

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS BRITES TEIXEIRA CORDEIRO

**UMA APLICAÇÃO DA LÓGICA PARACONSISTENTE PARA A AVALIAÇÃO
DIAGNÓSTICA DOS NÍVEIS DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 5.0**

CURITIBA

2025

LUCAS BRITES TEIXEIRA CORDEIRO

**UMA APLICAÇÃO DA LÓGICA PARACONSISTENTE PARA A AVALIAÇÃO
DIAGNÓSTICA DOS NÍVEIS DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 5.0**

**An Application of Paraconsistent Logic for the Diagnostic Assessment of
Industry 5.0 Maturity Levels**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de controle e automação do Curso de Bacharelado em Engenharia de controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Orientador(a): Prof. Me. Paulo Rogério da Silveira

CURITIBA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IA	Inteligência Artificial
IAx	Inteligência Artificial Explicável
IoT	<i>Internet of Things</i>
LPA2v	Lógica paraconsistente duplamente anotada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	Tema	4
1.2	Delimitação do Tema	5
1.3	Problema	5
1.4	Objetivos	6
1.4.1	Objetivo Geral	6
1.4.2	Objetivos Específicos	6
1.5	Justificativa	6
1.6	Metodologia	6
1.7	Estrutura do Trabalho	7
2	INDÚSTRIA 5.0	8
2.1	Histórico das Revoluções Industriais	8
2.2	Limitações da Indústria 4.0	8
2.3	Modelo da Indústria 5.0	9
2.4	Indicadores e Métricas da Indústria 5.0	9
2.5	Relação entre Sociedade 5.0 e Indústria 5.0	10
2.6	Pilares da Indústria 5.0	10
2.6.1	Centralidade no ser humano	10
2.6.2	Sustentabilidade	11
2.6.3	Resiliência	12
2.7	Tecnologias aderentes a Indústria 5.0.....	13
2.7.1	Inteligência Artificial Centrada no Humano	14
2.7.2	Internet das Coisas e Sistemas Ciberfísicos	14
2.7.3	Robôs Colaborativos	15
	REFERÊNCIAS.....	16

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

A Indústria 5.0 representa a evolução do paradigma da Indústria 4.0, estendendo o foco exclusivo na automação e eficiência operacional para integrar dimensões socioeconômicas. Esse novo paradigma industrial prioriza a colaboração entre humanos e máquinas, mas centrada na busca da valorização da criatividade humana. Dessa forma, desenvolvendo ambientes de trabalho mais saudáveis, estimulando o trabalho criativo e colaborativo e integrando valores éticos e sociais aos processos industriais. Os outros pilares da Indústria 5.0 incluem sustentabilidade e resiliência utilizando a tecnologia como meio de ampliar as capacidades humanas.

O conceito "Indústria 5.0" ganhou destaque em documentos estratégicos da União Europeia desenvolvidos por Breque, Nul e Petridis (2021), que enfatizam a necessidade de sistemas industriais resilientes, sustentáveis e centrados nas pessoas. Essa mudança de modelo industrial reflete o reconhecimento de que desafios contemporâneos, como mudanças climáticas, envelhecimento populacional e escassez de recursos, exigem um novo modelo de produção, mais sensível às necessidades humanas e ambientais. A proposta da Indústria 5.0 envolve um redesenho do sistema produtivo, no qual a tecnologia é utilizada como meio para potencializar as capacidades humanas, promovendo um ambiente de produção que integre valores éticos às operações industriais. Esse novo paradigma demanda transformações organizacionais profundas, deslocando o foco exclusivo da produtividade para a criação de valor social.

Nesse contexto, torna-se necessário avaliar em que medida as organizações estão prontas para essa transformação. A mensuração do grau de maturidade organizacional frente à Indústria 5.0 possibilita identificar lacunas estruturais, definir diretrizes de transformação e orientar políticas industriais. A maioria dos modelos de avaliação de maturidade existentes ainda se fundamenta nas premissas da Indústria 4.0, priorizando a maturidade tecnológica e negligenciando dimensões como sustentabilidade e ética digital (Lucato *et al.*, 2019; Hein-pensel *et al.*, 2023). Assim, surge a necessidade de instrumentos mais aderentes à realidade da Indústria 5.0. Hein-Pensel *et al.* (2023) realizaram uma revisão sistemática da literatura e identificaram que, embora existam diversos modelos de maturidade voltados à Indústria 4.0, a maioria negligencia os pilares essenciais como bem-estar dos trabalhadores, inclusão social e responsabilidade ambiental. Por isso, a avaliação de maturidade nesse novo cenário apresenta desafios como a ausência de modelos consolidados, critérios qualitativos subjetivos e a coexistência de elementos contraditórios.

