a complexidade percebida por operadores, pois o comportamento do sistema pode variar em função de lógicas internas, regras e modelos embutidos (Harrison, 2021). Em consequência, o conhecimento operacional torna-se ainda mais valioso quando o operador precisa inferir causalidades, validar recomendações e interpretar mudanças de comportamento em sistemas conectados e dinâmicos (Lu, 2022).

A literatura sobre *digital twins* cognitivos indica que representações digitais do processo podem incorporar modelos, históricos e inferências para apoiar decisões, porém a utilidade dessas representações depende da forma como elas se alinham ao conhecimento prático do operador, sob risco de produzir uma camada adicional de complexidade informacional (Kalaboukas, 2021). Nessa abordagem, o conhecimento operacional passa a ser entendido também como critério de validação e

ajuste do próprio gêmeo digital, já que o operador compara representações e resultados observados para identificar inconsistências e calibrar interpretações (Lu, 2022).

O ambiente industrial conectado tende a registrar eventos, sensores e logs, mas a existência de dados não implica a existência de conhecimento compartilhável, pois o conhecimento exige estrutura interpretativa, vínculo com ação e relevância situacional para sustentar intervenções (Angulo, 2023). Por isso, a literatura reforça que o conhecimento operacional permanece como um recurso que se desenvolve na prática e se expressa no momento da decisão, exigindo modelos que considerem temporalidade, variabilidade e interação humano-máquina (Cimini, 2020).

2.2 CAPTURA, EXTERNALIZAÇÃO E REUTILIZAÇÃO DO CONHECIMENTO

A captura de conhecimento em operações industriais pode ser entendida como um conjunto de mecanismos voltados a transformar experiências situadas em representações comunicáveis, capazes de serem armazenadas, compartilhadas e reutilizadas em decisões futuras (Iheukwumere-Esotu, 2022). No contexto da Indústria 4.0, esse processo tende a ser reconfigurado por tecnologias conectadas, pois sensores, rastreabilidade e plataformas digitais ampliam a capacidade de registrar eventos, embora permaneça a questão de como converter registros em explicações úteis para ação (Ribeiro, 2022).

A externalização do conhecimento é frequentemente tratada como conversão do que está implícito na prática para artefatos explícitos, como descrições, procedimentos e modelos, porém essa conversão enfrenta dificuldades quando o conhecimento é produzido por ajustes finos e heurísticas dependentes de contexto (Turner, 2021). Assim, a literatura aponta que externalizar conhecimento operacional requer compreender como operadores interpretam sinais e como tomam decisões sob incerteza, o que demanda estruturas de representação alinhadas à cognição humana e ao comportamento do processo (Ciccarelli, 2023).

A reutilização do conhecimento, por sua vez, depende da capacidade de recuperar informações pertinentes no momento da necessidade, o que envolve indexação, contextualização e mecanismos de busca que preservem a relação entre evento, condição do processo e intervenção realizada (Iheukwumere-Esotu, 2022). Em sistemas produtivos conectados, essa reutilização pode ser apoiada por arquiteturas inteligentes capazes de recomendar ações, porém tais recomendações exigem critérios que integrem histórico, estado atual e objetivos operacionais para evitar sugestões genéricas (Angulo, 2023).

A literatura sobre *human-in-the-loop* indica que a captura de conhecimento ganha potência quando incorpora o operador como elemento ativo de curadoria, validação e refinamento de registros, pois o operador é capaz de atribuir sentido e relevância a eventos que, isoladamente, aparecem como ruído em bancos de dados (Cimini, 2020). Nesse arranjo, a externalização não é uma

mera transcrição de ações, mas um processo de construção de representações que conectam condições observadas, hipóteses de causa e justificativas de intervenção, favorecendo uso futuro em situações análogas (Turner, 2021).

A abordagem de *cognitive digital twin* oferece um enquadramento em que o conhecimento capturado pode ser incorporado a modelos que evoluem com o sistema, unindo dados operacionais, estrutura do processo e inferências para suporte à decisão (Lu, 2022). Nesse caso, a reutilização do conhecimento torna-se uma função do próprio gêmeo digital, que integra histórico de eventos e respostas para sugerir caminhos e prever consequências, desde que as representações sejam consistentes com a prática operacional (Kalaboukas, 2021).

Em redes conectadas e ágeis, a captura de conhecimento precisa considerar que decisões não ocorrem isoladamente, mas em cadeias de interdependência entre unidades produtivas, logística e suprimentos, o que amplia a necessidade de representar relações de causa e efeito em diferentes escalas (Kalaboukas, 2021). A literatura sugere que modelos operacionais que combinam conectividade e inteligência podem estruturar a captura de conhecimento como fluxo contínuo, no qual eventos são interpretados, agregados e transformados em regras, parâmetros ou recomendações revisáveis (Harrison, 2021).

A conversão de conhecimento também pode ser analisada a partir de plataformas colaborativas que organizam conteúdos operacionais, procedimentos e aprendizados de manutenção, permitindo que o conhecimento se consolide como repositório vivo e continuamente atualizado (Iheukwumere-Esotu, 2022). Ainda assim, a efetividade desse tipo de plataforma depende da integração com o contexto de uso, pois, se a informação não for acionável e contextualizada, ela tende a se tornar arquivo consultado apenas em auditorias ou treinamentos formais (Ribeiro, 2022).

A literatura também evidencia que a captura de conhecimento operacional encontra limites quando o foco recai exclusivamente sobre documentação textual, pois parte significativa da experiência se manifesta em gestos, sequências de inspeção, interpretação de sons, vibrações e padrões temporais percebidos durante a operação (Angulo, 2023). Isso favorece o uso de registros multimodais e mecanismos de anotação contextual, integrando mídias e dados do processo para tornar o conhecimento mais próximo da forma como ele é realmente produzido e mobilizado (Horejši, 2020).

