

# CONTROLE E AUTOMAÇÃO INTELIGENTE COM A IA





# CONTROLE E AUTOMAÇÃO INTELIGENTE COM A IA

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI**

*Antonio Ricardo Alvarez Alban*

Presidente

**Diretoria de Desenvolvimento Industrial**

*Jefferson de Oliveira Gomes*

Diretor

*Mário Sérgio Carraro Telles*

Diretor-Adjunto

**Diretoria de Relações Institucionais**

*Roberto de Oliveira Muniz*

Diretor

**Diretoria Jurídica**

*Alexandre Vitorino*

Diretor

**Diretoria Corporativa**

*Cid Carvalho Vianna*

Diretor

**Diretoria de Comunicação**

*André Nascimento Curvello*

Diretor

# CONTROLE E AUTOMAÇÃO INTELIGENTE COM A IA



Brasília, 2025

© 2025. CNI – Confederação Nacional da Indústria.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

**Diretoria de Desenvolvimento Industrial**  
**Observatório Nacional da Indústria**

---

### Dados Internacionais da Catalogação na Publicação (CIP)

---

C748c

Confederação Nacional da Indústria.  
Controle e automação inteligente com a IA / Confederação  
Nacional da Indústria. Brasília : CNI, 2025.  
61 p. il.

1. Automação 2. Controle de Processos 3. Inteligência Artificial  
I. Título.

CDU: 681.5:004.8

---

Elaborado por Alberto Nemoto Yamaguti - Bibliotecário - CRB-1/2396

CNI

Confederação Nacional da Indústria

**Sede**

Setor Bancário Norte

Quadra 1 – Bloco C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 – Brasília – DF

<http://www.portaldaindustria.com.br/cni/>

**Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC**

Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992

sac@cni.com.br

# AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Observatório Nacional da Indústria da Confederação Nacional da Indústria (CNI) e ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados (ISI-SE) pelo apoio fundamental e pela colaboração dedicada na execução deste estudo. A sinergia entre as instituições foi essencial para o desenvolvimento de um estudo robusto, preciso e alinhado às necessidades estratégicas da indústria nacional.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia para desenvolvimento do <i>roadmap</i> tecnológico (adaptado) .....	17
Figura 2 - Distribuição do número de artigos científicos segundo o ano de publicação, a comparação com o número total de artigos analisados, o país de origem dos autores e a filiação institucional dos autores.....	26
Figura 3 - Distribuição do número de artigos científicos segundo as técnicas de IA, as técnicas de controle, a área de aplicação, equipamentos permitidos e o processo envolvido .....	30
Figura 4 - Distribuição do número de patentes solicitadas segundo o ano de depósito, a comparação com o número total de patentes, o país de depósito e a filiação institucional dos depositantes.....	32
Figura 5 - Distribuição do número de patentes solicitadas segundo as técnicas de IA, as técnicas de controle, a área de aplicação, equipamentos permitidos e o processo envolvido.....	36
Figura 6 - Distribuição do número de patentes concedidas segundo o ano de depósito e de concessão, a comparação com o número total de patentes, o país de depósito e a filiação institucional dos depositantes .....	38
Figura 7 - Distribuição das patentes concedidas segundo as técnicas de IA, as técnicas de controle, a área de aplicação, equipamentos permitidos e o processo envolvido .....	41
Figura 8 - Construção do <i>roadmap</i> - estágio atual.....	46
Figura 9 - Construção do <i>roadmap</i> - curto prazo .....	50
Figura 10 - Construção do <i>roadmap</i> - médio prazo.....	54
Figura 11 - Construção do <i>roadmap</i> - longo prazo.....	57

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Palavras-chave testadas e o número de documentos resultantes .....	19
Tabela 2 - Resumo das classificações CIP relacionadas à automação, IA, robótica e IOT .....	21



# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
2.1 Definição das estratégias de busca .....	18
2.1.1 Estratégia para Pesquisa de Artigos .....	18
2.1.2 Estratégia para Pesquisa de Patentes .....	20
2.1.3 Escolha das Taxonomias Meso e Micro .....	22
<b>3 RESULTADOS – ARTIGOS CIENTÍFICOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 Análise macro dos artigos científicos .....	25
3.2 Análise meso e micro dos artigos científicos .....	27
3.2.1. Técnicas de IA .....	27
3.2.2. Técnicas de controle .....	28
3.2.3. Área de aplicação .....	28
3.2.4. Equipamento .....	29
3.2.5. Processo .....	29
<b>4 RESULTADOS – PATENTES SOLICITADAS .....</b>	<b>31</b>
4.1 Análise macro das patentes solicitadas .....	32
4.2 Análise meso e micro das patentes solicitadas .....	38
4.2.1. Técnicas de IA .....	33
4.2.2. Técnicas de controle .....	34
4.2.3. Área de aplicação .....	34
4.2.4. Equipamento .....	35
4.2.5. Processo .....	35
<b>5 RESULTADOS – PATENTES CONCEDIDAS .....</b>	<b>37</b>
5.1 Análise macro das patentes concedidas .....	37
5.2 Análise meso e micro das patentes concedidas .....	39
5.2.1. Técnicas de IA .....	39
5.2.2. Técnicas de controle .....	39
5.2.3. Área de aplicação .....	39
5.2.4. Equipamento .....	40
5.2.5. Processo .....	40

<b>6 CONSTRUÇÃO DO ROADMAP .....</b>	<b>43</b>
6.1 Estágio atual .....	43
6.2 Curto prazo .....	47
6.3 Médio prazo .....	51
6.4 Longo prazo.....	55
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>59</b>
<b>8 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de controle avançado têm o potencial de transformar profundamente a indústria nacional, oferecendo ganhos expressivos em eficiência operacional, qualidade de produto, sustentabilidade e competitividade. Tecnologias como controle preditivo, lógica Fuzzy e controle por aprendizado iterativo (ILC) já demonstraram resultados significativos em ambientes industriais complexos, como refinarias, plantas químicas e sistemas de utilidades. No entanto, apesar de seus benefícios comprovados, essas técnicas ainda são subutilizadas na prática industrial brasileira, muitas vezes limitadas por barreiras de conhecimento, integração e investimento<sup>1</sup>.