Além disso, o modelo proposto por Baro, Mira-Solves e Verdú-Jover (2025), fundamentado na Teoria Sociotécnica desenvolvida por Trist (1981), representa um avanço ao integrar quatro perspectivas interdependentes: estratégia sistêmica, sustentabilidade, centralidade no ser humano e resiliência. Essa abordagem holística oferece a granularidade necessária para traduzir os princípios de alto nível da Indústria 5.0 e da Teoria Sociotécnica em um modelo estruturado e permite que as organizações avaliem seu estado atual de implementação da

Indústria 5.0 e alinham suas estratégias com suas capacidades, recursos e objetivos atuais. Além disso, os autores destacam a escassez de modelos práticos e a necessidade de desenvolvimento de ferramentas de diagnóstico que considerem os fatores humanos e sociais como fatores essenciais do processo de avaliação de maturidade.

Um instrumento diagnóstico que é capaz de representar e processar informações contraditórias, permitindo, assim, capturar a complexidade sociológica desse novo paradigma industrial, pode ser a Lógica Paraconsistente. Essa abordagem lógica permite a tomada de decisões mesmo diante de inconsistências ou dados conflitantes. Existem aplicações da LPA2v /TODO em sistemas de controle, inteligência artificial e diagnósticos, especialmente na área médica, demonstram sua robustez frente a incertezas e contradições (Filho, 1999; Carvalho; Brunstein; Abe, 2003; de Carvalho Junior *et al.*, 2024).

1.2 Delimitação do Tema

A presente pesquisa concentra-se no desenvolvimento de um instrumento diagnóstico para a avaliação de maturidade da Indústria 5.0, com um recorte metodológico específico na aplicação da Lógica paraconsistente duplamente anotada (LPA2v). O escopo do trabalho abrange a definição dos critérios de avaliação alinhados aos pilares da Indústria 5.0, a estruturação de um algoritmo de análise baseado na LPA2v e o desenvolvimento de um instrumento diagnóstico. Restringir a metodologia ao uso da LPA2v, visa explorar sua capacidade de representar critérios muitas vezes subjetivos ou contraditórios, como bem-estar dos trabalhadores ou equilíbrio entre automação e autonomia humana. Diversos estudos mostram que os modelos de maturidade atuais, mesmo os que começam a considerar a Indústria 5.0, ainda carecem de instrumentos formais capazes de lidar com a complexidade socio-técnica desse novo paradigma (Baro; Mira-solves; Verdú-jover, 2025; Hein-pensel *et al.*, 2023). Assim, propõe-se investigar a suficiência da LPA2v como base para representação e análise da maturidade organizacional em termos dos pilares da Indústria 5.0 como human-centricidade, sustentabilidade e resiliência.

1.3 Problema

Os instrumentos atualmente disponíveis para avaliação de maturidade organizacional foram concebidos majoritariamente sob a lógica da Indústria 4.0 e permanecem centrados em critérios técnico-operacionais. Essa lacuna é evidenciada por Hein-Pensel *et al.* (2023), que mostram que poucos modelos existentes contemplam dimensões qualitativas cruciais da Indústria 5.0, como bem-estar dos trabalhadores, ética digital e impacto socioambiental.

Neste cenário, a LPA2v apresenta-se como uma alternativa formal viável para representar esses estados de evidência conflitante, viabilizando análises diagnósticas mesmo sob condições de incerteza (Filho, 2006; Carvalho; Brunstein; Abe, 2003; de Carvalho Junior *et al.*, 2024). No entanto, observa-se que ainda não existem modelos específicos de avaliação diagnóstica da maturidade em Indústria 5.0 fundamentados na LPA2v. Dessa forma, discutimos a

aplicação da LPA2v para desenvolver um instrumento diagnóstico capaz de avaliar os níveis de maturidade de uma organização frente às dimensões da Indústria 5.0.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um instrumento diagnóstico, utilizando a LPA2v, para avaliação dos níveis de maturidade da Indústria 5.0 em organizações industriais.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisar os modelos de avaliação de maturidade existentes tanto para a Indústria 4.0 quanto para indústria 5.0;
- Identificar e estruturar os critérios e dimensões relevantes para diagnóstico de maturidade na Indústria 5.0;
- Modelar os critérios e dimensões selecionados utilizando a LPA2v;
- Propor um algoritmo para-analisador, baseado em LPA2v, capaz de interpretar e classificar os níveis de maturidade.
- Aplicar o modelo proposto em um estudo de caso, validando sua capacidade de gerar diagnósticos sob condições de incerteza e contradição;

1.5 Justificativa

Como a LPA2v é capaz de lidar formalmente com incertezas e contradições, o modelo proposto busca suprir uma lacuna metodológica e atender à demanda por ferramentas avaliativas mais alinhadas aos novos princípios industriais. A contribuição esperada é tanto teórica, expandindo o campo de aplicação da LPA2v, quanto prática, ao oferecer um modelo aplicável em contextos organizacionais reais que buscam se alinhar às diretrizes da emergente Indústria 5.0.

1.6 Metodologia

A metodologia proposta neste trabalho está organizada em quatro etapas principais:

- i. Revisão da literatura e definição das dimensões de análise
- ii. Estruturação do modelo avaliativo utilizando a LPA2v

- iii. Aplicação do modelo em uma organização industrial
- iv. Avaliação dos resultados e da aplicabilidade do modelo proposto

Na primeira etapa, será realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar os critérios qualitativos relevantes para compor um diagnóstico de maturidade voltado à Indústria 5.0. Serão consideradas dimensões alinhadas aos pilares desse novo paradigma, como centralidade no ser humano, sustentabilidade, ética digital e resiliência organizacional (Breque; Nul; Petridis, 2021).