A externalização do conhecimento pode ser fortalecida quando associada a sistemas de assistência cognitiva que orientam o operador durante a execução e, simultaneamente, registram decisões, justificativas e condições do sistema, criando rastros interpretáveis do processo de tomada de decisão (Angulo, 2023). Esse tipo de abordagem permite que o conhecimento não seja registrado apenas após o evento, mas durante a própria ação, preservando temporalidade, contexto e raciocínio prático que seriam perdidos em relatos retrospectivos (Ciccarelli, 2023).

A literatura de Indústria 4.0 e gestão do conhecimento também destaca que a reutilização depende de governança informacional, pois a multiplicação de dados e registros pode produzir excesso de informação, reduzindo a capacidade de localizar aprendizados relevantes no momento certo (Anshari, 2022). Assim, a captura de conhecimento exige critérios de curadoria, validação e atualização contínua, permitindo que os registros permaneçam conectados ao estado do sistema e às condições reais de operação (Ribeiro, 2022).

A formalização do conhecimento em sistemas industriais pode assumir a forma de modelos operacionais capazes de representar processos, estados e intervenções, aproximando a captura de conhecimento de um problema de modelagem e controle em sistemas dinâmicos (Harrison, 2021). Essa aproximação abre espaço para tratar o conhecimento como parte de uma arquitetura que retroalimenta o desempenho do sistema, incorporando registros e inferências em ciclos de ajuste e aprendizagem ao longo do tempo (Chacón, 2021).

2.3 SOPS, TREINAMENTOS FORMAIS E DOCUMENTAÇÃO MANUAL

Os *standard operating procedures* e os treinamentos formais constituem práticas tradicionais de padronização que procuram estabilizar a execução e reduzir variações de desempenho, estruturando conhecimento sob formatos prescritivos e sequenciais (Iheukwumere-Esotu, 2022). Esse tipo de documentação costuma funcionar melhor quando o processo é relativamente previsível e quando as condições operacionais permanecem próximas das hipóteses usadas para construir o procedimento (Chacón, 2021).

Na Indústria 4.0, a presença crescente de automação e conectividade reorganiza a relação entre prescrição e execução, pois operadores interagem com sistemas que podem alterar parâmetros e estados com rapidez, tornando a aderência estrita a procedimentos fixos menos compatível com a realidade operacional (Harrison, 2021). A literatura sobre trabalhador mediador da automação descreve que, em cenários com variabilidade elevada, procedimentos documentados tendem a ser reinterpretados, adaptados ou temporariamente ignorados em favor de respostas mais alinhadas ao estado real do sistema (Turner, 2021).

Treinamentos formais frequentemente transmitem modelos de operação baseados em fluxos ideais, deixando lacunas quando o operador precisa agir sob condições não previstas, como falhas intermitentes, variações de matéria-prima, atrasos de resposta e sinais contraditórios (Ciccarelli, 2023). Nesse sentido, a literatura aponta que o conhecimento transferido em treinamentos tende a privilegiar regras gerais, enquanto o conhecimento operacional se consolida como repertório de exceções, ajustes e heurísticas que surgem no contato prolongado com o processo (Ribeiro, 2022).

A documentação manual também é atravessada por limitações práticas ligadas ao tempo disponível para registrar ocorrências, ao vocabulário utilizado e à dificuldade de traduzir percepções sensoriais e raciocínios situados em linguagem padronizada (Iheukwumere-Esotu, 2022). Em operações reais, a escrita tende a ser posterior ao evento e, por isso, perde elementos temporais e contextuais, resultando em registros incompletos que raramente capturam a lógica que motivou a decisão do operador (Angulo, 2023).

A presença de sistemas digitais pode ampliar a produção de registros, mas isso não significa que a documentação se torne automaticamente mais útil, pois o valor operacional do registro depende de sua ligação com estados do sistema, condições iniciais, intervenção realizada e efeitos observados (Lu, 2022). A literatura de *cognitive digital twins* sugere que a documentação se torna mais acionável quando conectada a modelos que recuperam relações entre eventos e consequências, permitindo que o registro deixe de ser narrativo e passe a ser estruturado em termos de estados e transições (Kalaboukas, 2021).

Treinamentos baseados em conteúdo fixo também podem desconsiderar a evolução rápida de tecnologias e interfaces, o que tende a gerar um descompasso entre o que é ensinado e o que é vivenciado no ambiente produtivo conectado (Anshari, 2022). Por isso, discussões sobre paradigmas industriais recentes indicam a necessidade de abordagens de apoio cognitivo que acompanhem a execução e auxiliem o operador durante a ação, transformando aprendizagem em processo contínuo associado à operação (Horejši, 2020).

A literatura de *human-in-the-loop manufacturing* destaca que procedimentos padronizados podem coexistir com mecanismos de flexibilidade quando há arquiteturas de controle que incorporam intervenção humana como parte do sistema, permitindo ajustes estruturados sem abandonar rastreabilidade (Cimini, 2020). Nesse contexto, a documentação pode ser repensada como componente de uma arquitetura de controle e aprendizagem, em que o operador registra intervenções e raciocínios de forma integrada ao sistema, reduzindo perda de conhecimento e aumentando reutilização (Turner, 2021). Registros puramente manuais tendem a priorizar a descrição do que foi feito, enquanto o que torna o conhecimento reutilizável é o entendimento de por que foi feito, sob quais condições e com quais alternativas descartadas, dimensões que são difíceis de padronizar em formulários tradicionais (Ciccarelli, 2023). Por essa razão, sistemas de assistência cognitiva conectados podem auxiliar a transformar documentação em processo guiado, no qual o operador estrutura o registro com apoio de prompts, categorias e vínculos automáticos com dados do processo (Angulo, 2023).

