

Cognitive Modeling and its Applications in Industry: a Systematized Literature Review

Modelagem Cognitiva e suas Aplicações na Indústria: uma Revisão Sistemática da Literatura

Sérgio Santos Silva^{1*}, Lynn Rosalina Gama Alves²

Abstract: Cognitive Computing (CC), as a promising technological paradigm, brings computational systems closer to human reasoning in order to solve complex problems across sectors that demand efficiency, reliability, and innovation. This article presents an analysis of CC modeling processes applied to the industrial sector, through a Systematic Review (SR) of studies published between 2019 and 2024. The results, organized around three guiding questions, enabled the comparison of six selected studies, highlighting their practical applications, advantages, and limitations. The conclusions demonstrate the potential of CC in industrial applications and its integration with emerging technologies. The study also identifies challenges and research gaps, and provides recommendations for future practices and investigations.

Keywords: Cognitive Computing — Modeling Processes — Systematized Review — Industrial Applications

Resumo: A Computação Cognitiva (CC), como um paradigma tecnológico promissor, aproxima sistemas computacionais do raciocínio humano para resolução de problemas complexos em diversos setores que exigem eficiência, confiabilidade e inovação. Este artigo apresenta uma análise de processos de modelagem de CC voltados para o setor industrial, por meio de uma Revisão Sistemática (RS) dos estudos publicados entre 2019 e 2024. Os resultados, organizados com base em três questões norteadoras, permitiram a comparação de seis estudos selecionados, destacando suas aplicações práticas, vantagens e limitações. As conclusões evidenciam o potencial da CC em aplicações industriais e sua integração com as tecnologias emergentes. O trabalho também aponta os desafios e lacunas de pesquisa e as recomendações para práticas e pesquisas futuras.

Palavras-Chave: Computação Cognitiva — Processos de Modelagem — Revisão Sistemática — Aplicações Industriais

¹ Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial (MCTI), SENAI CIMATEC, Brasil

² Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil

*Corresponding author: sssergioss@yahoo.com.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.22456/2175-2745.146990> • Received: 20/04/2025 • Accepted: 26/12/2025

CC BY-NC-ND 4.0 - This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

1. Introdução

A discussão sobre análises de grandes bancos de dados, a exemplo dos *datacenters* das *big techs*, vem crescendo na última década [1], originando novos campos da computação para otimização de coleta, extração e análise de dados, bem como o subsídio às decisões

em setores como indústria, saúde, finanças, educação e marketing, por meio da identificação de padrões, previsões e personalização de experiências [2].

A partir do século XXI, delineou-se a área de CC, derivada de pesquisas de Inteligência Artificial (IA) e apoiada por métodos de aprendizagem, como aprendizado por reforço [3] e *Support Vector Machines* (SVM)

[4]. O termo Computação Cognitiva foi popularizado pela IBM em 2011 para descrever uma abordagem de IA centrada na simulação de processos cognitivos por meio de tecnologias como processamento de linguagem natural [5], aprendizado profundo [6] e visão computacional [7].

As origens da CC remontam às primeiras pesquisas em IA nas décadas de 1950 e 1960. Desde então, a área passou por avanços e retrocessos, com progressos graduais na construção de sistemas que emulam aspectos da inteligência humana, o que tem contribuído para o aumento de intervenções no setor industrial [2].

Este artigo apresenta uma Revisão Sistematizada (RS) sobre as aplicações da CC na indústria, motivada pela ausência de sínteses recentes que integrem, de forma comparativa, procedimentos metodológicos, aplicações e arquiteturas de modelos de CC. Considerando este objetivo, foram formuladas as seguintes questões norteadoras:

- Q1. Quais os procedimentos metodológicos e de desenvolvimento têm sido utilizados nas investigações que tratam da Computação Cognitiva para a indústria?
- Q2. Quais as aplicações relacionadas à Computação Cognitiva, no campo da indústria, foram evidenciadas na literatura?
- Q3. Como foram desenvolvidos os modelos de Computação Cognitiva aplicados à indústria?

A RS considerou artigos em periódicos qualificados e capítulos de livros publicados nos últimos cinco anos, com foco em investigações e desenvolvimentos tecnológicos que viabilizam a aplicação da CC no contexto industrial. Os resultados deste estudo são apresentados em cinco seções: Introdução; Metodologia; Sistematização e Análise dos Dados; Conclusão; e Considerações Finais sobre possibilidades e limites das aplicações da CC na indústria.

2. Metodologia

Com o objetivo de reunir as evidências empíricas que atendessem aos critérios de elegibilidade preestabelecidos e responder às questões específicas da pesquisa, foi aplicada a metodologia da Revisão Sistematizada da Literatura (RSL). Os métodos explícitos e sistemáticos selecionados foram utilizados para minimização do viés e produção de resultados mais confiáveis, para extração de conclusões e tomada de decisões [8, 9]. Neste estudo, uma pesquisa foi conduzida para identificar os trabalhos

relevantes que abordam o uso da CC para aplicações que podem ser utilizadas na indústria.