A convergência entre Inteligência Artificial (IA) e técnicas de controle representa uma nova fronteira para a automação industrial. Soluções baseadas em IA, como aprendizado por reforço e redes neurais, estão sendo aplicadas para otimizar processos em tempo real, prever falhas, adaptar-se a variabilidades operacionais e reduzir custos energéticos. Estudos indicam que mais de 70% dos líderes industriais que adotaram IA em controle de processos relataram ganhos mensuráveis em eficiência e economia<sup>2</sup>. A seguir, alguns exemplos de casos de sucesso na indústria mundial:

- **Ocean Spray** implementou controle adaptativo preditivo para estabilizar a temperatura de pasteurização de sucos, reduzindo o tempo de partida em 70% e melhorando a qualidade do produto final<sup>1</sup>.
- **ENEOS Materials**, no Japão, utilizou IA para controlar autonomamente uma coluna de destilação por 35 dias consecutivos, otimizando o uso de calor residual e mantendo a qualidade do produto mesmo sob variações climáticas externas<sup>3</sup>.
- **Chevron** acelerou seu ciclo de planejamento de refinaria de semanal para tempo real, integrando IA com grupos de engenharia, operações e planejamento<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> VANDOREN, V. **Real-world applications of advanced process controls**. 2001. Disponível em: <https://www.controleng.com/real-world-applications-of-advanced-process-controls/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

<sup>2</sup> IMUBIT. **Advanced Process Control, reinvented with AI: here's how plants are evolving**. 2025. Disponível em: <https://imubit.com/article/advanced-process-control-ai/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

<sup>3</sup> GILL, S. **AI used to control process manufacturing operations**. 2022. Disponível em: <https://www.controleng.com/ai-used-to-control-process-manufacturing-operations/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

<sup>4</sup> IMUBIT. **Industrial process solutions: when old school meets AI**. 2025. Disponível em: <https://imubit.com/article/industrial-process-solutions-meets-ai/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

Apesar dos avanços significativos na integração entre controle avançado e inteligência artificial, a adoção ampla dessas tecnologias em ambientes industriais ainda enfrenta barreiras substanciais. Um dos principais entraves está na ausência de garantias formais de estabilidade e controlabilidade dos sistemas quando operados por algoritmos de IA. Em setores industriais críticos, onde segurança, confiabilidade e previsibilidade são requisitos inegociáveis, essa limitação representa um risco que muitas empresas não estão dispostas a assumir sem respaldo técnico robusto.

Além disso, o sucesso das soluções baseadas em IA depende fortemente da disponibilidade de grandes volumes de dados históricos e operacionais, essenciais para o treinamento de modelos confiáveis. No entanto, muitas indústrias ainda operam com sistemas fragmentados, onde os dados estão distribuídos em diferentes camadas — sensores, controladores, supervisórios e sistemas corporativos — sem uma integração vertical eficiente. Essa falta de conectividade entre os níveis de operação compromete a capacidade de gerar conhecimento útil a partir dos dados e limita a escalabilidade das soluções inteligentes.

Em diversos casos, mesmo quando há dados disponíveis, eles não estão estruturados ou acessíveis em tempo hábil para alimentar algoritmos de aprendizado. Isso cria um cenário em que o potencial da IA é reconhecido, mas sua aplicação prática esbarra em limitações técnicas e organizacionais. Superar esses desafios exige não apenas avanços tecnológicos, mas também uma mudança cultural nas indústrias, com investimentos em infraestrutura digital, interoperabilidade de sistemas e capacitação de equipes multidisciplinares.

Apesar dessas limitações, os ganhos potenciais da implantação de tecnologias que combinam controle avançado e inteligência artificial são expressivos. A capacidade de adaptar processos em tempo real, reduzir desperdícios e explorar novas formas de otimização coloca essas soluções como um diferencial competitivo para as indústrias que estiverem na vanguarda. Direcionar investimentos para essa área não apenas posiciona as empresas como líderes em inovação, mas também fortalece sua resiliência frente às exigências de produtividade, sustentabilidade e digitalização que caracterizam a nova era industrial.

Este documento apresenta uma Rota Tecnológica estratégica, construída a partir da análise de artigos científicos, patentes e casos reais de aplicação, com foco em tecnologias que combinam controle avançado e IA. O objetivo é oferecer direcionadores claros para investimentos, apoiar decisões de alto impacto e fomentar o desenvolvimento de soluções tecnológicas robustas e escaláveis para a indústria nacional.

Para organizar esse conhecimento, adotamos uma estrutura de taxonomias em três níveis:

- Macro: visão estratégica e setorial da aplicação das tecnologias.
- Meso: categorização por técnicas utilizadas (controle, IA, equipamentos, processos, áreas de aplicação).
- Micro: detalhamento técnico das subcategorias, como tipos específicos de algoritmos, arquiteturas de controle e métodos de aprendizado.