Mesmo quando procedimentos são bem descritos, sua utilidade depende da forma como são encontrados e aplicados, pois, em operações com restrição temporal, o operador tende a recorrer ao que é acessível de imediato, favorecendo conhecimento tácito e redes informais em detrimento de

manuais longos (Ribeiro, 2022). Assim, a documentação manual, quando desconectada de sistemas de recomendação e contextualização, tende a operar como arquivo de conformidade e auditoria, e não como instrumento cotidiano de suporte à decisão (Iheukwumere-Esotu, 2022).

Quando a documentação se integra a arquiteturas de automação adaptativa, ela pode se transformar em recurso de reconfiguração, pois regras, parâmetros e registros passam a alimentar ciclos de melhoria e ajuste operacional (Harrison, 2021). Nesse tipo de abordagem, procedimentos deixam de ser exclusivamente prescritivos e passam a ser componentes de uma representação dinâmica do processo, com possibilidade de atualização contínua baseada em experiência operacional capturada (Chacón, 2021).

2.4 LIMITAÇÕES ESTRUTURAIS DE PROCESSOS PURAMENTE MANUAIS

Processos puramente manuais de captura e registro de conhecimento apresentam limitações estruturais ligadas à dependência de memória humana, à fragmentação do registro e à baixa padronização interpretativa, o que compromete consistência e rastreabilidade ao longo do tempo (Ribeiro, 2022). Em ambientes industriais com variabilidade elevada, a ausência de mecanismos automáticos de contextualização favorece o surgimento de registros genéricos que não preservam o vínculo entre evento, estado do sistema e resposta aplicada (Chacón, 2021).

A limitação temporal é recorrente, pois o operador costuma registrar apenas o mínimo necessário para retomar o fluxo produtivo, deixando de explicitar raciocínios, hipóteses e sinais que motivaram a intervenção, elementos que são precisamente os que sustentariam reutilização futura (Turner, 2021). A literatura sobre operador na Indústria 4.0 indica que a carga cognitiva associada à supervisão de sistemas automatizados torna ainda menos provável que o operador produza registros detalhados sem suporte tecnológico, pois sua atenção é consumida pela própria operação (Ciccarelli, 2023).

A natureza multimodal do conhecimento operacional também impõe limites ao manual, já que parte da experiência envolve sons, vibrações, microvariações de tempo e leitura de padrões temporais que dificilmente são descritos com precisão em texto, sobretudo quando a linguagem disponível é padronizada e restrita (Horejši, 2020). Em consequência, o conhecimento que permanece como percepção tende a se perder quando o registro não captura o contexto sensorial e temporal em que a decisão ocorreu (Angulo, 2023).

A falta de integração entre registros e dados do processo reduz a capacidade de reconstruir causalidades, pois, sem associação a séries temporais, setpoints, alarmes e condições de operação, relatos humanos permanecem como narrativas desconectadas do comportamento real do sistema (Lu, 2022). A literatura sobre gêmeos digitais cognitivos aponta que a utilidade do registro cresce

quando ele é indexado a estados e variáveis observáveis, permitindo que a memória operacional seja reconstruída como sequência de eventos vinculada a condições do processo (Kalaboukas, 2021).

Processos manuais também tendem a gerar heterogeneidade de escrita e vocabulário, o que dificulta padronização e busca posterior, pois diferentes operadores descrevem eventos similares com termos distintos, reduzindo a capacidade de consolidar conhecimento em base comum (Iheukwumere-Esotu, 2022). Esse fenômeno reforça que, sem estruturas de anotação e curadoria, a externalização manual favorece dispersão e baixa reutilização, mesmo quando há intenção organizacional de registrar aprendizados (Ribeiro, 2022).

Quando a captura é feita de forma retrospectiva, a memória tende a reorganizar o relato, omitindo incertezas e tentativas intermediárias, o que torna o registro menos fiel à dinâmica real da decisão e reduz sua utilidade para orientar respostas futuras em situações semelhantes (Turner, 2021). Assim, abordagens que capturam conhecimento durante a execução, com apoio de sistemas conectados, preservam temporalidade e justificativas, aproximando o registro da lógica prática usada pelo operador no momento da intervenção (Angulo, 2023).

A literatura de automação adaptativa também indica que processos manuais não acompanham a velocidade de mudança de sistemas reconfiguráveis, pois procedimentos podem se tornar obsoletos rapidamente quando a própria arquitetura técnica se atualiza, alterando parâmetros, interfaces e fluxos de operação (Harrison, 2021). Nesse cenário, registros manuais que não são atualizados em ciclos curtos tendem a perder aderência ao sistema real, reforçando a dependência da experiência local e reduzindo a consistência entre turnos, equipes e plantas (Chacón, 2021).

Além disso, processos manuais não oferecem mecanismos confiáveis de validação automática, o que permite que registros incorretos ou incompletos permaneçam como referência e sejam reutilizados de forma inadequada, ampliando risco operacional e variabilidade de desempenho (Cimini, 2020). Em arquiteturas que incorporam supervisão e recomendação baseadas em modelos, torna-se possível validar coerência de registros com dados do processo e identificar inconsistências, transformando a captura de conhecimento em componente verificável da operação (Lu, 2022).

A limitação de escala é igualmente evidente, pois operações industriais produzem grande volume de microeventos e exceções que não podem ser registrados integralmente por esforço humano, gerando amostragens seletivas que deixam lacunas nos pontos de maior complexidade (Iheukwumere-Esotu, 2022). Por essa razão, sistemas conectados que registram eventos automaticamente e permitem anotação contextual guiada podem ampliar cobertura, mantendo vínculo entre ocorrência e condições de operação, o que favorece consolidação de memória operacional mais completa (Angulo, 2023).

Quando se considera a captura de conhecimento como dinâmica, torna-se evidente que processos manuais introduzem atrasos e ruídos na retroalimentação do sistema, pois o registro

ocorre fora do tempo da operação e sem garantias de completude, interferindo na capacidade de aprender com distúrbios operacionais de forma sistemática (Harrison, 2021). Essa leitura aproxima o problema de uma perspectiva de controle, na qual atrasos de medição e perda de informação comprometem estabilidade e desempenho, reforçando a necessidade de mecanismos técnicos de captura mais integrados (Cimini, 2020).