A pesquisa, realizada no período de 14/03/2024 a 12/04/2024, considerou trabalhos publicados entre 2019 e 2024, a partir de portais acadêmicos que acessam bases de dados de pesquisas (fontes de produção legitimadas), incluindo a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD), Edubase, ERIC, Google Acadêmico, IEEE Xplore, Oasisbr, ResearchGate, SciELO, Web of Science e WorldWideScience, e portal de periódicos CAPES. Foram utilizadas as seguintes palavras-chave, sem filtros: Cognitive Computing, Cognitive Computation e Computação Cognitiva. O protocolo utilizado na pesquisa é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Protocolo de pesquisa da RS

Objetivo	Identificar publicações sobre aplicações de CC na indústria.
Questões de pesquisa	Q1. Quais procedimentos metodológicos têm sido utilizados? Q2. Quais aplicações de CC aparecem na literatura industrial? Q3. Como são desenvolvidos os modelos cognitivos aplicados à indústria?
Bases de dados/ Portal de periódicos	BDTD, CAPES, Edubase, ERIC, Google Acadêmico, IEEE Xplore, Oasisbr, ResearchGate, SciELO, Web of Science e WorldWideScience.
Palavras-chave	Cognitive Computing, Cognitive Computation, Computação Cognitiva.
Filtros iniciais	Palavras-chave no título; ano de publicação de 2019 a 2024; publicação tipo artigo, tese, dissertação e capítulo de livro.
Exclusão (triagem)	Trabalhos sem relação com aplicação industrial, tipo de publicação não especificado, duplicado ou sem acesso ao texto completo.
Exclusão (elegibilidade)	Sem aplicação industrial, tipo de publicação não especificado, sem texto completo disponível ou idioma diferente de português ou inglês.
Classificação	Atendimento a duas ou três questões da pesquisa.

A primeira etapa da RS consistiu na definição dos descritores e dos critérios de inclusão e exclusão. Inicialmente, o total de 646 referências foram encontradas nas 10 bases de dados e no portal de periódicos. Durante a seleção, foram eliminados 20 trabalhos publicados antes de 2019, que não haviam sido detectados na fase anterior, além de 41 trabalhos duplicados encontrados nas diferentes fontes de pesquisa. Ao final desta etapa, 585 trabalhos foram selecionados.

No processo de triagem (primeira extração), foram

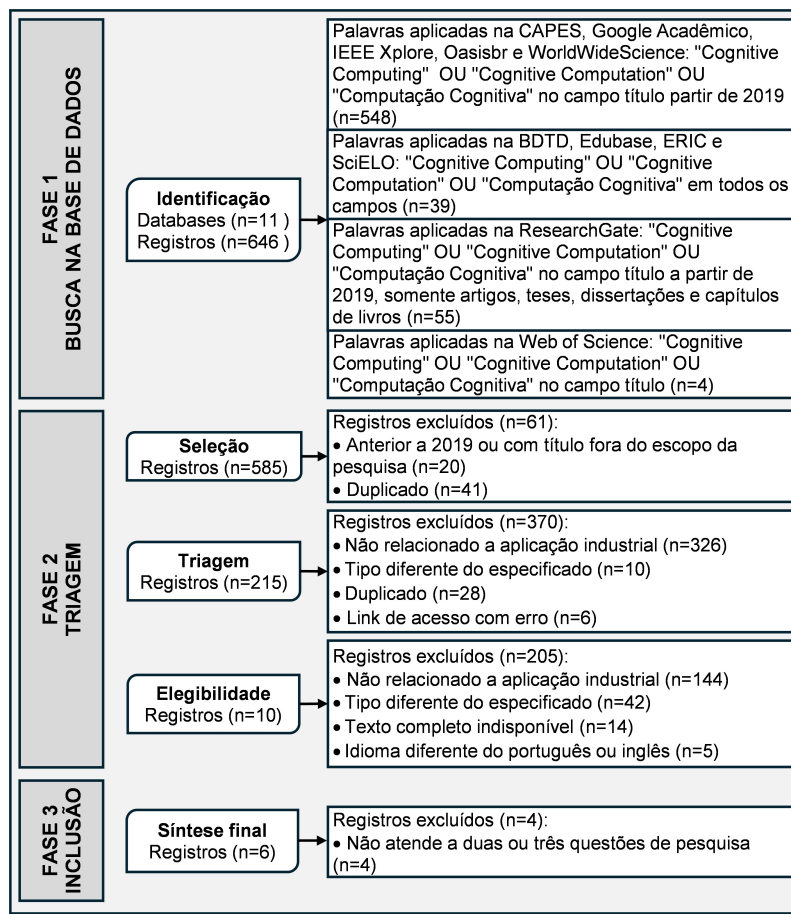


Figura 1. Fluxograma da Revisão Sistemática.

eliminados 370 trabalhos por quatro motivos principais: 326 por apresentarem tema fora do escopo, 10 por não corresponderem ao tipo especificado, 28 por estarem duplicados e 6 por apresentarem erro no link de acesso. Ao final desta etapa, 215 trabalhos foram escolhidos para leitura do resumo.

O fluxograma da primeira etapa da RS é apresentado na Figura 1.

Na etapa de elegibilidade, para seleção de artigos para leitura completa (segunda extração), foram eliminados 144 trabalhos por não estarem relacionados a aplicações industriais, 42 por não se enquadrarem no tipo especificado, 14 pela indisponibilidade do texto completo e 5 por não estarem escritos em inglês ou português.

Por fim, na fase de síntese qualitativa, dos 10 trabalhos inicialmente selecionados para leitura completa, apenas 6 foram incluídos na análise final. A exclusão de 4 artigos ocorreu porque eles não atenderam a pelo menos duas das três questões norteadoras da pesquisa. Em particular, esses estudos apresentaram limitações relacionadas a descrição dos procedimentos metodológicos, cla-

reza das aplicações industriais de CC ou ao detalhamento do desenvolvimento dos modelos cognitivos. Dessa forma, embora fossem relevantes em termos de temática geral, não forneciam evidências suficientes para responder de maneira consistente às questões de investigação propostas.

Os resultados desta leitura mais dirigida e focada nas questões norteadoras serão apresentados na próxima seção.

3. Sistematização e Análise de Dados

Com base na análise dos seis estudos selecionados, a Tabela 2 apresenta uma síntese comparativa que engloba os modelos propostos, suas aplicações industriais, metodologias de desenvolvimento, resultados principais, vantagens e limitações. Esta visão consolidada permite uma compreensão abrangente do estado atual da aplicação da CC no contexto industrial.