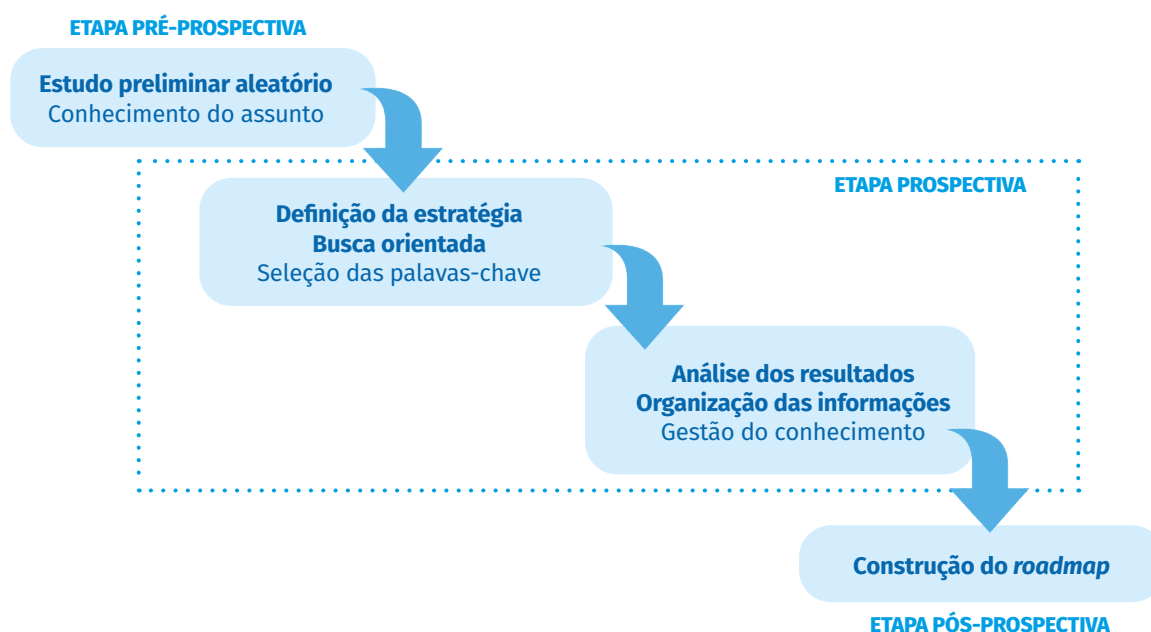
Essa abordagem permite mapear o estado da arte, identificar lacunas tecnológicas e propor caminhos concretos para a adoção segura e eficaz de soluções de automação inteligente. A Rota Tecnológica aqui apresentada é um instrumento de apoio à formulação de políticas industriais, à priorização de investimentos em inovação e à capacitação técnica de equipes envolvidas na transformação digital da indústria brasileira.



## 2 METODOLOGIA

Este estudo foi elaborado por meio de uma adaptação da metodologia do Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (NEITEC-UFRJ)<sup>5</sup>. Ela apresenta diretrizes para elaboração de *roadmap* tecnológico baseando-se em três grandes fases (Figura 1).

**FIGURA 1 - METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO ROADMAP TECNOLÓGICO (ADAPTADO)**



A primeira fase (Etapa Pré-prospectiva) consiste na busca pelo entendimento amplo sobre o objeto em análise, ou seja, visa adquirir um domínio básico acerca do tema. A partir desse conhecimento é possível determinar a estratégia de busca de documentos para a próxima etapa. Na Etapa Prospectiva é realizada uma busca mais direcionada dos documentos técnicos (artigos científicos e patentes) a partir das palavras-chaves definidas. Em seguida, os resultados são analisados e organizados. Em posse dessas análises, as informações são dispostas em um mapa de acordo com a evolução temporal das

<sup>5</sup> SILVA, A. Lemos Rangel da; BORSCHIVER, S. **Roadmapping tecnológico a partir de prospecção em documentos científicos: estudo de caso para o setor de manufatura híbrida.** [S.l.: s.n.], 2021..

tendências observadas, correspondendo à construção do *roadmap* (Etapa Pós-prospectiva). Por meio desse, os *players* podem ser analisados verticalmente e longitudinalmente em relação aos aspectos de competências, parcerias, trajetórias tecnológicas, dentre outros.

## 2.1 DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE BUSCA

Esta seção apresenta os métodos de busca adotados para o presente trabalho. Na seção 2.1.1 é apresentada a estratégia de pesquisa para os artigos, na seção 2.1.2 é apresentada a estratégia adotada para a pesquisa de patentes e, por fim, na seção 2.1.3 são mostradas as taxonomias meso e micro escolhidas para compor o *roadmap*.

### 2.1.1 Estratégia para Pesquisa de Artigos

Para a definição da estratégia de busca dos artigos, foi adotada uma abordagem sistemática com objetivo de identificar as principais tendências, abordagens e tecnologias emergentes na área, garantindo abrangência e relevância dos dados coletados.

Inicialmente, foram utilizadas nomenclaturas gerais relacionadas aos temas de interesse, como *control systems*, *artificial intelligence*, *machine learning*, *intelligent control system*, *automation*, entre outros. Essas palavras-chaves foram aplicadas em buscas na base de dados Scopus, visando obter uma visão ampla do campo tecnológico. Esta plataforma é um banco de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, incluindo revistas científicas, livros e anais de conferências. Scopus fornece uma visão abrangente da produção mundial de pesquisa nas áreas de ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais e artes e humanidades.

As primeiras buscas permitiram identificar sinônimos, variações terminológicas e áreas correlatas, contribuindo para o aprimoramento da estratégia de busca. No entanto, para garantir que as palavras-chaves estavam gerando os resultados desejáveis, foram selecionados 30 artigos de revisão de literatura com alto fator de impacto e relevância temática. Após a leitura desses artigos, identificou-se que um contingente de documentos não estava alinhado ao escopo da pesquisa, mesmo com a utilização de estratégias de busca refinadas.

A partir dessa leitura, pôde-se definir as **palavras-chaves** como referência para o direcionamento da busca, auxiliando na delimitação da temática proposta para a construção deste trabalho. Assim, foi realizada uma nova iteração, mais direcionada na base da Scopus. A Tabela 1 apresenta um resumo das estratégias adotadas.

**TABELA 1 - PALAVRAS-CHAVE TESTADAS E O NÚMERO DE DOCUMENTOS RESULTANTES**

Teste	String de Busca	Quantidade de documento (SCOPUS)
1	"Artificial Intelligence"AND "Control Systems"AND "Automation"	16.778
2	"Artificial Intelligence"AND ("Control Systems"OR "Industrial Automation")	17.235
3	"Artificial Intelligence"AND "Control Systems"AND "Industrial Automation"	87
4	"Artificial intelligent"OR "Machine Learning"OR "Reinforcement learning"AND "control system design"	124
5	("Artificial Intelligence"OR "AI"OR "Machine Learning") AND ("Control Systems"OR "Industrial Automation")	27.929
6	"DRL-based control"OR "Learning control "OR "control with learning "OR "Learning-based control"OR "AI-based control"AND "Automation"	334
-	-	-
28	("Control* based on computer vision"OR "Control* with computer vision"OR "Vision based control*"OR "Intelligent control*"OR "DRL-based control*"OR "Learning control*"OR "control* with learning"OR "Learning-based control*"OR "AI-based control*") AND ("Automation"OR "industrial automation"OR "industrial application") + filtros([2020-2025], língua inglesa, reviews)	34
29	TITLE-ABS-KEY ( ( "Control* based on computer vision"OR "Control* with computer vision"OR "Vision based control*"OR "Intelligent control*"OR "DRL-based control*"OR "Learning control*"OR "control* with learning"OR "Learning-based control*"OR "AI-based control*") AND ( "Automation"OR "industrial automation"OR "industrial application") ) AND PUBYEAR >2015 AND PUBYEAR <2026 AND PUBYEAR >2015 AND PUBYEAR <2026 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re") ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English") )	551