2.5 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS E HUMAN-IN-THE-LOOP SYSTEMS

Sistemas baseados em *cyber-physical systems* integram elementos físicos, sensores, conectividade e camadas de decisão digital, permitindo monitoramento contínuo, reconfiguração e coordenação de processos em tempo real (Harrison, 2021). Nesse arranjo, a presença humana permanece como componente de decisão e supervisão, especialmente em condições de incerteza, onde a interpretação contextual e a seleção de intervenções ainda exigem mediação cognitiva (Turner, 2021).

A literatura de *human-in-the-loop manufacturing* descreve arquiteturas em que o operador é incorporado como elemento funcional do sistema de controle, participando da tomada de decisão e do ajuste do processo de forma estruturada e rastreável (Cimini, 2020). Essa incorporação permite tratar a intervenção humana como parte de um ciclo de retroalimentação, no qual decisões do operador são registradas, avaliadas e potencialmente integradas a mecanismos automatizados de recomendação e ajuste (Chacón, 2021).

A noção de operador 4.0 enfatiza que tecnologias digitais ampliam capacidades humanas por meio de assistência, interfaces inteligentes e recursos de contextualização, reorganizando o trabalho para um perfil mais analítico e mediador (Ciccarelli, 2023). Nessa lógica, sistemas de apoio cognitivo fornecem informações estruturadas e recomendações, mas dependem de curadoria e validação humanas para garantir aderência ao contexto real de operação e evitar interpretações automáticas inadequadas (Angulo, 2023).

O conceito de gêmeo digital cognitivo amplia essa perspectiva ao propor representações que combinam modelos do processo, dados operacionais e inferências, capazes de apoiar decisões e atualizar interpretações ao longo do tempo (Lu, 2022). Em redes conectadas e ágeis, tais gêmeos podem atuar como infraestrutura de coordenação e memória operacional, integrando histórico de eventos e respostas para oferecer suporte contextualizado à operação (Kalaboukas, 2021).

Soluções baseadas em *virtual reality* e *augmented reality* também aparecem como mecanismos de suporte à execução e à aprendizagem situada, pois permitem sobreposição de informações e guias contextuais diretamente no ambiente de trabalho (Horejši, 2020). Quando combinadas a registros multimodais e integração com dados do processo, essas tecnologias

favorecem captura de conhecimento durante a ação, reduzindo perda de contexto e ampliando qualidade dos registros operacionais (Angulo, 2023).

A integração entre humano e sistema técnico, nesse contexto, pressupõe arquiteturas que reconheçam limites e capacidades de ambos, distribuindo funções de percepção, decisão e intervenção de forma compatível com confiabilidade e tempo de resposta do sistema (Harrison, 2021). Por isso, modelos que tratam a operação como sistema dinâmico tendem a considerar o operador como componente que pode estabilizar o comportamento global quando o processo se afasta das condições previstas, desde que sua intervenção seja estruturada e registrada (Cimini, 2020).

A literatura de plataformas digitais para manutenção mostra que a conectividade pode organizar conhecimento como repositório ativo, integrando registros de atividades, ocorrências e respostas em estruturas que facilitam busca e aprendizado contínuo (Iheukwumere-Esotu, 2022). Ao conectar esses repositórios com camadas de recomendação e com o estado do processo, cria-se uma base para reutilização de conhecimento operacional em tempo real, alinhada a necessidades concretas do operador durante a execução (Ribeiro, 2022).

Arquiteturas de controle aplicadas a processos contínuos em Indústria 4.0 indicam que a conectividade possibilita observabilidade ampliada e coordenação entre componentes, mas requer modelos que representem como intervenções humanas e automáticas interagem sob distúrbios e mudanças de estado (Chacón, 2021). Essa necessidade aproxima o tema da engenharia de controle ao sugerir que o conhecimento capturado deve ser estruturado como parte do comportamento do sistema, permitindo que eventos e intervenções sejam tratados como sinais que retroalimentam decisões futuras (Harrison, 2021).

A perspectiva de assistência cognitiva conectada à *Artificial Intelligence of Things* descreve sistemas capazes de orientar operadores por meio de recomendações contextualizadas, integrando sensores, histórico e modelos para reduzir incerteza durante a operação (Angulo, 2023). Esse suporte é mais efetivo quando o operador pode interagir, corrigir e complementar a recomendação, gerando um ciclo de aprendizagem em que o sistema incorpora gradualmente padrões operacionais validados na prática (Ciccarelli, 2023).

Quando o foco se desloca para redes de suprimentos conectadas, a lógica de gêmeos digitais cognitivos sugere que decisões locais podem ser influenciadas por estados globais e que a captura de conhecimento deve preservar relações entre eventos, restrições e consequências em diferentes níveis do sistema (Kalaboukas, 2021). Nessa leitura, a captura de conhecimento operacional ganha contornos de coordenação e controle distribuído, em que a memória do sistema precisa ser consistente, contextual e acessível para sustentar decisões que envolvem múltiplos componentes interdependentes (Lu, 2022).

2.6 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DINÂMICOS E CONTROLE

A teoria de sistemas dinâmicos oferece um arcabouço matemático para representar processos industriais como conjuntos de estados que evoluem ao longo do tempo sob a influência de entradas, perturbações e realimentações, permitindo analisar comportamento, previsibilidade e resposta do sistema frente a variações operacionais (Harrison, 2021). No contexto industrial contemporâneo, essa abordagem sustenta a modelagem de processos produtivos como entidades dinâmicas acopladas a sensores, atuadores e camadas computacionais que monitoram e ajustam a operação continuamente (Chacón, 2021).