Tabela 2. Síntese comparativa dos estudos sobre Computação Cognitiva aplicada à indústria

Referência	Modelo / abordagem	Aplicação industrial	Metodologia de desenvolvimento	Principais resultados / desempenho	Vantagens	Limitações
Qu <i>et al.</i> (2021) [10]	Plataforma D2C: <i>Blockchain</i> + Aprendizado Federado	Manufatura inteligente (Indústria 4.0) - Privacidade e incentivo em compartilhamento de dados	Pesquisa experimental com simulação (CIFAR-10)	Superou abordagens existentes em precisão, resistência a ataques e eficiência	Descentralização, segurança cibernética, mecanismo de incentivo, robustez contra ataques	Risco de ataques não eliminado; desempenho pode cair com muitos dispositivos
Zhang <i>et al.</i> (2021) [11]	Modelos de Decisão de Três Vias (3WD) em ambientes <i>Fuzzy</i> <i>Pi</i> -tagóricos	Tomada de decisão industrial (gestão de risco, controle qualidade, logística)	Revisão Sistemática + desenvolvimento teórico	Abordagem mais precisa e prática para cenários reais; modelos de decisão de grupo robustos	Melhora precisão de funções de perda, melhor representação de incerteza, redução de riscos	Alta complexidade computacional; necessidade de dados muito precisos
Althobaiti <i>et al.</i> (2021) [12]	Sistema IDS BBFO-GRU para CPS industriais	Deteção de intrusões em Sistemas Ciberfísicos Industriais	Revisão Sistemática + pesquisa experimental (NSL-KDD 2015, CICIDS 2017)	98,10% acurácia média; 98,45% precisão; superou modelos NADAM-GRU, GRU e LSTM	Alta taxa de detecção e precisão	Dependência de dados de treinamento; complexidade computacional
Lee <i>et al.</i> (2022) [13]	Rede Geográfica de Dois Níveis (TTGN) com CC baseada em borda	Comunicação para ativos móveis em manufatura inteligente (IIoT)	Estado da Arte + pesquisa experimental (testes com servidor de borda, APs, smartphones)	98% taxa de sucesso (vs. 64% do HAN); estabelecimento rápido de caminhos de rede	Suporte à mobilidade, comunicação estável, segurança, melhor alocação de recursos	Não pode ser retreinado automaticamente; depende de infraestrutura de borda
Hoang <i>et al.</i> (2023) [14]	Computação Cognitiva Hiperdimensional (HCC) para FSW	Caracterização de propriedades mecânicas em soldagem por fricção	Pesquisa experimental (implementação em processo real)	Pontuação F1 de 0,899; superou SVM, Regressão Logística, Naive-Bayes e Perceptron Multicamadas	Fusão robusta de dados multivariáveis, aprendizado em passagem única, aplicação prática validada	Problemas de escalabilidade; custo computacional com alta dimensionalidade
Mi <i>et al.</i> (2022) [15]	Sistema C3S (Computação Conceitual-Cognitiva)	Classificação dinâmica para apoio à tomada de decisão	Revisão Sistemática + pesquisa experimental (14 conjuntos de dados)	91,03% precisão média em dados de alta dimensão; superior a ISVM, Learn++, OELM, INB, ISGD	Simula aprendizagem humana, lida com dados parcialmente rotulados	Problemas com desequilíbrio de classe; atualização lenta para grandes volumes de dados

3.1 Procedimentos metodológicos e de desenvolvimento utilizados nas investigações que tratam da CC para a indústria (Q1)

A RSL resultou na análise final de seis produções que partiram de procedimentos metodológicos distintos.

- três artigos utilizaram Revisão Sistemática [10, 11, 12];
- um estado da arte das tecnologias [13];
- dois partiram para uma pesquisa experimental, sem ter os dispositivos de Revisão Sistemática e estado da arte das tecnologias como etapas metodológicas [14, 15].

Os resultados dos estudos realizados subsidiaram os seguintes desenvolvimentos:

- elaboração de proposta de um novo esquema de rede, que integra a computação de borda, o uso de técnicas de aprendizado profundo, a aplicação da teoria de jogos, o desenvolvimento da arquitetura e avaliação de desempenho, culminando com a proposição do modelo de Rede Geográfica de Dois Níveis (TTGN, do inglês *Two Tier Geographical Network*), que trata de CC para indústria [13];
- proposta, desenvolvimento do modelo, implementação técnica, simulação e avaliação e análise dos resultados de modelo para aprendizado fede-

rado em ilhas de dados [10];

- c) modelagem com a Computação Cognitiva Hiperdimensional (HCC, do inglês *Hiperdimensional Cognitive Computing*), a partir da codificação dos dados, aprendizado, predição, comparação com outros modelos e análise experimental para avaliação do desempenho do modelo [14];
- d) criação de modelo de Decisão de Três Vias (3WD, do inglês *Three-Way Decision*) em ambientes de conjuntos *Fuzzy* Pitagóricos [11];
- e) criação de modelo de Sistema de Computação Conceitual-Cognitiva (C3S, do inglês, *Concept-Cognitive Computing System*) para uso com *big data* na classificação dinâmica em ambientes com dados parcialmente ou completamente rotulados [15];
- f) desenvolvimento de modelo para Sistema de Detecção de Intrusões (IDS, do inglês *Intrusion Detection System*) baseado em CC para Sistemas Ciberfísicos Industriais (CPSs, do inglês *Cyber-Physical Systems*) [12].

Com exceção do modelo de Hoang *et al.* [14], que após a validação foi implementado em um processo real, e o de Zhang *et al.* [11], que tratou do desenvolvimento teórico como proposta de modelo de decisão, não tendo sido feitas simulações ou aplicação prática, os demais modelos foram avaliados através de simulações utilizando infraestrutura experimental ou base de dados do mundo real.