Com base nas dimensões identificadas, será estruturado um conjunto de fatores de influência, que representam as principais variáveis intervenientes na determinação do nível de maturidade. Esses fatores serão organizados em seções em que cada uma corresponde a um domínio conceitual da Indústria 5.0.

Em seguida, o modelo será aplicado a partir de avaliações realizadas por especialistas do contexto analisado, os quais atribuirão, para cada fator, os pesos relativos e os graus de evidência favorável (μ_1) e desfavorável (μ_2). Após a coleta dos dados e definição do nível de exigência, os resultados obtidos serão interpretados considerando os graus de certeza e contradição. Por fim, avalia-se a capacidade do modelo em produzir diagnósticos consistentes.

1.7 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1- Introdução:** Apresenta a introdução do estudo, incluindo a delimitação do tema, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, a justificativa, a metodologia adotada e a estrutura geral do trabalho.
- **Capítulo 2 - Indústria 5.0:** Trata da fundamentação teórica sobre a Indústria 5.0, destacando seus pilares conceituais e a necessidade de abordagens diagnósticas mais alinhadas a esse novo paradigma.
- **Capítulo 3 - Lógica Paraconsistente:** Apresenta os LPA2v, incluindo suas propriedades formais, representação no reticulado e os operadores.
- **Capítulo 4 - Modelo de Avaliação Diagnóstica:** Propõe o modelo diagnóstico de avaliação de maturidade organizacional frente à Indústria 5.0 utilizando a LPA2v. Este capítulo descreve a criação do modelo, os fatores de influência utilizados, a análise dos resultados obtidos após a aplicação do modelo.
- **Capítulo 5 - Considerações finais:** Apresenta as considerações finais do trabalho as limitações da abordagem desenvolvida e sugestões para estudos futuros que possam aprimorar ou expandir o modelo proposto.

2 INDÚSTRIA 5.0

2.1 Histórico das Revoluções Industriais

As transformações industriais ao longo da história moldaram a estrutura produtiva da sociedade. A Primeira Revolução Industrial, no final do século XVIII, foi impulsionada pela energia a vapor, marcando a transição da produção manual para o modelo fabril mecanizado. A Segunda Revolução Industrial, no século XIX, trouxe a eletricidade e a produção em massa, elevando drasticamente a produtividade. A Terceira Revolução Industrial, a partir da década de 1970, integrou eletrônica, automação e tecnologias da informação e comunicação, levando à produção automatizada. A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, focou na interconectividade de sistemas físicos e digitais, utilizando tecnologias como *Internet of Things* (IoT) e computação em nuvem e inteligência artificial (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023). Essa fase da revolução industrial buscou automação avançada, decisões autônomas e customização em massa. Contudo, a Indústria 4.0 foi criticada por sua abordagem predominantemente tecnológica, negligenciando aspectos humanos, sociais e ambientais dos sistemas produtivos. Essa falha na abordagem abriu caminho para o surgimento da Indústria 5.0, que busca reintroduzir valores como a centralidade humana, a sustentabilidade e a resiliência (Xu *et al.*, 2021; Pizoñ *et al.*, 2023).

2.2 Limitações da Indústria 4.0

A Indústria 4.0, embora tenha impulsionado a eficiência e a produtividade por meio da digitalização e automação, tem sido criticada por sua abordagem predominantemente tecnológica, que muitas vezes negligencia os aspectos humanos, sociais e ambientais dos sistemas produtivos. A marginalização do papel do trabalhador é uma das principais limitações, com sistemas de planejamento e controle que priorizam a automação em detrimento de fatores cognitivos e perceptivos humanos (Rannertshauser; Kessler; Arlinghaus, 2022). Além disso, a Indústria 4.0 apresenta lacunas em relação à sustentabilidade e resiliência. Apesar dos ganhos de produtividade, seu modelo tecnológico não considerou a preservação ambiental e a capacidade de adaptação a crises sistêmicas, como evidenciado pela pandemia de COVID-19 (Breque; Nul; Petridis, 2021; Khan; Haleem; Javaid, 2023).

Diante desses desafios, a Indústria 5.0 surge como uma evolução que busca resgatar o protagonismo humano e ampliar o foco para além da eficiência econômica. O objetivo é criar sistemas produtivos que não apenas automatizem tarefas, mas que também fortaleçam a criatividade, a personalização e a inclusão. Essa mudança de enfoque está fundamentada em três pilares centrais: centralidade no ser humano, sustentabilidade ambiental e resiliência organizacional (Breque; Nul; Petridis, 2021; Nahavandi, 2019).