A engenharia de controle utiliza modelos dinâmicos para descrever relações causais entre variáveis, definindo estratégias de intervenção que buscam manter o sistema dentro de regiões operacionais desejadas mesmo diante de incertezas e flutuações (Lu, 2022). Em ambientes industriais conectados, tais modelos passam a incorporar dados em tempo real e lógica computacional distribuída, ampliando a capacidade de observação e intervenção sobre processos complexos (Kalaboukas, 2021).

A formalização matemática de sistemas produtivos permite abstrair a operação em termos de estados observáveis e não observáveis, o que favorece análises sobre comportamento transitório, regime permanente e resposta a eventos externos (Harrison, 2021). Essa formalização também cria base para integrar decisões humanas como variáveis que influenciam a dinâmica do sistema, aproximando controle técnico e cognição operacional em um mesmo enquadramento conceitual (Cimini, 2020).

A literatura sobre automação adaptativa indica que sistemas industriais modernos tendem a operar em condições não estacionárias, exigindo modelos capazes de lidar com mudanças estruturais e reconfigurações frequentes (Chacón, 2021). Nesse cenário, fundamentos de controle fornecem instrumentos para analisar como ajustes contínuos e decisões locais afetam o comportamento global do sistema ao longo do tempo (Turner, 2021).

Ao tratar processos industriais como sistemas dinâmicos, torna-se possível analisar como atrasos, ruídos de medição e intervenções humanas alteram trajetórias de estado e influenciam resultados operacionais (Harrison, 2021). Essa leitura sustenta a aproximação entre controle e captura de conhecimento, pois decisões registradas podem ser interpretadas como sinais que modificam a dinâmica futura do sistema (Angulo, 2023).

2.7 ESTABILIDADE, DISTÚRBIOS E DESEMPENHO EM SISTEMAS SOB CONTROLE

O conceito de estabilidade em sistemas sob controle refere-se à capacidade de o sistema retornar a um comportamento previsível após sofrer perturbações internas ou externas, mantendo suas variáveis dentro de limites aceitáveis (Harrison, 2021). Em ambientes industriais, essa

propriedade é diretamente associada à robustez da operação frente a variações de carga, mudanças de configuração e eventos inesperados (Chacón, 2021).

Distúrbios operacionais podem assumir múltiplas formas, incluindo flutuações de matéria-prima, falhas intermitentes de equipamentos e variações na demanda, afetando o comportamento dinâmico do sistema (Lu, 2022). A teoria de controle fornece instrumentos para modelar esses distúrbios e avaliar como estratégias de intervenção mitigam seus efeitos sobre desempenho e confiabilidade (Kalaboukas, 2021).

O desempenho de sistemas controlados costuma ser avaliado a partir de critérios como tempo de resposta, erro em regime permanente e consumo de recursos, os quais dependem tanto da estrutura do controlador quanto da qualidade das informações disponíveis (Harrison, 2021). Em sistemas industriais conectados, a presença humana influencia esses critérios ao introduzir decisões adaptativas que podem compensar limitações do controle automático em situações não previstas (Turner, 2021).

A literatura de *human-in-the-loop* sugere que intervenções humanas funcionam como mecanismos de ajuste capazes de estabilizar o sistema quando modelos automáticos perdem aderência às condições reais de operação (Cimini, 2020). Essas intervenções, quando compreendidas como parte do sistema de controle, podem ser analisadas em termos de impacto sobre estabilidade e desempenho global (Angulo, 2023).

A integração de registros operacionais com modelos de controle permite identificar padrões recorrentes de distúrbios e respostas, favorecendo ajustes estruturais que reduzem variabilidade ao longo do tempo (Chacón, 2021). Assim, a estabilidade deixa de ser tratada apenas como propriedade técnica e passa a incorporar dimensões cognitivas associadas à experiência acumulada na operação (Ciccarelli, 2023).

2.8 MODELOS COGNITIVOS DE HABILIDADE, REGRAS E CONHECIMENTO

Modelos cognitivos de habilidade, regras e conhecimento descrevem níveis distintos de processamento humano durante a execução de tarefas, diferenciando ações automatizadas, procedimentos guiados e decisões baseadas em compreensão conceitual (Ciccarelli, 2023). Esses modelos oferecem uma estrutura para compreender como operadores transitam entre respostas rápidas e raciocínios analíticos conforme a situação operacional se altera (Turner, 2021).

No nível de habilidade, a ação ocorre de forma quase automática, sustentada por prática repetida e percepção direta de sinais do ambiente, o que reduz carga cognitiva durante a operação normal (Ribeiro, 2022). Em sistemas industriais dinâmicos, esse nível é frequentemente mobilizado em tarefas rotineiras, permitindo resposta ágil a variações pequenas e previsíveis (Harrison, 2021).

O nível baseado em regras envolve a aplicação de procedimentos aprendidos, instruções e heurísticas que orientam a ação quando a situação se enquadra em padrões conhecidos (Iheukwumere-Esotu, 2022). Esse tipo de processamento é típico de treinamentos formais e documentação operacional, embora sua eficácia dependa da aderência entre regras prescritas e condições reais do processo (Chacón, 2021).

O nível baseado em conhecimento é ativado quando a situação foge aos padrões conhecidos, exigindo diagnóstico, formulação de hipóteses e avaliação de alternativas antes da intervenção (Ciccarelli, 2023). Nesses casos, o operador utiliza modelos mentais do processo para interpretar sinais ambíguos e decidir ações sob incerteza (Lu, 2022).

A literatura indica que ambientes industriais avançados exigem transições frequentes entre esses níveis cognitivos, pois a automação altera a natureza das tarefas e expõe operadores a situações menos repetitivas (Turner, 2021). Compreender essas transições é relevante para estruturar sistemas de apoio que respeitem limites cognitivos e favoreçam decisões alinhadas ao comportamento do sistema técnico (Angulo, 2023).