Um dos filtros utilizados para a busca de patentes, como a de artigos, foi o ano de publicação. Nesse caso, a busca foi delimitada entre os anos de 2015 e 2025. Além desse filtro, apenas foram considerados os textos escritos em inglês. Dessa forma, foram pré-selecionados 551 artigos científicos. Para garantir a representatividade dos resultados, foram selecionados os 200 artigos mais citados, considerando que o número de citações é um indicativo de relevância e influência na comunidade científica. Após uma leitura transversal dos artigos, apenas 126 documentos eram pertinentes ao tema.

Estes documentos foram lidos na íntegra e possibilitou-se agrupar conteúdos com similaridades, permitindo a formação de grupos mais amplos, utilizados na análise meso, até temas ou tecnologias mais específicos, que fundamentaram a análise micro.

### 2.1.2 Estratégia para Pesquisa de Patentes

A metodologia adotada nesta pesquisa foi baseada no procedimento estruturado proposto por Hoeltgebaum et al.<sup>6</sup>, já consolidado em diversos trabalhos<sup>7,8,9</sup>. Essa abordagem possibilita um processo sistemático e reproduzível para a identificação, filtragem e análise de patentes em áreas de elevada intensidade tecnológica.

O procedimento seguido neste estudo foi dividido em quatro fases principais:

- **Pesquisa preliminar:** realizou-se uma busca inicial ampla com termos linguísticos diretamente relacionados ao tema da pesquisa. O objetivo desta etapa foi obter uma visão geral do panorama de patentes, testando diferentes combinações de palavras-chave e filtros para maximizar tanto a quantidade quanto a qualidade dos resultados. Essa fase também permitiu identificar documentos com maior relevância temática. As buscas foram realizadas principalmente nas bases *Espacenet* (<https://worldwide.espacenet.com/>) e *Google Patents* (<https://patents.google.com/>).
- **Análise da pesquisa preliminar:** os resultados da pesquisa preliminar foram analisados por meio da leitura de resumos e sumários de 50 trabalhos de revisão e patentes. Nessa etapa, buscou-se classificar os documentos mais alinhados aos objetivos da pesquisa, bem como identificar a Classificação Internacional de Patentes (CIP), do inglês *International Patent Code* (IPC), mais recorrentes no domínio de interesse. Os CIPs extraídos serviram como parâmetros centrais para o refinamento das buscas seguintes. O *Espacenet* traz uma lista de CIPs de acordo com a classificação que pode ser consultada em (<https://worldwide.espacenet.com/classification#!>).
- **Pesquisa detalhada:** na fase seguinte, a estratégia de busca foi aprimorada a partir da combinação dos códigos CIP mais relevantes identificados na etapa anterior. A pesquisa detalhada foi então conduzida em bases de patentes, com foco em documentos classificados sob os CIPs selecionados. Essa abordagem direcionada permitiu eliminar resultados pouco relevantes e concentrar a análise em documentos com maior aderência ao escopo da pesquisa.

A Tabela 2 traz um resumo dos códigos CIP utilizados para filtragem da busca.

<sup>6</sup> HOELTGEBAUM, T.; VIEIRA, R. de S.; MARTINS, D. **A patent survey methodology focused on automotive mechanisms**. [S.l.: s.n.], 2016.

<sup>7</sup> HOELTGEBAUM, T. *et al.* Walking mechanisms-a state of the art survey and new developments opportunities. In: SPRINGER. **International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics**. [S.l.], 2020. p. 35–43.

<sup>8</sup> COSTA, M. V. de Oliveira. *et al.* Review and classification of workpiece toggle clamping devices. In: **International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 74–84.

<sup>9</sup> HOELTGEBAUM, T.; SIMONI, R.; MARTINS, D. Reconfigurability of engines: a kinematic approach to variable compression ratio engines. **Mechanism and Machine Theory**, v. 96, p. 308–322, 2016.

**TABELA 2 - RESUMO DAS CLASSIFICAÇÕES CIP RELACIONADAS À AUTOMAÇÃO, IA, ROBÓTICA E IOT**

<b>Categoria</b>	<b>CIP / Código</b>	<b>Descrição / Aplicação</b>
Automação e Controle	G05B	Sistemas de controle; sistemas de controle automático
	G05B13/00	Controle computacional; controle baseado em programas
	G05B13/02	Sistemas de controle usando computadores ou processadores digitais
	G05B13/04	Controle adaptativo; controle autoajustável
	G05B13/10	Controle com aprendizado, previsão ou otimização
	G05D	Controle de variáveis não elétricas (pressão, temperatura, velocidade, posição), com ou sem IA
Inteligência Artificial	G06N	Sistemas computacionais com capacidades específicas
	G06N3/00	Redes neurais artificiais
	G06N5/00	Sistemas baseados em lógica Fuzzy
	G06N7/00	Sistemas baseados em algoritmos genéticos ou evolução
	G06N20/00	Machine learning (aprendizado de máquina)
G06N5/02	Sistemas especialistas para controle, diagnóstico ou monitoramento	
Robótica e Automação Industrial	B25J	Manipuladores industriais; robôs (braços robóticos, robôs industriais e seus controles)
	B60W	Controle de veículos por assistentes eletrônicos (veículos inteligentes, autônomos)
IoT e Automação Distribuída	G05B19/418	Automação industrial distribuída; controle remoto de processos via rede
	H04L12/24	Redes para controle e monitoramento (IoT industrial)
	G06F17/18	Processamento de dados com aprendizado de máquina
	G06F17/30	Sistemas de recomendação, otimização e tomada de decisão

- **Análise da pesquisa detalhada:** o conjunto refinado da pesquisa detalhada resultou em 69 patentes. Cada patente foi cuidadosamente analisada com o intuito de extrair conteúdo técnico, tendências tecnológicas e aplicações industriais. Nessa fase, os documentos foram sistematicamente classificados nos três níveis de taxonomia, possibilitando uma avaliação estruturada do papel da Inteligência Artificial, das técnicas de controle, das áreas de aplicação, dos equipamentos e dos processos.