O modelo de Lee *et al.* [13] foi testado com um servidor de borda, Pontos de Acesso (APs, do inglês *Access Points*), nó estacionário com sinal de *beacon* (referência) e smartphones. O modelo de Althobaiti *et al.* [12] foi testado utilizando base de dados obtida no Canadian Institute for Cybersecurity. Os modelos de Qu *et al.* [10] e Mi *et al.* [15] foram validados a partir de base de dados pública de aprendizado de máquina e de universidades.

Os dados apresentados indicam um número ainda reduzido de pesquisas na área de CC com aplicações para a indústria, com limitada quantidade de artigos de modelos que foram validados por simulações, mas a maioria não foi implementada em aplicações práticas, resultando apenas em publicações científicas.

3.2 Aplicações relacionadas à CC para a indústria evidenciadas na literatura (Q2)

Rede Geográfica de Dois Níveis De acordo com Lee *et al.* [13], um sistema de TTGN para a Internet Industrial das Coisas (IIoT, do inglês *Industrial*

Internet of Things) pode ser implementado com CC baseada em borda. A TTGN é concebida para melhorar a comunicação confiável e de baixa latência de ativos móveis em ambientes de manufatura inteligente.

A proposta dos autores Lee *et al.* [13] é uma resposta às limitações das atuais Redes de Sensores Industriais Sem Fio (IWSNs, do inglês *Industrial Wireless Sensor Networks*), como o WirelessHART, que não suportam adequadamente a mobilidade dos ativos. A TTGN utiliza uma arquitetura de dois níveis, composta por um nível de computação de borda, que realiza a detecção de mobilidade e alocação de recursos com base em redes neurais profundas, e um nível de IWSN, que trata da consulta de posição e estabelecimento de caminhos de rede. A computação de borda permite o processamento de dados mais próximo dos campos de serviço, oferecendo respostas mais rápidas e seguras.

A Figura 2, adaptada de Lee *et al.* [13], ilustra a arquitetura TTGN sobre a IWSN.

O modelo criado a partir desta metodologia finalmente pôde ser utilizado para aplicação em tempo real. A partir da proposta do novo esquema de rede, as etapas do modelo foram a integração de computação de borda, uso de técnicas de aprendizado profundo, aplicação da teoria de jogos, desenvolvimento de uma arquitetura de duas camadas e avaliação de desempenho.

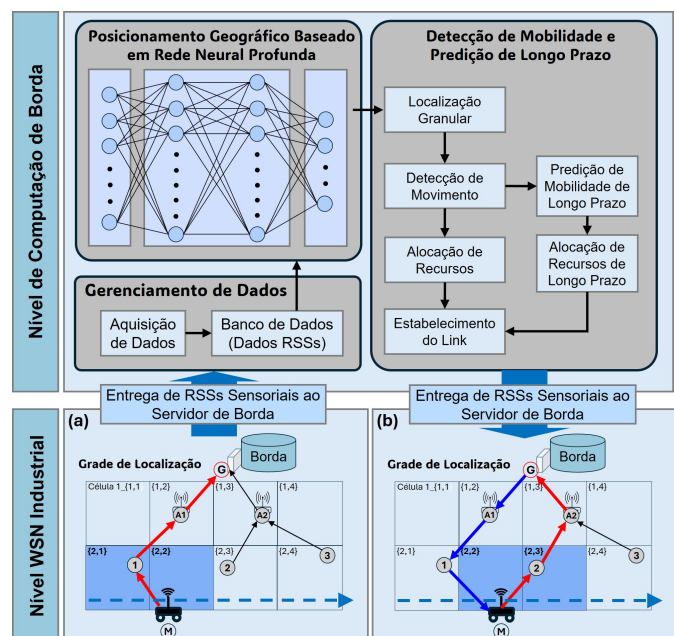


Figura 2. Arquitetura TTGN sobre a IWSN (adaptada de Lee *et al.* [13], p. 22241).

O trabalho de Lee *et al.* [13] tem como características o suporte à mobilidade de ativos de uma planta industrial de manufatura inteligente, que utiliza por

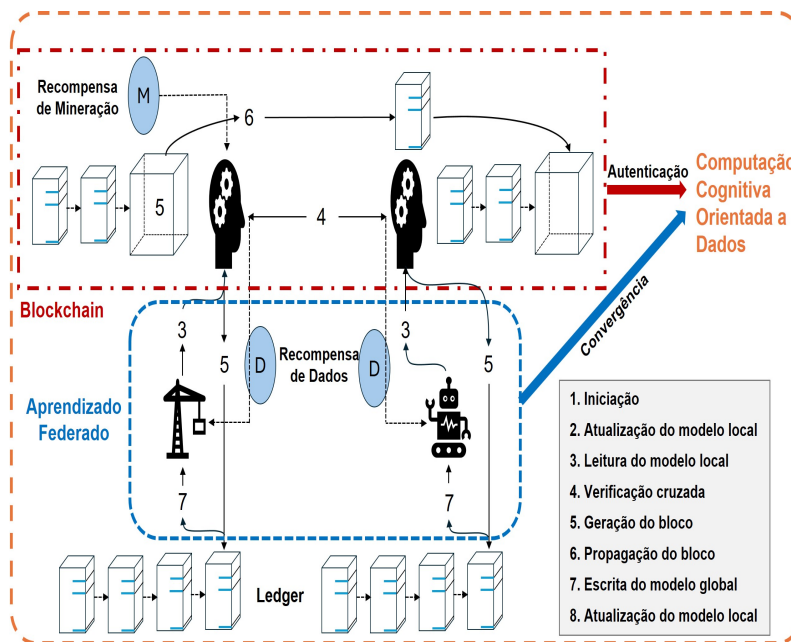


Figura 3. Visão geral da CC usando o aprendizado federado (adaptada de Qu *et al.* [10], p. 3).

exemplo, Veículos Auto Guiados (AGVs, do inglês *Auto Guided Vehicles*), que percorrem a extensão da planta para realizar tarefas de entrega e coleta de materiais, com comunicação com o sistema de controle, onde tecnologias atuais de redes industriais, como WirelessHART, oferecem poucos recursos no aporte a ativos móveis, proporcionando comunicação estável, computação de borda, melhor alocação de recursos, desempenho da rede e segurança.