2.3 Modelo da Indústria 5.0

A Indústria 5.0 representa uma evolução do modelo industrial, transcendendo o foco exclusivo na eficiência e produtividade da Indústria 4.0 para incorporar valores como a centralidade no ser humano, a sustentabilidade e a resiliência (Breque; Nul; Petridis, 2021; Xu *et al.*, 2021). Essa nova fase da indústria busca harmonizar o avanço tecnológico com o bem-estar social e a proteção ambiental (Nahavandi, 2019).

A centralidade no ser humano implica em um redesenho dos sistemas produtivos onde o trabalhador é visto como um ativo valioso, e não apenas como um custo. A tecnologia deve servir para ampliar as capacidades humanas, promover ambientes de trabalho seguros e inclusivos, e garantir que as decisões sejam tomadas com consideração ética e respeito à dignidade humana (Nahavandi, 2019; Tóth *et al.*, 2023). Isso se manifesta na colaboração humano-máquina, onde robôs e sistemas de IA atuam como assistentes, potencializando a criatividade e o julgamento humano em tarefas complexas (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023).

A sustentabilidade, por sua vez, orienta a Indústria 5.0 para a criação de processos produtivos que respeitem os limites planetários. Isso envolve a adoção de tecnologias verdes, a promoção da economia circular, a redução do consumo de energia e recursos, e a minimização de resíduos e emissões. O objetivo é garantir que a produção industrial contribua para um futuro mais verde e equitativo, alinhando o desenvolvimento econômico com a responsabilidade ambiental (Breque; Nul; Petridis, 2021; Silva *et al.*, 2024).

A resiliência é o terceiro pilar, capacitando as indústrias a resistirem e se adaptarem a choques e interrupções, como crises geopolíticas, pandemias ou desastres naturais. Isso requer cadeias de suprimentos mais robustas e flexíveis, capacidade de produção adaptável e processos de negócios ágeis. A Indústria 5.0 busca construir sistemas que possam manter sua funcionalidade e se recuperar rapidamente diante de adversidades, garantindo a continuidade das operações essenciais (Breque; Nul; Petridis, 2021; Khan; Haleem; Javaid, 2023).

Em suma, a Indústria 5.0 não é uma substituição da Indústria 4.0, mas um complemento que adiciona uma dimensão de valores, focando em como a tecnologia pode ser utilizada para alcançar objetivos sociais e ambientais mais amplos, além dos ganhos de eficiência. Ela representa uma mudança de paradigma de uma abordagem puramente tecnológica para uma abordagem orientada por valores, onde a inovação e a pesquisa são direcionadas para o serviço à humanidade dentro dos limites planetários (Xu *et al.*, 2021; Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023).

2.4 Indicadores e Métricas da Indústria 5.0

A mensuração do progresso em direção à Indústria 5.0 requer a formulação de indicadores que ultrapassem os tradicionais parâmetros técnico-econômicos da Indústria 4.0. Isso implica considerar dimensões como centralidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência organizacional (Breque; Nul; Petridis, 2021; Nahavandi, 2019). Ao contrário da Indústria 4.0,

que priorizava a eficiência operacional, a Indústria 5.0 demanda um novo conjunto de métricas capazes de captar aspectos qualitativos e contextuais. Indicadores como tempo de ciclo das máquinas ou taxa de falhas continuam relevantes, mas são complementados por medidas subjetivas, como bem-estar dos trabalhadores, aceitação da IA e confiança nos sistemas (Tóth *et al.*, 2023).

Autores como Tóth *et al.* (2023) propõem a arquitetura colaborativa I5arc, que organiza os indicadores da Indústria 5.0 em seis domínios de melhoria contínua, com base em processos colaborativos entre humanos, inteligência artificial e sistemas ciberfísicos.

2.5 Relação entre Sociedade 5.0 e Indústria 5.0

A Sociedade 5.0, um conceito originado no Japão, representa uma visão de futuro na qual a transformação digital é orientada para o bem-estar social, integrando o mundo físico e o ciberespaço para resolver desafios sociais por meio da tecnologia. Enquanto a Sociedade 5.0 abrange amplos setores como educação, mobilidade, saúde e segurança, a Indústria 5.0 aplica princípios semelhantes ao contexto produtivo, focando na reorganização dos sistemas de manufatura com base em valores (Santos *et al.*, 2025; Xu *et al.*, 2021).

Ambos os conceitos compartilham a centralidade no ser humano, a sustentabilidade e a valorização da tecnologia como meio para um fim social, e não como um fim em si mesma. No entanto, operam em escalas e escopos distintos: a Sociedade 5.0 é uma estratégia nacional abrangente, dependente de políticas públicas e ações coordenadas entre governos, universidades e sociedade civil. Já a Indústria 5.0 é um desdobramento setorial, que exige o redesenho de práticas organizacionais e modelos de gestão específicos para o ambiente fabril (Pizoñ *et al.*, 2023; Tóth *et al.*, 2023).

A Indústria 5.0 pode ser vista como uma interface operacional da Sociedade 5.0 no domínio industrial, buscando personalização, sustentabilidade e resiliência dentro dos sistemas de produção. Essa convergência dentro dos sistemas de produção indica uma tendência de evolução sistêmica, onde tecnologia, sociedade e indústria caminham juntas para promover não apenas avanços técnicos, mas também valor social agregado, superando as limitações dos modelos anteriores que priorizavam apenas a eficiência econômica (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023).