Esse procedimento metodológico garantiu uma compreensão abrangente e precisa do estado da arte no campo pesquisado, fornecendo base confiável para a identificação de oportunidades de inovação e lacunas de pesquisa.

### 2.1.3 Escolha das Taxonomias Meso e Micro

Na Tabela 3 são apresentadas as taxonomias meso e micro escolhidas para este trabalho. A taxonomia meso agrupa os grandes domínios ou classes tecnológicas relevantes para o *roadmap* de Automação e Controle com IA, enquanto a taxonomia micro detalha, dentro de cada domínio (subclasses), as principais técnicas e abordagens específicas atualmente empregadas ou em desenvolvimento.

**TABELA 3 - TAXONOMIAS ESCOLHIDAS PARA AS ANÁLISES MESO E MICRO**

<b>Taxonomia Meso</b>	<b>Taxonomia Micro</b>	<b>Descrição</b>
Técnicas de IA	Aprendizado de máquina	Método que permite aos sistemas identificar padrões e tomar decisões com base em dados históricos
	Aprendizado por reforço	Técnica em que agentes aprendem a tomar decisões por meio de recompensas e penalidades em ambientes dinâmicos
	Aprendizado supervisionado	Modelo treinado com dados rotulados para prever ou classificar novas informações
	Aprendizado profundo	Abordagem baseada em redes neurais profundas para reconhecimento de padrões complexos
	Visão computacional	Processamento e interpretação de imagens e vídeos para extração de informações relevantes
	Algoritmos evolucionários	Técnicas inspiradas na evolução natural para otimização de soluções
	Redes neurais	Modelos computacionais que simulam o funcionamento do cérebro para aprendizado e tomada de decisão
	Outros	Técnicas de IA não classificadas nas categorias anteriores

<b>Taxonomia Meso</b>	<b>Taxonomia Micro</b>	<b>Descrição</b>
Técnicas de controle	Controle adaptativo	Ajusta automaticamente os parâmetros do controlador conforme mudanças no sistema
	Controle robusto	Mantém desempenho mesmo diante de incertezas e perturbações no modelo
	Controle preditivo	Prevê o comportamento futuro do sistema para otimizar decisões de controle
	Controle por aprendizado iterativo (ILC)	Melhora o desempenho em tarefas repetitivas com base em erros anteriores
	Controle baseado em aprendizado profundo (DL-based control)	Controle baseado em aprendizado profundo, combinando IA com estratégias de controle.
	PID e variações	Controladores clássicos que ajustam proporcional, integral e derivativamente o erro
	Lógica Fuzzy	Utiliza lógica nebulosa para lidar com incertezas e variabilidade nos sistemas
	Controle por modos deslizantes (SMC)	Método não linear que força o sistema a seguir uma trajetória desejada mesmo com perturbações
Área de aplicação	Outros	Técnicas de controle não classificadas nas categorias anteriores
	Transporte	Sistemas aplicados a veículos, tráfego e logística de mobilidade
	Saúde	Tecnologias voltadas ao monitoramento, diagnóstico e suporte clínico
	Energia	Controle e otimização de geração, distribuição e consumo energético
	Agricultura	Automação de processos agrícolas e monitoramento ambiental
	Logística	Gestão de cadeias de suprimento, armazenagem e distribuição
	Manufatura	Automação e controle de processos produtivos industriais
	Construção civil	Tecnologias aplicadas à gestão e execução de obras
	Telecomunicação	Otimização de redes e sistemas de comunicação
	Navegação e posicionamento	Sistemas de localização, orientação e rastreamento
Outros	Áreas não contempladas nas categorias anteriores	

<b>Taxonomia Meso</b>	<b>Taxonomia Micro</b>	<b>Descrição</b>
Equipamento	Microcontrolador	Unidade de controle embarcada em sistemas simples e dedicados
	Câmera	Sensor óptico utilizado em sistemas de visão computacional
	Robô	Sistema autônomo ou semi-autônomo para execução de tarefas físicas
	Veículos autônomos	Plataformas móveis com capacidade de navegação e decisão sem intervenção humana
	Computador embarcado	Sistema computacional integrado a equipamentos industriais para controle local
	Outros	Equipamentos não classificados nas categorias anteriores
Processo	Gerenciamento de energia	Otimização do uso e distribuição de energia elétrica ou térmica
	Climatização	Controle térmico de ambientes e qualidade do ar
	Gerenciamento de tarefas em linhas de produção	Organização e controle de operações industriais sequenciais
	Gerenciamento de Tráfego Rodoviário	Sistemas inteligentes para controle e monitoramento de vias
	Locomoção	Controle de movimento em sistemas robóticos ou veículos
	Outros	Processos não contemplados nas categorias anteriores

Essa classificação foi construída a partir da análise do contexto de atuação do ISI-SE em seus projetos de inovação e as tendências identificadas por meio da leitura dos artigos científicos e das patentes. Essa combinação permitiu delinear uma visão abrangente e alinhada com a realidade nacional e internacional, servindo de base para orientar as ações estratégicas de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

# 3 RESULTADOS - ARTIGOS CIENTÍFICOS

Nesta seção serão apresentadas as análises macro, meso e micro dos artigos. Em um primeiro momento, serão discutidos aspectos pontuais sobre a análise macro como o número de artigos publicados, o número de artigos considerando o país de origem dos autores e quanto a filiação institucional dos mesmos, indicativos, os quais, proporcionam uma ideia não apenas sobre a realidade das pesquisas no período analisado mas também sobre parcerias entre universidades, empresas ou ICT's (Instituição de Ciência e Tecnologia). Após a análise macro, estes artigos serão classificados segundo as informações dos temas por eles abordados, na chamadas análises meso e micro, revelando detalhes sobre o foco principal das pesquisas nestas instituições.