Computação Cognitiva orientada por big data Segundo Qu *et al.* [10], o uso combinado de aprendizado federado (*machine learning* descentralizado) e *blockchain* (tecnologia de registro distribuído que permite armazenar dados de forma descentralizada) como uma nova estrutura para a CC impulsionada por dados na Indústria 4.0 pode ser utilizado para a solução de problemas críticos de eficiência, vazamento de privacidade e incentivo insuficiente para a contribuição de dados, que são desafios significativos no cenário de manufatura inteligente.

A inovação, um paradigma descentralizado para CC Orientada por Big Data (D2C, do inglês *Big Data-Driven Cognitive Computing*), reside na combinação do aprendizado federado, que preserva a privacidade ao permitir que os modelos sejam treinados localmente e apenas as atualizações sejam compartilhadas, com a tecnologia *blockchain*, que garante descentralização, resistência a ataques de envenenamento e mecanismos de incentivo.

A proposta de Qu *et al.* [10] tem semelhança com o trabalho de Lee *et al.* [13] no que se refere à

aplicação em manufatura inteligente, porém é destinado à utilização com ativos não móveis. Ambos oferecem o conceito de computação de borda, que promove a descentralização para melhores níveis de segurança e desempenho.

A Figura 3 ilustra a visão geral da CC baseada em dados usando o aprendizado federado habilitado para *blockchain* na Indústria 4.0, adaptada de Qu *et al.* [10]. A CC é alcançada por meio de aprendizagem federada, enquanto que o *blockchain* é aproveitado como a arquitetura subjacente, de forma que vários desempenhos podem ser melhorados, como precisão e segurança.

Preparação de conjuntos de dados de rugosidade de superfície no contexto da manufatura inteligente e Computação Cognitiva Para Hoang *et al.* [14], dentro do contexto de manufatura inteligente, a HCC pode ser utilizada na caracterização das propriedades mecânicas no processo de Soldagem por Fricção e Agitação (FSW, do inglês *Friction Stir Welding*). Este método foi desenvolvido para superar a baixa precisão, eficiência de amostra e falta de interpretação das técnicas de aprendizado de máquina convencionais.

A HCC pode ser considerada uma subcategoria em um campo mais abrangente da CC, sendo neste trabalho de Hoang *et al.* [14] aplicada para simular funções cerebrais humanas na integração de dados de torque, força e potência, proporcionando um aprendizado robusto e eficiente para a caracterização das propriedades do processo. A estratégia de utilização de técnicas de aumento

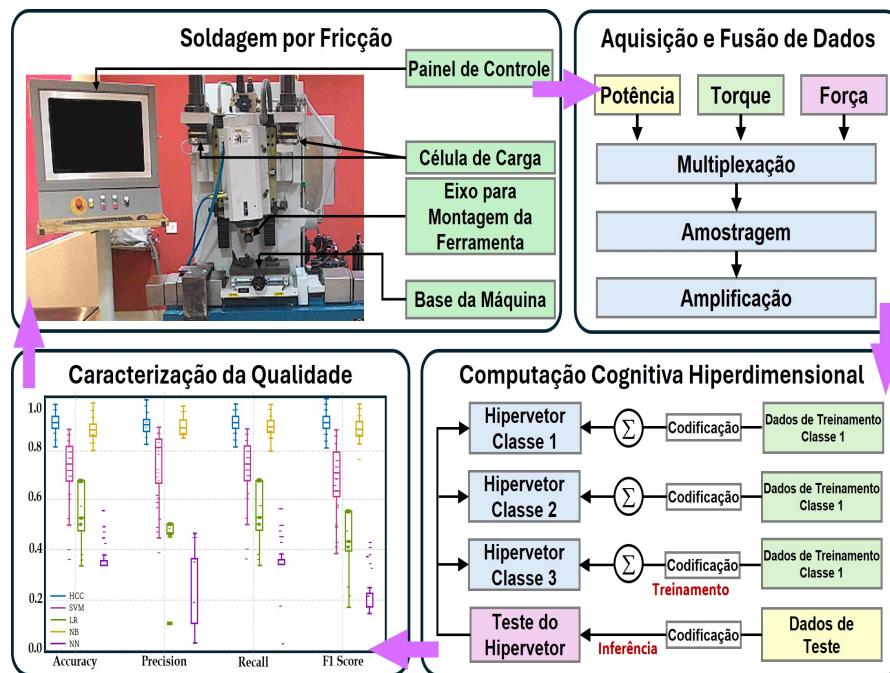


Figura 4. Fluxograma da metodologia proposta para fusão de dados e CC (adaptada de Hoang *et al.* [14], p. 3).

de dados foi extremamente importante para contornar a escassez de amostras reais, face à dificuldade de sua obtenção, comum neste tipo de processo.

O uso da HCC, proposto por Hoang *et al.* [14], proporciona diversas vantagens para a aplicação industrial específica de soldagem por fricção, com benefícios para o controle de qualidade pela detecção preditiva de falhas e desgaste de ferramentas, melhor eficiência e confiabilidade pelo uso da representação holográfica e redução de custos no processo de treinamento em passagem única.

A Figura 4 mostra o fluxograma da metodologia proposta para fusão de dados e CC para caracterização de propriedades mecânicas no processo de FSW, adaptada de Hoang *et al.* [14].

Modelos de Decisão de Três Vias de Computação Cognitiva em ambientes Fuzzy Pitagóricos Zhang *et al.* [11] sugeriram a criação de modelos de 3WD em ambientes de conjuntos Fuzzy Pitagóricos, introduzindo funções de perda com base em três descrições: adesão, não adesão e hesitação. As decisões de três vias são uma estratégia de CC que visa minimizar riscos ao permitir que decisões sejam adiadas até que informações suficientes sejam obtidas.