2.9 INTEGRAÇÃO ENTRE HUMANOS E SISTEMAS TÉCNICOS

A integração entre humanos e sistemas técnicos em ambientes industriais ocorre por meio de interfaces, fluxos de informação e mecanismos de decisão compartilhada que conectam cognição humana e controle automatizado (Harrison, 2021). Essa integração define como dados são apresentados, como decisões são tomadas e como intervenções humanas afetam o comportamento do sistema (Cimini, 2020).

Arquiteturas *human-in-the-loop* estruturam essa relação ao incorporar o operador como componente funcional do sistema, permitindo que decisões humanas sejam registradas, avaliadas e integradas a ciclos de controle (Turner, 2021). Esse arranjo favorece maior alinhamento entre ação humana e resposta técnica, reduzindo assimetrias entre modelo e operação real (Chacón, 2021).

A literatura sobre assistência cognitiva destaca que interfaces inteligentes podem apoiar a interpretação de dados complexos, sintetizando informações e orientando a atenção do operador durante a execução (Angulo, 2023). A utilidade desse suporte depende da capacidade de o sistema adaptar-se ao contexto e de o operador validar e ajustar recomendações conforme sua experiência (Ciccarelli, 2023).

Tecnologias como *digital twins* ampliam a integração ao oferecer representações dinâmicas do processo que combinam dados, modelos e histórico operacional (Lu, 2022). Quando alinhadas à prática do operador, essas representações fortalecem a coordenação entre humano e sistema técnico, pois permitem simular consequências e comparar cenários antes da intervenção (Kalaboukas, 2021).

A integração efetiva também requer considerar limitações humanas, como carga cognitiva e tempo de resposta, distribuindo funções de forma compatível com capacidades técnicas e cognitivas (Harrison, 2021). Essa distribuição influencia diretamente a forma como o conhecimento operacional é produzido, registrado e reutilizado dentro do sistema (Ribeiro, 2022).

2.10 LACUNAS DA LITERATURA: AUSÊNCIA DE FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A literatura sobre gestão do conhecimento e Indústria 4.0 reconhece a relevância do conhecimento operacional, mas tende a tratá-lo de forma descritiva, sem enquadramento formal que permita análise sistemática de seu comportamento ao longo do tempo (Ribeiro, 2022). Essa ausência de formalização limita a capacidade de comparar abordagens, avaliar impactos e integrar conhecimento capturado a arquiteturas técnicas de controle (Harrison, 2021).

Estudos sobre *human-in-the-loop* e operador 4.0 exploram mediação humana e tecnologias de suporte, porém raramente modelam a captura de conhecimento como parte de um sistema dinâmico com estados, entradas e saídas definidas (Ciccarelli, 2023). Como resultado, intervenções humanas permanecem tratadas como eventos isolados, e não como sinais que influenciam a evolução do sistema produtivo (Cimini, 2020).

A literatura de *digital twins* e sistemas cognitivos avança na integração entre dados e modelos, mas frequentemente assume que o conhecimento necessário já está disponível ou pode ser extraído diretamente de registros operacionais (Lu, 2022). Essa suposição desconsidera a natureza implícita e contextual do conhecimento produzido na prática, dificultando sua incorporação consistente aos modelos digitais (Kalaboukas, 2021).

Abordagens baseadas em documentação e plataformas de registro ampliam a disponibilidade de informação, porém carecem de estrutura conceitual que relacione registros, decisões e comportamento do sistema de forma integrada (Iheukwumere- Esotu, 2022). Sem essa estrutura, a captura de conhecimento permanece fragmentada e desconectada da dinâmica de controle da operação (Chacón, 2021).

Diante dessas lacunas, observa-se a necessidade de um enquadramento que trate a captura de conhecimento operacional como problema técnico passível de modelagem, análise e projeto, alinhando cognição humana e controle de sistemas dinâmicos (Angulo, 2023). Tal enquadramento cria condições para integrar registros de decisão a arquiteturas industriais autoajustáveis, aproximando teoria de controle e prática operacional de forma consistente (Turner, 2021).

3 METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada é de natureza teórico-conceitual, com base em revisão analítica da literatura recente, orientada à construção de um modelo explicativo capaz de

reinterpretar a captura de conhecimento operacional sob um enquadramento técnico. Esse tipo de abordagem é adequado quando o objetivo consiste em reorganizar conceitos existentes e propor novas articulações analíticas a partir de fundamentos já consolidados em diferentes campos do conhecimento (Lakatos, 2021).

O enquadramento teórico parte da integração entre engenharia de controle, sistemas dinâmicos e literatura sobre conhecimento operacional em ambientes industriais conectados, permitindo tratar decisões humanas como elementos que influenciam a evolução do sistema ao longo do tempo (Gil, 2019). A escolha por um modelo conceitual se justifica pela necessidade de representar relações abstratas entre estados, intervenções e efeitos observados, o que favorece análise estruturada sem recorrer a experimentação empírica direta (Lakatos, 2021).

A modelagem conceitual da captura de conhecimento como sistema dinâmico foi construída a partir da identificação de variáveis recorrentes descritas na literatura, organizadas como estados do sistema, entradas externas e mecanismos de atuação técnica (Gil, 2019). Essa estratégia permite representar a dinâmica do conhecimento operacional como processo sujeito a variações temporais, influenciado por condições internas e externas à operação (Lakatos, 2021).

A definição dos estados do sistema de conhecimento considerou níveis distintos de externalização, acessibilidade e reutilização do conhecimento, entendidos como condições observáveis que variam conforme práticas operacionais e suporte tecnológico disponível (Gil, 2019). Esses estados foram organizados de forma a permitir análise de transições ao longo do tempo, associadas a intervenções humanas e técnicas descritas na literatura (Lakatos, 2021).