2.6 Pilares da Indústria 5.0

2.6.1 Centralidade no ser humano

A centralidade no ser humano é um dos pilares fundamentais da Indústria 5.0, diferenciando-a da Indústria 4.0, que focava na automação e digitalização para ganhos de produtividade. A Indústria 5.0 propõe um redesenho dos sistemas industriais com ênfase na valori-

zação das capacidades humanas, na sustentabilidade e na resiliência dos processos produtivos (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023; Breque; Nul; Petridis, 2021).

Essa abordagem focada no ser humano visa resgatar o papel ativo do operador nos ambientes fabris, não apenas como executor, mas como cocriador e agente decisório. A literatura aponta a necessidade de sistemas colaborativos entre humanos, inteligência artificial e dispositivos ciberfísicos, promovendo uma sinergia entre as capacidades cognitivas humanas e os recursos tecnológicos avançados (Tóth *et al.*, 2023; Santana, 2023). Modelos como o Human-in-the-loop Cyber-Physical Systems e o Operator 4.0 refletem essa tendência, onde o humano permanece no centro das decisões, especialmente em tarefas que exigem criatividade, julgamento moral, sensibilidade contextual e solução de problemas não estruturados (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023; Rannertshauser; Kessler; Arlinghaus, 2022).

O pilar da centralidade no ser humano também demanda um redesenho das arquiteturas organizacionais e tecnológicas, com a incorporação de dispositivos usáveis, gêmeos digitais, realidade aumentada e tecnologias explicáveis de IA, com interfaces que garantam que o controle permaneça nas mãos dos operadores (Tóth *et al.*, 2023; Yang; Liu; Morgan, 2024). A Indústria 5.0 valoriza atributos humanos como criatividade, pensamento crítico, empatia, julgamento ético e adaptabilidade, que são indispensáveis para lidar com problemas não estruturados e interpretar contextos complexos (Rannertshauser; Kessler; Arlinghaus, 2022; Nahavandi, 2019).

O papel do operador vai além da execução de tarefas, esperando-se que ele participe ativamente do processo decisório, proponha melhorias e interaja com sistemas baseados em inteligência artificial de forma ética e explicável (Tóth *et al.*, 2023; Pizoñ *et al.*, 2023). Além disso, o desenvolvimento de competências emocionais e sociais é essencial para a criação de ambientes industriais inclusivos e saudáveis, promovendo o bem-estar psicológico, a comunicação efetiva e a cooperação entre equipes humanas e agentes tecnológicos (Santana, 2023).

2.6.2 Sustentabilidade

A sustentabilidade é um dos pilares fundamentais da Indústria 5.0, assumindo uma posição de destaque em relação aos paradigmas industriais anteriores. Enquanto a Indústria 4.0 concentrou-se na eficiência operacional e na digitalização, muitas vezes sem considerar de forma abrangente os impactos ambientais, a Indústria 5.0 propõe uma abordagem mais equilibrada, na qual o desenvolvimento tecnológico está alinhado à preservação dos recursos naturais e ao respeito aos limites planetários (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023; Silva *et al.*, 2024; Rame; Purwanto; Sudarno, 2024).

Segundo a Comissão Europeia, a Indústria 5.0 reconhece a necessidade de sistemas produtivos resilientes e ambientalmente responsáveis, capazes de enfrentar desafios como as mudanças climáticas, a escassez de recursos e a instabilidade nas cadeias globais de suprimentos. Nesse contexto, o uso de tecnologias verdes torna-se essencial para mitigar os impactos ambientais da produção industrial, promovendo a economia circular e a redução da pegada de carbono (Rame; Purwanto; Sudarno, 2024).

As tecnologias verdes envolvem inovações que minimizam o consumo de energia e matérias-primas, reduzem emissões e resíduos e promovem ciclos de produção mais circulares. Entre os exemplos estão a manufatura aditiva com materiais biodegradáveis, sistemas de recuperação de energia, sensores de eficiência energética, além de processos produtivos orientados por inteligência artificial que otimizam recursos em tempo real (Tóth *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2024). A integração da sustentabilidade ao design dos sistemas industriais requer não apenas tecnologias apropriadas, mas também uma reestruturação dos modelos de negócios e métricas de desempenho, vinculando a criação de valor econômico ao impacto social e ecológico das operações industriais (Santos *et al.*, 2025).

2.6.3 Resiliência

A resiliência é um componente estrutural da Indústria 5.0, cuja proposta é capacitar os sistemas industriais a resistirem, adaptarem-se e se recuperarem rapidamente de perturbações internas ou externas. Em contraste com a Indústria 4.0, que priorizou a eficiência operacional e a hiperconectividade, a Indústria 5.0 enfatiza a capacidade dos sistemas de produção em manter sua funcionalidade diante de eventos adversos, como pandemias, crises geopolíticas, escassez de insumos ou falhas tecnológicas (Breque; Nul; Petridis, 2021; Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023; Khan; Haleem; Javaid, 2023).