O trabalho de Zhang *et al.* [11] propõe a redefinição de funções de perda esperadas, permitindo maior ênfase da incerteza no processo de tomada de decisão e introduz quatro estratégias baseadas na teoria de decisão de risco mínimo de Bayes. A análise de dados de Zhang

et al. [11], utilizando diferentes parâmetros, confirma a viabilidade dos modelos de 3WDs.

A modelagem de 3WD, de Zhang *et al.* [11], proporciona melhoria nas tomadas de decisão, predominantemente necessárias nas plantas industriais, onde algumas decisões necessitam ser tomadas mesmo com informações parciais, com índice de riscos minimizados, por um sistema flexível e adaptável ao ambiente, para obtenção de melhores resultados e eficiência operacional.

Sistema de Computação Conceitual-Cognitiva para classificação dinâmica Mi *et al.* [15] propuseram um novo modelo de C3S para aprendizagem de classificação dinâmica em ambientes com dados parcialmente ou completamente rotulados, para utilização com *big data*, na mineração de dados e apoio à tomada de decisões.

A Figura 5, adaptada de Mi *et al.* [15], apresenta a estrutura geral do C3S.

O sistema C3S simula processos de aprendizagem humana para integração de novas informações com o conhecimento existente, a partir da utilização de mecanismo de armazenamento de conhecimento com informações estruturais e classificação dinâmica em sistemas inteligentes de apoio à decisão.

Detecção de Intrusão baseada em Computação Cognitiva para Sistemas Ciberfísicos Industriais Althobaiti *et al.* [12] propuseram o desenvolvimento de um IDS baseado em CC para CPS, denominado BBFO-

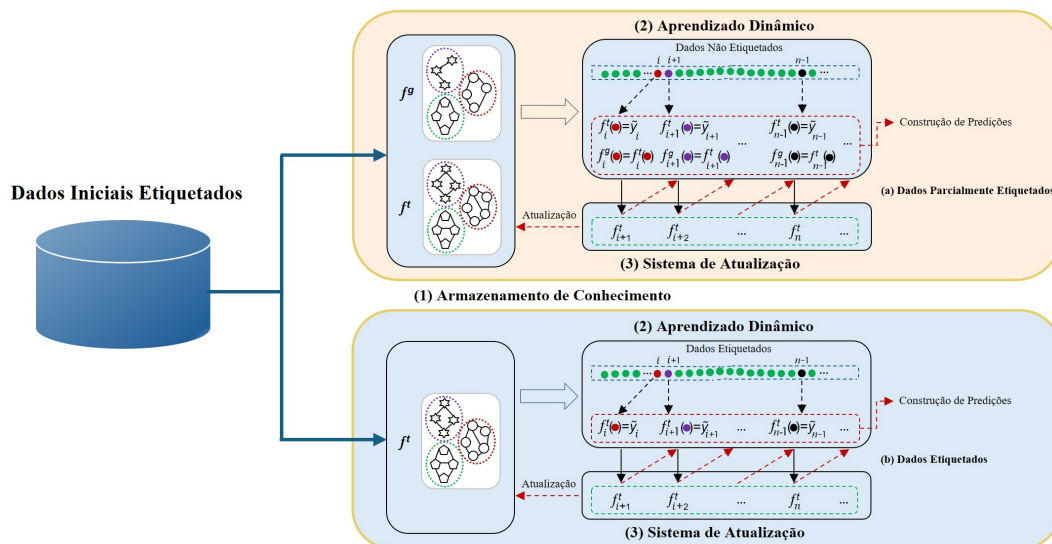


Figura 5. Estrutura geral do C3S (adaptada de Mi *et al.* [15], p. 291).

GRU, que integra a Otimização de Forrageamento Bacteriano Binário (BBFO, do inglês *Binary Bacterial Foraging Optimization*) para seleção de características e um modelo de Unidade Recorrente com Portas (GRU, do inglês *Gated Recurrent Unit*) para classificação, com otimização de hiperparâmetros usando o otimizador NADAM (do inglês *Nesterov-accelerated Adaptive Moment Estimation*).

Em comparação com outros modelos, o modelo BBFO-GRU demonstrou melhor desempenho quando comparado com os modelos NADAM-GRU, GRU e LSTM (do inglês *Long Short-Term Memory*).

As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a estrutura da GRU e o fluxograma do algoritmo BFO, adaptadas de Althobaiti *et al.* [12].

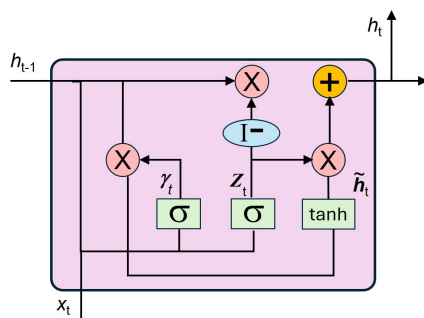


Figura 6. Estrutura da GRU (adaptada de Althobaiti *et al.* [12], p. 5).

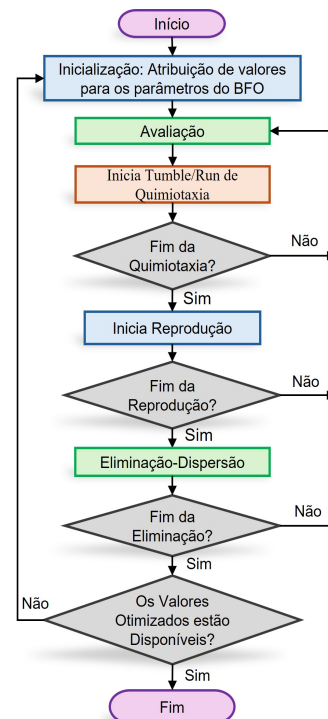


Figura 7. Fluxograma do algoritmo BFO (adaptada de Althobaiti *et al.* [12], p. 5).