Um detalhe importante sobre essas classificações é que alguns artigos eram revisões de literatura que, geralmente, as informações sobre técnicas de IA e controle eram apresentadas de forma mais abrangente. Nestes casos, os artigos não recebiam classificações nas categorias **Técnica de IA** e **Técnica de controle**. Havia ainda aqueles que eram revisões voltadas a uma técnica específica ou a uma área de aplicação, por exemplo, e que generalizavam as informações referentes as outras classes. Mesmo nesses casos, a classificação era realizada de maneira análoga.

## 3.1 ANÁLISE MACRO DOS ARTIGOS CIENTÍFICOS

Segundo a estratégia de busca descrita no capítulo anterior, foram analisados, ao todo, 200 artigos científicos. Deste total, 126 (63%) artigos apresentavam conteúdos pertinentes ao escopo deste estudo e foram incluídos para a realização das análises meso e micro (veja a Figura 2-b).

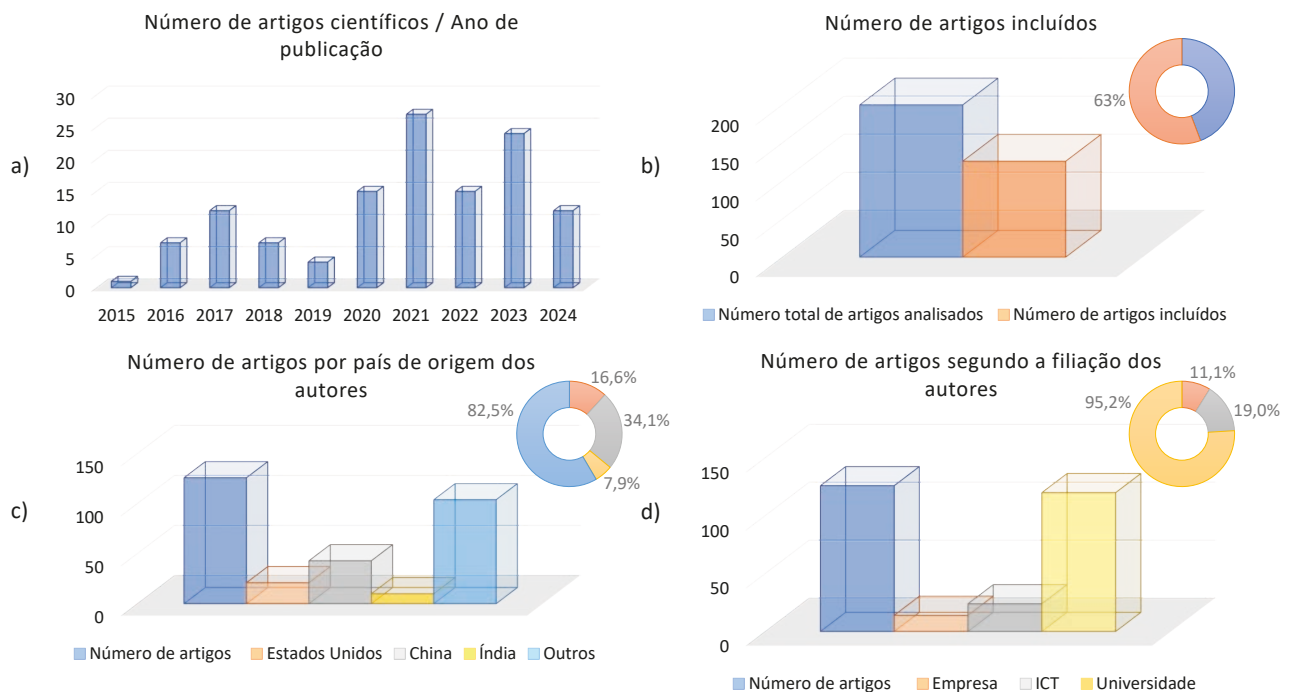
A Figura 2-a apresenta a distribuição dos artigos segundo o ano de publicação. Nota-se que as pesquisas se tornaram mais recorrentes nos anos de 2020 à 2025, com um total de 93 artigos publicados. Eventos como a crescente expansão do mercado de IA, com recordes de investimentos globais neste período (segundo a *AI index report*), e a popularização das IAs generativas entre 2021 e 2022, possivelmente impulsionaram a demanda por soluções inovadoras nos setores industriais.

Ainda no que se refere a investimentos, países como Estados Unidos e China vem liderando o ranking mundial desde 2013, sendo uma possível justificativa do perfil do gráfico da Figura 2-c. Nela, nos é apresentado a distribuição dos artigos segundo o país de origem dos autores. Note que, dos 126 artigos incluídos na classificação, 21 (16,6%) tiveram autores de nacionalidade norte americana, 43 (34,1%) com autores de origem chinesa e 10 (7,9%) com autores de nacionalidade indiana. A lista ainda incluiu países como Reino unido, Austrália, Alemanha, entre outros, os quais foram inseridos na subclasse Outros, contabilizando 104 (82,5%) artigos.

Na Figura 2-d é apresentada a distribuição dos artigos quanto a filiação institucional dos autores. Como era de se esperar, 120 (95,2%) artigos tiveram participação de Universidades, 24 (19%) de instituições de tecnologia (ICTs) e apenas 14 (11,1%) o envolvimento de alguma empresa.

#### FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE ARTIGOS CIENTÍFICOS SEGUNDO:

a) o ano de publicação; b) a comparação com o número total de artigos analisados; c) o país de origem dos autores; e d) a filiação institucional dos autores.