A resiliência industrial envolve a integração de mecanismos técnicos, organizacionais e humanos capazes de detectar vulnerabilidades, responder a falhas e ajustar-se de maneira autônoma ou assistida. Essa abordagem requer modelos de produção mais flexíveis, redes de suprimentos diversificadas e estruturas organizacionais descentralizadas, com maior autonomia local para tomada de decisão (Santos *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2024). Segundo Tóth *et al.* (2023), a arquitetura colaborativa proposta pela Indústria 5.0 amplia a resiliência ao promover a participação ativa dos trabalhadores em processos de inovação e adaptação contínua, com o apoio de tecnologias inteligentes que fornecem suporte decisório em tempo real. A presença de humanos no ciclo de controle favorece diagnósticos contextuais mais precisos e respostas mais eficazes frente à incerteza (Tóth *et al.*, 2023).

Além disso, o uso de tecnologias como gêmeos digitais, realidade aumentada, inteligência artificial explicável e sistemas distribuídos permite antecipar riscos, simular cenários e reagir de forma ágil a mudanças imprevistas. Esses elementos tornam-se cruciais para enfrentar ambientes voláteis, incertos, complexos e ambíguos, especialmente em cadeias globais de valor (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023). A resiliência na Indústria 5.0 não deve ser compreendida apenas como a capacidade tecnológica de resistir a choques externos, mas como uma propriedade sistêmica construída a partir de arranjos organizacionais, culturais e humanos (Tóth *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2025).

Um dos elementos centrais para a resiliência organizacional é a promoção de uma cultura de aprendizado contínuo. Ambientes industriais que valorizam a atualização constante de habilidades, a experimentação controlada e a retroalimentação entre operadores e sistemas in-

teligentes tornam-se mais preparados para responder a mudanças abruptas (Tóth *et al.*, 2023). Outro fator chave é a existência de redes de cooperação dentro e fora da organização, fortalecendo a troca de informações, a antecipação de riscos e a inovação distribuída (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023; Santana, 2023).

Além disso, a descentralização decisória é apontada como um componente essencial da resiliência organizacional, permitindo que organizações ajustem seus processos de forma mais ágil e contextualizada (Pizoñ *et al.*, 2023; Nahavandi, 2019). Essa descentralização decisória está alinhada ao conceito de *human-in-the-loop*, em que o operador não apenas executa, mas interpreta, adapta e contribui para o sistema produtivo. A integração de tecnologias como gêmeos digitais, IoT e Inteligência Artificial Explicável (IAx) deve, portanto, ser orientada por arquiteturas organizacionais que respeitem e potencializem a agência humana.

Assim, a resiliência na Indústria 5.0 depende tanto da incorporação de tecnologias quanto da criação de culturas organizacionais que favoreçam a aprendizagem contínua, a colaboração e a autonomia. Dessa forma, a resiliência um atributo sociotécnico fundamental para a sustentabilidade e adaptabilidade dos sistemas industriais contemporâneos.

2.7 Tecnologias aderentes a Indústria 5.0

Como a colaboração entre seres humanos e máquinas é um dos eixos centrais da Indústria 5.0, a Indústria 5.0 propõe um modelo de cooperação sinérgica, onde humanos e sistemas inteligentes exploram suas capacidades complementares (Nahavandi, 2019; Santana, 2023). Essa colaboração humano-máquina envolve operadores e tecnologias como robôs colaborativos, Inteligência Artificial (IA), sistemas ciberfísicos e dispositivos usáveis, exigindo arquiteturas cognitivas e organizacionais que garantam eficiência, segurança, adaptabilidade e inteligibilidade (Tóth *et al.*, 2023; Pizoñ *et al.*, 2023).

Estudos indicam que a cognição humana é indispensável em atividades que demandam julgamento situacional, interpretação subjetiva e criatividade, enquanto as máquinas oferecem precisão e velocidade. A chave da colaboração reside na orquestração dessas competências humanas em processos de coexecução e coconstrução de conhecimento (Tóth *et al.*, 2023) com máquinas. A arquitetura colaborativa proposta por Tóth *et al.* (2023) enfatiza sistemas baseados em ontologias e aprendizado contextualizado, permitindo que operadores interajam com interfaces amigáveis, tomem decisões assistidas por IA e personalizem sua experiência de trabalho, tornando-se cocriadores no processo produtivo (Tóth *et al.*, 2023; Yang; Liu; Morgan, 2024).

A colaboração homem-máquina é uma resposta estratégica à crescente complexidade dos sistemas produtivos, e sua adoção bem-sucedida requer o redesenho dos ambientes industriais para favorecer a inclusão, a aprendizagem contínua e a participação ativa dos trabalhadores nos processos decisórios e inovativos (Silva *et al.*, 2024).