3.3 Histórico sobre o desenvolvimento de modelos de Computação Cognitiva aplicados à indústria (Q3)

Em resposta à questão sobre como os modelos de CC foram desenvolvidos para aplicações industriais, a análise dos seis estudos selecionados revela padrões metodológicos que podem ser agrupados em três categorias principais, conforme sintetizado na Tabela 3.

Tabela 3. Categorização das abordagens de desenvolvimento dos modelos de CC analisados

Categoria de desenvolvimento	Referências	Características principais	Objetivo industrial primário
1. Treinamento <i>offline</i> para execução <i>online</i>	Lee <i>et al.</i> (2022) [13], Hoang <i>et al.</i> (2023) [14]	Modelos treinados com dados históricos/simulados e posteriormente implantados para operação em tempo real, sem necessidade de retreinamento contínuo.	Otimização de desempenho e latência em processos contínuos (comunicação de ativos móveis, soldagem).
2. Integração de Tecnologias de Registro Distribuído (DLT) e aprendizado descentralizado	Qu <i>et al.</i> (2021) [10], Althobaiti <i>et al.</i> (2021) [12]	Combinação de <i>blockchain</i> e aprendizado federado para garantir segurança, privacidade, descentralização e resistência a ataques em ambientes de dados distribuídos.	Segurança cibernética e colaboração segura de dados na Indústria 4.0.
3. Modelagem teórico-conceitual para tomada de decisão sob incerteza	Zhang <i>et al.</i> (2021) [11], Mi <i>et al.</i> (2022) [15]	Desenvolvimento de <i>frameworks</i> teóricos ou baseados em conceitos para simular processos cognitivos humanos como hesitação e aprendizado dinâmico.	Apoio à decisão em gestão de riscos, classificação e análise de cenários complexos.

Abordagem *offline* para *online* Predominante em aplicações que demandam baixa latência e alta confiabilidade, o trabalho de Lee *et al.* [13] exemplifica esta categoria ao empregar Redes Neurais Profundas (DNNs, do inglês *Deep Neural Networks*) para treinar um modelo de alocação de recursos e roteamento em uma TTGN, que é implantado para operar em tempo real na borda da rede. De forma similar, Hoang *et al.* [14] utilizaram a HCC para criar um modelo preditivo para soldagem por fricção, treinado *offline* com dados de sensores e depois utilizado para caracterização *online* de propriedades mecânicas. A principal vantagem é a eficiência operacional, enquanto a limitação comum é a falta de mecanismos de adaptação automática a mudanças no ambiente.

Abordagem com Tecnologias de Registro Distribuído e aprendizado descentralizado Esta categoria surge como resposta aos desafios de segurança e privacidade de dados em ecossistemas industriais distribuídos. O modelo de Qu *et al.* [10] integra *blockchain* e aprendizado federado para criar uma plataforma de CC orientada por *big data* que preserva a privacidade, incentiva a participação e é resistente a ataques. Por sua vez, Althobaiti *et al.* [12] focaram na segurança perimetral, desenvolvendo um IDS que combina técnicas de otimização e Redes Neurais Recorrentes (RNNs, do inglês *Recurrent Neural Networks*). O denominador comum é a arquitetura descentralizada, que elimina pontos únicos de falha e mitiga riscos de vazamento de dados.

Abordagem teórico-conceitual para tomada de decisão Focada em expandir as capacidades fundamen-

tais da CC para lidar com a ambiguidade e a evolução do conhecimento, Zhang *et al.* [11] avançaram a teoria de decisão *fuzzy* ao propor modelos de três vias em ambientes pitagóricos, formalizando matematicamente a hesitação para melhorar a gestão de riscos. Mi *et al.* [15] propuseram um C3S que simula a formação e atualização de conceitos para classificação dinâmica, aproximando-se do aprendizado humano. Esses trabalhos oferecem bases teóricas sólidas para futuras implementações práticas, ainda que sua validação imediata em ambientes industriais complexos permaneça um desafio.

A síntese evidencia a tendência de modelos que priorizam a segurança pela descentralização e a eficiência operacional através de processamento na borda e modelos pré-treinados. No entanto, há uma lacuna significativa em modelos que conjuguem essas características com capacidades de adaptação contínua e autônoma a mudanças nos processos industriais, apontando uma direção valiosa para pesquisas futuras.

4. Conclusão

Os procedimentos metodológicos identificados nas investigações sobre CC para a indústria incluem Revisão Sistemática, Estado da Arte das Tecnologias, coleta e seleção de dados, desenvolvimento de modelos, simulação e avaliação dos resultados.

As aplicações relacionadas à CC, evidenciadas na literatura, concentram-se principalmente em computação de borda, análise de propriedades mecânicas e modelos de suporte à tomada de decisão em ambientes industriais.

Em linhas gerais, os modelos de CC aplicados à indústria foram desenvolvidos a partir de técnicas de

treinamento *offline*, combinações com aprendizado profundo, aplicação da teoria de jogos e arquitetura em duas camadas, uso da HCC, modelagem com conjuntos *Fuzzy* Pitagóricos e teoria de decisão baseada no mínimo de Bayes, aprendizagem dinâmica com espaços conceituais e o modelo híbrido BBFO-GRU de otimização e classificação. Entre os modelos analisados, destacam-se como mais promissores: o TTGN [13], pela aplicação da CC baseada em borda para ativos móveis em ambientes industriais; o aprendizado federado com *blockchain* [10], pela descentralização e robustez contra ataques em cenários de Indústria 4.0; o uso da HCC em soldagem por fricção [14], pela validação prática e potencial de expansão para manufatura aditiva e subtrativa; e o modelo híbrido IDS BBFO-GRU [12], pela alta eficiência na detecção de intrusões em CPS industriais. Esses modelos se aplicam em contextos distintos de redes industriais inteligentes [13], processamento distribuído de dados [10], controle de qualidade em processos complexos [14] e segurança de sistemas ciberfísicos [12].