A identificação de distúrbios operacionais baseou-se na recorrência de fatores que afetam negativamente a consolidação do conhecimento, como variabilidade de processo, restrições temporais e eventos inesperados, descritos de forma consistente nos estudos analisados (Gil, 2019). Esses distúrbios foram tratados como entradas externas ao sistema de conhecimento, capazes de alterar sua trajetória e comprometer estabilidade informacional (Lakatos, 2021).

A caracterização dos atuadores técnicos incluiu tecnologias digitais, sistemas de registro, sensores e mecanismos de suporte cognitivo, considerados como meios de intervenção que influenciam diretamente os estados do sistema (Gil, 2019). Esses atuadores foram analisados quanto à sua capacidade de reduzir perdas informacionais e favorecer retenção estruturada do conhecimento operacional (Lakatos, 2021).

Os critérios de análise de estabilidade e desempenho do sistema foram definidos a partir de conceitos clássicos da teoria de controle, reinterpretados para o domínio da captura de conhecimento, permitindo avaliar consistência, continuidade e capacidade de reutilização ao longo do tempo (Gil, 2019). Essa adaptação metodológica possibilita tratar o conhecimento como variável

dinâmica sujeita a degradação ou consolidação conforme a arquitetura do sistema em que está inserido (Lakatos, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais achados dos autores analisados, organizando suas contribuições em relação ao conhecimento operacional, integração humano-sistema, arquiteturas técnicas e fundamentos conceituais que sustentam a proposta deste artigo.

Tabela 1 – Síntese dos principais achados da literatura analisada

Autor (ano)	Contribuição central
Angulo (2023)	Analisa a concepção de assistentes cognitivos integrados à <i>Artificial Intelligence of Things</i> , discutindo como registros multimodais, inferência contextual e interação humano-sistema podem apoiar operadores na tomada de decisão e na captura contínua de conhecimento operacional.
Anshari (2022)	Discute a relação entre gestão do conhecimento e os paradigmas da Quarta Revolução Industrial, evidenciando como tecnologias digitais reconfiguram fluxos informacionais sem garantir, por si só, a consolidação e reutilização do conhecimento organizacional.
Chacón (2021)	Propõe uma arquitetura de controle para processos industriais contínuos baseada em princípios da Indústria 4.0, demonstrando como sistemas conectados podem integrar monitoramento, decisão e intervenção em ambientes operacionais complexos.
Ciccarelli (2023)	Realiza uma revisão sobre o conceito de Operador 4.0, destacando a mediação cognitiva exercida pelos trabalhadores em ambientes industriais avançados e a ampliação de suas funções para supervisão, interpretação e coordenação.
Cimini (2020)	Apresenta uma arquitetura de controle <i>human-in-the-loop</i> para sistemas de manufatura, na qual a intervenção humana é tratada como componente funcional do sistema, permitindo maior flexibilidade e adaptação frente à variabilidade operacional.
Harrison (2021)	Discute fundamentos de automação adaptativa e sistemas dinâmicos, abordando como arquiteturas reconfiguráveis podem manter estabilidade operacional diante de mudanças estruturais e condições não previstas.
Horejši (2020)	Explora o uso de <i>augmented reality</i> e <i>virtual reality</i> em linhas de montagem inteligentes, analisando como essas tecnologias apoiam execução, aprendizagem situada e interação entre operadores e sistemas digitais.
Iheukwumere-Esotu (2022)	Desenvolve uma plataforma digital de gestão do conhecimento aplicada a manutenção industrial, evidenciando potencialidades e limitações de sistemas baseados em registros colaborativos e web para retenção de conhecimento técnico.
Kalaboukas (2021)	Propõe um modelo operacional de <i>cognitive digital twins</i> aplicados a redes de suprimentos conectadas, integrando dados, modelos e inferência para apoiar coordenação e tomada de decisão em sistemas distribuídos.
Lu (2022)	Analisa o conceito de gêmeo digital cognitivo a partir da engenharia de sistemas baseada em modelos, discutindo fundamentos conceituais, níveis de abstração e integração entre modelos, dados e inteligência.
Ribeiro (2022)	Apresenta uma análise crítica da relação entre gestão do conhecimento e Indústria 4.0, destacando limites das abordagens existentes e apontando a ausência de modelos que integrem conhecimento operacional à dinâmica dos sistemas produtivos.
Turner (2021)	Examina cenários de mediação humana em automação avançada, discutindo como trabalhadores influenciam desempenho, confiabilidade e adaptação de sistemas industriais altamente automatizados.

Fonte: Elaborada pela autora (2024)

A partir de Angulo (2023), observa-se que a captura de conhecimento pode ser interpretada como processo contínuo mediado por tecnologias inteligentes, enquanto Chacón (2021) demonstra

que arquiteturas industriais já operam segundo lógicas de controle dinâmico que podem incorporar decisões humanas como variáveis do sistema. Ciccarelli (2023) complementa essa leitura ao mostrar que o operador contemporâneo atua como mediador cognitivo, conectando informações técnicas e contexto operacional em tempo real.

Segundo Cimini (2020), sistemas *human-in-the-loop* permitem estruturar a intervenção humana como parte funcional da operação, ao passo que Harrison (2021) evidencia que estabilidade em sistemas adaptativos depende da integração entre controle automático e decisões situadas. Ribeiro (2022) reforça que a ausência de estruturas formais para capturar esse conhecimento mantém a dependência de práticas informais e locais.

Enquanto Turner (2021) destaca que a mediação humana sustenta desempenho em situações de variabilidade, Iheukwumere-Esotu (2022) demonstra que plataformas digitais ampliam registro, mas carecem de contextualização dinâmica para favorecer reutilização. Lu (2022) e Kalaboukas (2021) ampliam o debate ao propor *cognitive digital twins* como estruturas capazes de integrar dados, modelos e experiência operacional.