## 3.2 ANÁLISE MESO E MICRO DOS ARTIGOS CIENTÍFICOS

Após a leitura dos artigos, foi possível a identificação das classes taxonômicas, as chamadas taxonomias meso, e dos conjuntos de subclasses que representam as taxonomias micro. A Figura 3 apresenta a distribuição dos artigos com relação a cada conjunto taxonômico, cuja análise será discutida a seguir.

### 3.2.1 Técnicas de IA

Sabe-se que o campo da inteligência artificial não possui uma unanimidade no sentido de categorização ou hierarquização de técnicas, sendo um aspecto bastante discutido na literatura. Por exemplo, alguns autores classificam aprendizado por reforço ou aprendizado profundo como sendo ramos de aprendizado de máquina e outros consideram como campos independentes. Além disso, quando se trata de IA, geralmente não é possível analisarmos uma técnica de maneira isolada. Como por exemplo, um sistema que utiliza um modelo de rede neural necessita de algoritmos de treinamento, que são baseados, tipicamente, em estratégias evolucionárias como os algoritmos de otimização por enxame de partículas (do inglês *particle swarm optimization*) ou em abordagens de aprendizado por reforço, como os algoritmos de aprendizado Q (do inglês *Q-Learning*). Partindo deste pressuposto, nesta classe foram agrupados os artigos que apresentavam alguma metodologia de inteligência artificial, mesmo quando associada à diferentes ramos do campo da IA. Se o artigo mencionasse o uso de redes neurais e algoritmos de treinamento baseados em aprendizado por reforço, este era classificado simultaneamente nas duas subclasses correspondentes.

Note que os artigos foram classificados majoritariamente na subclasse Redes neurais (veja a Figura 3-a), contabilizando 45 (35,7%) artigos. A explicação para esta tendência é que as redes neurais possuem uma flexibilidade no que diz respeito à implementação. Elas podem ser usadas para identificação de modelos, ou seja, a rede neural substitui um modelo matemático complexo, a partir do treinamento com dados provenientes do sistema real, como também, ser responsáveis pela atualização dos ganhos dos controladores.

Outra possibilidade consiste na aplicação da rede neural em substituição ao conjunto formado pela planta e pelo sistema de controle, ou, de maneira resumida, a rede neural recebe os dados da planta como entrada e tem como saída, a ação de controle. Como consequência do uso de redes neurais, as subclasses Aprendizado por reforço, com 30 (23,8%) artigos, e Aprendizado profundo, com 20 (15,8%) artigos, também tiveram números expressivos, já que, comumente, os algoritmos de treinamento são baseados

em aprendizado por reforço ou aprendizado profundo. Nas demais subclasses foram identificados 24 (19%) artigos em Aprendizado de máquina, 20 (15,8%) em Visão computacional, 6 (4,7%) em Aprendizado supervisionado, 15 (11,9%) em Algoritmos evolucionários e 10 (7,9%) em Outros.

### 3.2.2 Técnicas de controle

Assim como no caso do item anterior, se levarmos em consideração o sentido literal das metodologias, podem haver dependências simultâneas entre os elementos do conjunto. Por exemplo, um controle PID clássico pode ser considerado um controle robusto desde que atenda as características de robustez estabelecidas para o sistema no qual foi inserido. Ou ainda, pode ser considerado como um controle adaptativo, caso o controlador possuir algum grau de adaptação ao ambiente, com atualizações frequentes em seus ganhos. Entretanto, nesta classe foram inseridos os artigos que apresentaram em sua documentação, pelo menos uma técnica de controle de maneira explícita.

Outro ponto importante é que, neste trabalho, a lógica Fuzzy foi considerada como uma técnica de controle, mas também pode ser classificada como técnica de IA, visto que alguns autores a classificam como inteligência artificial baseada em regra ou simbólica. No entanto, neste estudo, optou-se por considerar apenas os principais ramos da inteligência artificial na classe Técnicas de IA.

A Figura 3-b apresenta a distribuição dos artigos segundo a técnica de controle. Note que 26 (23,2%) artigos foram classificados na subclasse Controle adaptativo, 18 (14,2%) em Controle preditivo, 12 (9,5%) em *DL-based control* (do inglês *deep learning based control*), que são os sistemas de controles baseados em redes neurais mencionados no item anterior. Além disso, em lógica Fuzzy foram classificados 24 (19%) artigos, 29 (23,2%) em PID e variações e 10 (7,9%) em Controle robusto. No que se refere à subclasse Outros, 31 (16,6%) artigos foram classificados nesta categoria, a qual abrange as técnicas de controle que diferem daquelas especificadas no conjunto taxonômico, como, por exemplo, as metodologias de controle por modos deslizantes e por aprendizado iterativo.

### 3.2.3 Área de aplicação

Eram classificados nesta taxonomia, os artigos cujo conteúdo possuíam aplicações destinadas para algum setor industrial específico. Se não fosse possível a identificação, o artigo não era incluído na taxonomia. Como podemos observar, na Figure 3-c, os maiores percentuais estão associados ao setor energético e de manufatura, uma vez que, em sua maioria, os temas tinham como foco a otimização da eficiência energética em interiores, por meio do uso de sistemas HVAC (do inglês *heating, ventilation and*

*air conditioning*) e de sistemas de agente único ou multi agentes, bem como temas associados ao controle de manipuladores robóticos para execução de tarefas repetitivas, frequentemente encontrados nos setores de manufatura. Neste sentido, a distribuição dos artigos ocorreu da seguinte forma: 28 (22,2%) foram classificados na subclasse Energia, 20 (15,8%) em Manufatura, 12 (9,5%) em Saúde, 14 (11,1%) em Navegação e posicionamento e 42 (33,3%) em Outros.