2.7.1 Inteligência Artificial Centrada no Humano

A IA centrada no humano é um dos principais alicerces tecnológicos da Indústria 5.0. Diferentemente dos modelos anteriores que priorizavam a automação e substituição da mão de obra humana, a IA na Indústria 5.0 é concebida para atuar de forma complementar aos operadores, promovendo colaboração, explicabilidade dos algoritmos e controle humano no ciclo de decisão (Tóth *et al.*, 2023; Pizoñ *et al.*, 2023). O modelo da Indústria 5.0 se apoia na ideia de que sistemas inteligentes devem ser projetados para ampliar as capacidades cognitivas e perceptivas dos trabalhadores, respeitando seus limites e valores. Isso inclui o desenvolvimento de interfaces intuitivas, algoritmos explicáveis como a IAX e mecanismos de supervisão contínua por parte dos usuários humanos (Tóth *et al.*, 2023; Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023).

A arquitetura colaborativa I5arc, proposta por (Tóth *et al.*, 2023), exemplifica a concepção de centralidade no ser humano, ao integrar ferramentas de cocriação e coexecução entre humanos e IA, com base em conhecimento semântico e linguagens acessíveis para todos os agentes envolvidos. O modelo propõe o uso de tecnologias como óculos inteligentes, ontologias industriais e gêmeos digitais, permitindo uma colaboração simbiótica entre operadores e sistemas autônomos. O conceito de IA centrada no humano também é estratégico para garantir a aceitação das tecnologias em ambientes industriais, reduzindo resistências e promovendo confiança. Estudos mostram que trabalhadores demonstram maior adesão quando percebem que têm controle sobre as decisões assistidas por IA, especialmente em tarefas críticas de produção, manutenção e qualidade (Santana, 2023; Sousa, 2024).

2.7.2 Internet das Coisas e Sistemas Ciberfísicos

A IoT e os Sistemas Ciberfísicos constituem a base técnica para a integração entre o mundo físico e o digital nas arquiteturas produtivas da Indústria 5.0. Essas tecnologias já desempenharam papel fundamental na Indústria 4.0, viabilizando a conectividade em tempo real entre máquinas, sensores, dispositivos e sistemas corporativos. Na Indústria 5.0, no entanto, seu uso é reorientado para permitir interações mais inteligentes, colaborativas e adaptativas entre humanos e tecnologia (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023; Pizoñ *et al.*, 2023).

A IoT permite o monitoramento contínuo de ativos físicos por meio de sensores distribuídos, possibilitando a coleta e análise de grandes volumes de dados, também chamado de *big data* com elevada granularidade. Já os sistemas ciberfísicos integram esses dados ao ambiente digital por meio de modelos computacionais que representam e controlam os processos físicos em tempo real (Tóth *et al.*, 2023). Na Indústria 5.0, o papel desses sistemas vai além da automação: eles são utilizados para criar ambientes responsivos que se adaptam às decisões humanas e às mudanças contextuais. Por exemplo, sensores podem ajustar condições de operação conforme a ergonomia do operador, ou um sistema ciberfísico pode priorizar tarefas com base em parâmetros éticos ou socioambientais definidos por humanos (Tóth *et al.*, 2023). A combinação de IoT e sistemas ciberfísicos habilita aplicações como gêmeos digitais, manu-

tenção preditiva, rastreabilidade, produção sob demanda e personalização em massa. Além disso, tornam-se essenciais para garantir resiliência operacional e segurança, especialmente em ambientes industriais dinâmicos e sensíveis ao tempo (Valette; Bril El-Haouzi; Demesure, 2023).

2.7.3 Robôs Colaborativos

A introdução de robôs colaborativos representa uma das principais inovações da Indústria 5.0 no que se refere à integração entre humanos e sistemas automatizados. Diferentemente dos robôs industriais tradicionais, projetados para operar de forma isolada, os robôs colaborativos são desenvolvidos para atuar lado a lado com operadores humanos, compartilhando o mesmo espaço de trabalho e interagindo fisicamente de maneira segura e eficiente (Pizoń *et al.*, 2023; Tóth *et al.*, 2023). A interação homem-máquina nesse novo paradigma exige a adoção de princípios ergonômicos, cognitivos e sociais no design de sistemas produtivos. Isso implica a criação de interfaces intuitivas, sensoriamento avançado, controle por voz e gestos, bem como protocolos de segurança que permitam a detecção e prevenção de colisões, fadiga ou erros operacionais (Tóth *et al.*, 2023; Yang; Liu; Morgan, 2024).

Segundo Tóth *et al.* (2023), a arquitetura de colaboração da Indústria 5.0 propõe a orquestração de múltiplos agentes, como humanos, robôs, IA e dispositivos IoT, em processos de cocriação e coexecução. Nessa configuração de arquitetura, os cobots não apenas executam tarefas repetitivas, mas também aprendem e se adaptam com base no comportamento e nas decisões humanas. Santana (2023) apontam que a confiança na tecnologia, a explicabilidade das decisões dos sistemas automatizados e a clareza dos papéis desempenhados por humanos e máquinas são fatores críticos para o sucesso dessa colaboração. A perspectiva da Indústria 5.0, portanto, vai além da eficiência: busca promover ambientes produtivos nos quais a tecnologia seja um amplificador das capacidades humanas, e não um substituto.