Horejši (2020) mostra que tecnologias imersivas favorecem captura durante a ação, enquanto Anshari (2022) aponta que a transformação digital reorganiza fluxos de conhecimento sem garantir sua consolidação. A articulação entre esses autores evidencia que a captura de conhecimento pode ser formalizada como problema de controle, no qual estados desejados, distúrbios e atuadores são claramente identificáveis. Nesse enquadramento, o estado desejado corresponde à existência de conhecimento externalizado, acessível e reutilizável, como indicado por Ribeiro (2022), enquanto Angulo (2023) sugere que assistentes cognitivos podem atuar como mediadores dessa consolidação. Chacón (2021) e Harrison (2021) indicam que distúrbios operacionais alteram a trajetória do sistema, exigindo intervenções que estabilizem tanto o processo físico quanto a memória operacional.

Segundo Cimini (2020), atuadores técnicos como sensores e registros estruturados permitem tratar intervenções humanas como sinais do sistema, enquanto Turner (2021) reforça que essas intervenções influenciam diretamente desempenho global. A ausência de tais mecanismos, conforme discutido por Iheukwumere-Esotu (2022), mantém instabilidade informacional e perda recorrente de aprendizado.

Ao articular teoria de controle e sistemas ciber-físicos, Lu (2022) e Kalaboukas (2021) demonstram que conhecimento pode ser incorporado a arquiteturas autoajustáveis, desde que formalizado como parte da dinâmica do sistema. Esse conjunto de evidências sustenta a proposta de tratar a captura de conhecimento como problema técnico, integrando cognição humana, automação e desempenho operacional de forma consistente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma abordagem conceitual que interpreta a captura de conhecimento operacional como problema de engenharia, estruturado segundo fundamentos de sistemas dinâmicos e controle. Essa perspectiva permite reorganizar o debate ao deslocar o conhecimento do campo exclusivamente gerencial para um domínio técnico e modelável.

O avanço proposto consiste em tratar decisões humanas, registros e tecnologias como componentes de um sistema sujeito a estados, distúrbios e mecanismos de intervenção. Essa leitura favorece maior integração entre automação industrial e processos de aprendizagem operacional.

As implicações para a engenharia de controle incluem a ampliação do escopo tradicional de análise, incorporando variáveis cognitivas e informacionais ao projeto de sistemas industriais conectados. Esse movimento aproxima teoria e prática ao reconhecer a experiência operacional como parte do comportamento do sistema.

Entre as limitações, destaca-se o caráter conceitual do modelo, que demanda validação futura em contextos empíricos e aplicações industriais específicas. Ainda assim, o enquadramento apresentado fornece base sólida para investigações posteriores.

Pesquisas futuras podem explorar a operacionalização do modelo em sistemas reais, bem como o desenvolvimento de métricas formais para avaliar estabilidade e desempenho do conhecimento ao longo do tempo. A integração entre controle, cognição e tecnologia permanece como campo fértil para aprofundamento teórico e aplicação prática.



REFERÊNCIAS

- ANGULO, Cecilio; CHACÓN, Alejandro; PONSÁ, Pere. Towards a cognitive assistant supporting human operators in the Artificial Intelligence of Things. *Internet of Things*, v. 21, art. 100673, 2023.
- ANSHARI, Muhammad; SYAFRUDIN, Muh. Azhar; FITRIYANI, N.; SHARMA, P. Fourth Industrial Revolution between Knowledge Management and Digital Humanities. *Information*, v. 13, n. 6, art. 292, 2022.
- CHACÓN, E. *et al.* A control architecture for continuous production processes based on Industry 4.0: water supply systems application. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021.
- CICCARELLI, Marianna; PAPETTI, Alessandra; GERMANI, Michele. Exploring how new industrial paradigms affect the workforce: A literature review of Operator 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 70, p. 464–483, 2023.
- CIMINI, Chiara; PIROLA, Fabiana; PINTO, Roberto; CAVALIERI, Sergio. A human-in- the-loop manufacturing control architecture for the next generation of production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 54, p. 258–271, 2020.
- GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: *Atlas*, 2019.
- HARRISON, R. *et al.* Towards the realization of dynamically adaptable automation systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 379, n. 2207, 2021.
- HOREJŠI, Petr; NOVIKOV, Konstantin; ŠIMON, Michal; KŮRKA, Petr; STOLÍN, Radoslav. A Smart Factory in a Smart City: Virtual and Augmented Reality in a Smart Assembly Line. *IEEE Access*, v. 8, p. 94330–94340, 2020.
- IHEUKWUMERE-ESOTU, Louis O.; OSSAI, C. I.; HOWARD, I. Development of an Interactive Web-Based Knowledge Management Platform for Major Maintenance Activities: Case Study of Cement Manufacturing System. *Sustainability*, v. 14, n. 17, art. 11041, 2022.
- KALABOUKAS, Konstantinos; ROOS, David; DOULGERIS, Marinos; VERRIET, Julien; KIRITSIS, Dimitris. Implementation of Cognitive Digital Twins in Connected and Agile Supply NetworksAn Operational Model. *Applied Sciences*, v. 11, n. 9, art. 4103, 2021.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: *Atlas*, 2021.
- LU, Jinzhi; YANG, Zhaorui; ZHENG, Xiaochen; WANG, Jian *et al.* Exploring the concept of Cognitive Digital Twin from model-based systems engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 121, p. 5835–5854, 2022.
- RIBEIRO, Vagner B.; NAKANO, Davi; MUNIZ JUNIOR, Jorge; OLIVEIRA, Rafaela B. Knowledge management and Industry 4.0: a critical analysis and future agenda. *Gestão & Produção*, v. 29, e5222, 2022.
- TURNER, Christopher J.; MA, Ruidong; CHEN, Jingyu; OYEKAN, John. Human in the loop: Industry 4.0 technologies and scenarios for worker mediation of automated manufacturing. *IEEE Access*, v. 9, p. 103950–103970, 2021.