Apesar dos avanços, persistem limitações relevantes, como a dependência de infraestrutura de computação de borda, a complexidade computacional elevada, a ausência de validação prática em ambientes industriais reais e a falta de mecanismos de adaptação automática dos modelos. Há também paradigmas a serem superados, como a excessiva preocupação com segurança, dúvidas quanto à confiabilidade e custos de implementação, além da escassez de benchmarks padronizados e da integração insuficiente com sistemas industriais consolidados.

Como direções futuras, destacam-se a validação prática em ambientes industriais reais, superando a predominância de simulações; a definição de padrões abertos para interoperabilidade e integração; a exploração de bases de conhecimento externas e APIs; a redução da complexidade computacional; o desenvolvimento de técnicas de retreinamento automático para adaptação contínua; e a aplicação em novos domínios industriais, como manufatura aditiva, manutenção preditiva e análise de falhas em tempo real.

Embora o número final de estudos analisados tenha sido reduzido, a decisão de manter apenas os seis artigos que cumpriram integralmente os critérios estabelecidos garantiu maior rigor metodológico e coerência na síntese qualitativa. Essa limitação não comprometeu a revisão, mas evidencia a escassez de trabalhos sistemáticos sobre CC na indústria entre 2019 e 2024 e reforça a necessidade de ampliar estratégias de busca e fortalecer a caracterização do estado da arte.

5. Considerações Finais

A aplicação da CC na indústria apresenta avanços relevantes, mas ainda enfrenta limitações importantes. Entre elas, destacam-se a dependência de infraestrutura de computação de borda, a elevada complexidade computacional, a ausência de validação prática em ambientes reais e a falta de mecanismos de adaptação automática.

Estes obstáculos reforçam a necessidade de avanços em validação prática em cenários industriais, definição de padrões abertos para interoperabilidade, integração com sistemas industriais consolidados, redução da complexidade computacional e desenvolvimento de técnicas de retreinamento automático. Também se evidenciam oportunidades em novos domínios industriais, como manufatura aditiva, manutenção preditiva e análise de falhas em tempo real.

A escassez de trabalhos sistemáticos sobre CC na indústria reforça a importância de se ampliar as estratégias de busca para consolidar a CC como ferramenta estratégica para a transformação digital industrial.

Contribuição dos autores

Sérgio Santos Silva: Responsável pelo levantamento de dados, leitura dos títulos, resumos e artigos selecionados na íntegra, além da edição e preparação das versões do manuscrito. Lynn Rosalina Gama Alves: Responsável pela definição da metodologia, supervisão do estudo, revisão crítica do conteúdo e validação das versões finais.

Referências

- [1] AGGARWAL, L.; CHAHAL, D.; KHARB, L. Pruning deficiency of big data analytics using cognitive computing. In: *International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3)*. Lakshmangarh, India: Mody University of Science and Technology, 2020. p. 1–8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICONC345789.2020.9117504>>.
- [2] MURRAY, B. *Cognitive Computing: Revolutionizing Problem-Solving and Decision-Making through Artificial Intelligence*. [S.I.]: May Reads, 2024.
- [3] WATKINS, C. J.; DAYAN, P. Q-learning. *Machine Learning*, v. 8, n. 3-4, p. 279–292, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00992698>>.
- [4] CORTES, C.; VAPNIK, V. Support-vector networks. *Machine Learning*, v. 20, p. 273–297, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1022627411411>>.

- [5] MNIH, A.; ZHANG, Y.; HINTON, G. E. Improving a statistical language model through non-linear prediction. *Neurocomputing*, v. 72, n. 7-9, p. 1414–1418, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2008.12.025>>.
- [6] BENGIO, Y. Learning deep architectures for AI. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, v. 2, n. 1, p. 1–127, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1561/22000000006>>.
- [7] NEWCOMBE, R. A. *et al.* Kinectfusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Basel, Switzerland: [s.n.], 2011. p. 127–136. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092378>>.
- [8] ANTMAN, E. M. *et al.* A comparison of results of meta-analyses of randomized control trials and recommendations of clinical experts. *JAMA*, v. 268, n. 2, p. 240–248, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1001/jama.1992.03490020088036>>.
- [9] OXMAN, A. D.; GUYATT, G. H. The science of reviewing research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 703, p. 125–134, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb26342.x>>.
- [10] QU, Y. *et al.* A blockchained federated learning framework for cognitive computing in industry 4.0 networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 4, p. 2964–2973, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TII.2020.3007817>>.
- [11] ZHANG, S. P. *et al.* Three-way decision models of cognitive computing in pythagorean fuzzy environments. *Cognitive Computation*, v. 14, p. 81–93, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12559-021-09867-0>>.
- [12] ALTHOBAITI, M. M. *et al.* An intelligent cognitive computing based intrusion detection for industrial cyber-physical systems. *Measurement*, v. 186, p. 110145, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110145>>.
- [13] LEE, S. H. *et al.* Ttgn: Two-tier geographical networking for industrial internet of things with edge-based cognitive computing. *IEEE Access*, v. 10, p. 22238–22246, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153726>>.
- [14] HOANG, D. *et al.* Data fusion cognitive computing for characterization of mechanical property in friction stir welding process. In: *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC-CIE)*. Boston, MA, USA: ASME, 2023. p. V002T02A055. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/DETC2023-117184>>.
- [15] MI, Y. *et al.* Concept-cognitive computing system for dynamic classification. *European Journal of Operational Research*, v. 301, p. 287–299, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.003>>.