REFERÊNCIAS

- BARO, C. C.-L. de; MIRA-SOLVES, I.; VERDÚ-JOVER, A. Assessment model for industry 5.0: A holistic approach to readiness and integration. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 46,, p. 100855, 2025. ISSN 2452-414X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X25000792>.
- BREQUE, M.; NUL, L. D.; PETRIDIS, A. **Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry**. [S.l.]: , 2021. Acessado em Junho/2025. Disponível em: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en.
- CARVALHO, F. R. d.; BRUNSTEIN, I.; ABE, J. M. Tomadas de decisão com ferramentas da lógica paraconsistente anotada. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 2003. **Anais [...]** [S.l.]: UFOP, 2003.
- de Carvalho Junior, A. *et al.* A comprehensive review on paraconsistent annotated evidential logic: Algorithms, applications, and perspectives. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 127,, p. 107342, 2024. ISSN 0952-1976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197623015269>.
- FILHO, J. da S. **MÉTODOS DE APLICAÇÕES DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE ANOTAÇÃO COM DOIS VALORES-LPA2v COM CONSTRUÇÃO DE ALGORITMO E IMPLEMENTAÇÃO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS**. 01 1999. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 01 1999.
- FILHO, J. I. da S. Métodos de aplicações da lógica paraconsistente anotada de anotação com 2 valores-lpa2v. **Revista Seleção Documental**, ,, 2006.
- HEIN-PENSEL, F. *et al.* Maturity assessment for industry 5.0: A review of existing maturity models. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 66,, p. 200–210, 2023. ISSN 0278-6125. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027861252200228X>.
- KHAN, M.; HALEEM, A.; JAVAID, M. Changes and improvements in industry 5.0: A strategic approach to overcome the challenges of industry 4.0. **Green Technologies and Sustainability**, v. 1, n. 2, p. 100020, 2023. ISSN 2949-7361. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736123000131>.
- LUCATO, W. C. *et al.* Model to evaluate the industry 4.0 readiness degree in industrial companies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 1808–1813, 2019. ISSN 2405-8963. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319314454>.
- NAHAVANDI, S. Industry 5.0—a human-centric solution. **Sustainability**, v. 11, n. 16,, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/16/4371>.
- PIZOÑ, J. *et al.* Challenges of human-centered manufacturing in the aspect of industry 5.0 assumptions. **IFAC-PapersOnLine**, v. 56, n. 2, p. 156–161, 2023. ISSN 2405-8963. 22nd IFAC World Congress. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896323019705>.
- RAME, R.; PURWANTO, P.; SUDARNO, S. Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future. **Innovation and Green Development**, v. 3,

n. 4, p. 100173, 2024. ISSN 2949-7531. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S294975312400050X>.

RANNERTSHAUSER, P.; KESSLER, M.; ARLINGHAUS, J. C. Human-centricity in the design of production planning and control systems: A first approach towards industry 5.0. **IFAC-PapersOnLine**, v. 55, n. 10, p. 2641–2646, 2022. ISSN 2405-8963. 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322021176>.

SANTANA, I. T. S. de. O futuro da força de trabalho na indústria 5.0: uma perspectiva dos trabalhadores. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 8, p. 10212–10233, ago. 2023. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/1043>.

SANTOS, M. S. *et al.* A estratégia competitiva de inovação na indústria 5.0: ideias, provocações e reflexões. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 1, p. e4586, jan. 2025. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4586>.

SILVA, J. F. d. *et al.* Indústria 5.0: revisão da literatura e identificação dos pilares do tema. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP. 2024. **Anais [...] [S.l.]: ABEPRO**, 2024.

SOUSA, J. C. de. Indústria 5.0: desafios gerenciais do novo cenário de trabalho de trabalho colaborativo humano-robô. **Revista de administração, sociedade e inovação**, v. 10,, p. 121–136, 2024.

TRIST, E. L. **The Evolution of Socio-Technical Systems: A Conceptual Framework and an Action Research Program**. Toronto : Ontario Quality of Working Life Centre, 1981. ISBN 0774362863. Disponível em: <https://archive.org/details/39120320010110/page/2/mode/2up>.

TÓTH, A. *et al.* The human-centric industry 5.0 collaboration architecture. **MethodsX**, v. 11,, p. 102260, 2023. ISSN 2215-0161. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016123002571>.

VALETTE, E.; Bril El-Haouzi, H.; DEMESURE, G. Industry 5.0 and its technologies: A systematic literature review upon the human place into iot- and cps-based industrial systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 184,, p. 109426, 2023. ISSN 0360-8352. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835223004503>.

XU, X. *et al.* Industry 4.0 and industry 5.0—inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61,, p. 530–535, 2021. ISSN 0278-6125. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612521002119>.

YANG, J.; LIU, Y.; MORGAN, P. L. Human–machine interaction towards industry 5.0: Human-centric smart manufacturing. **Digital Engineering**, v. 2,, p. 100013, 2024. ISSN 2950-550X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950550X2400013X>.