### 3.2.4 Equipamento

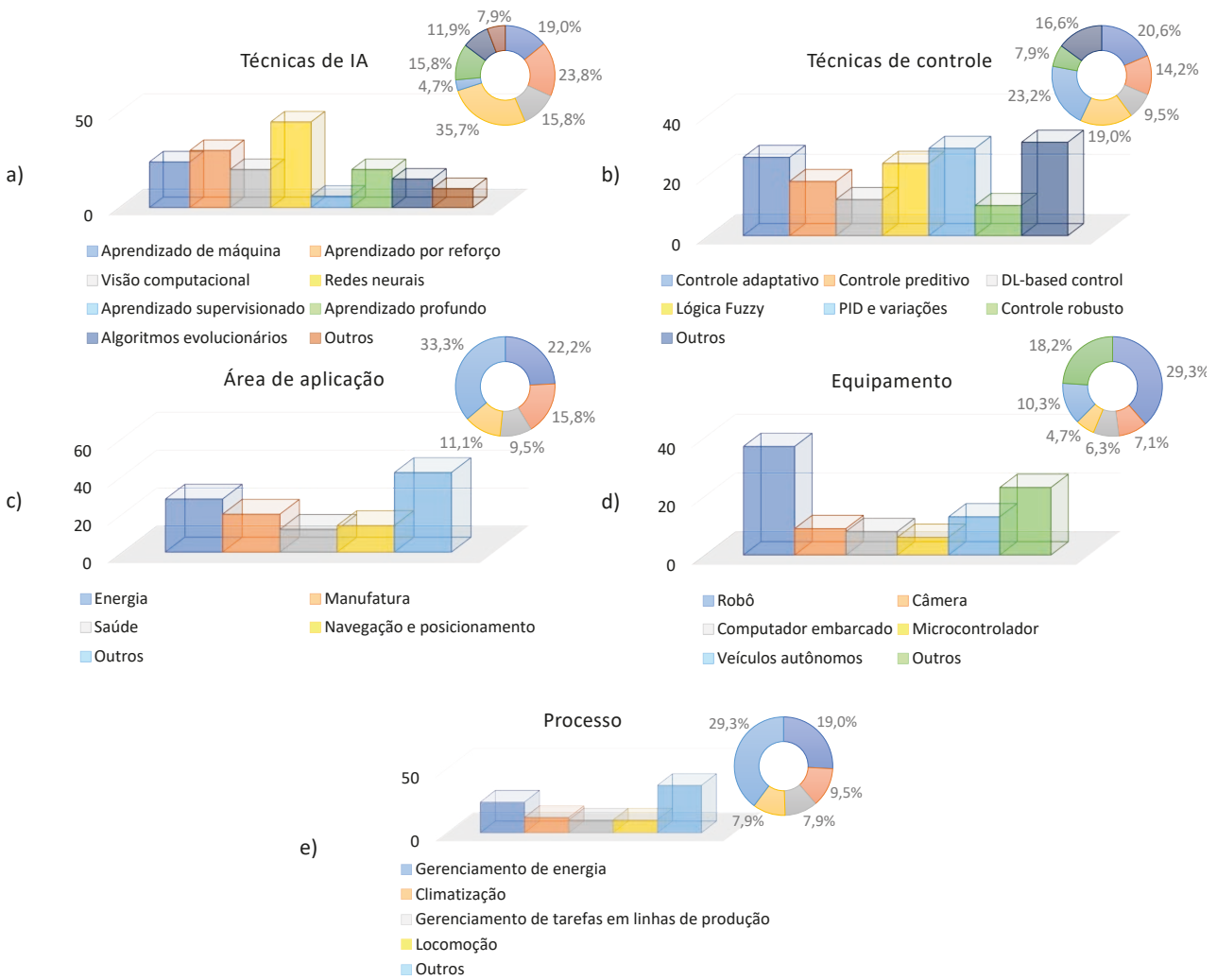
Nesta classe foram inseridos os artigos que apresentaram informações sobre o equipamento utilizado. Note que, na Figura 3-d, 37 (29,3%) artigos foram inseridos na subclasse Robô, visto que o setor de manufatura foi uma das áreas de aplicação que era frequentemente identificada nas análises. Implicitamente, os temas que envolvem soluções para os desafios de sistemas de navegação em veículos autônomos estão associados com computação embarcada ou o uso de câmeras. No entanto, adotou-se uma abordagem de tal modo que o artigo era incluído em uma subclasse, apenas quando o foco principal do trabalho estivesse direcionado à ela. Além dos artigos classificados na subclasse Robô, de um modo geral, os temas tiveram uma distribuição uniforme com 9 (7,1%) artigos incluídos em Câmera, 8 (6,3%) em Computador embarcado, 6 (4,7%) em Microcontrolador, 13 (10,3%) em Veículos autônomos e 23 (18,2%) classificados em Outros o qual incluiu equipamentos como controlador lógico programável, quadricóptero, FPGA (do inglês *field programmable gate array*) e guindastes.

### 3.2.5 Processo

A distribuição de artigos em função do tipo de processo é apresentada na Figura 3-e. Note que, considerando o que foi discutido nos itens anteriores, 24 (19%) dos artigos foram classificados na subclasse Gerenciamento de energia, 12 (9,5%) em Climatização, 10 (7,9%) em Gerenciamento de tarefas em linhas de produção, 10 (7,9%) em Locomoção e 37 (29,3%) artigos classificados em Outros a qual também incluiu processos relacionados ao gerenciamento de tráfego rodoviário.

**FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE ARTIGOS CIENTÍFICOS SEGUNDO:**

a) as técnicas de IA; b) as técnicas de controle; c) a área de aplicação; d) equipamentos permitidos; e e) o processo envolvido.



## 4 RESULTADOS - PATENTES SOLICITADAS

Nesta seção, serão apresentadas as análises macro, meso e micro das patentes solicitadas, abordando aspectos pontuais como o número de pedidos realizados no período delimitado pelo escopo do trabalho, os países onde esses pedidos foram oficializados e as instituições às quais os inventores estão afiliados, bem como as distribuições do número de patentes solicitadas em função das classes principais de taxonomias.

Outro ponto a ser destacado é que a distribuição das taxonomias referentes à análise micro das patentes é apresentada de maneira distinta daquela decorrente da análise dos artigos. Isso é resultado do caráter mais generalista do conteúdo das patentes, o que frequentemente dificulta a identificação de especificidades, como, por exemplo, as técnicas de controle e inteligência artificial aplicadas. Consequentemente, algumas subclasses taxonômicas são menos recorrentes ou não são identificadas nas documentações.

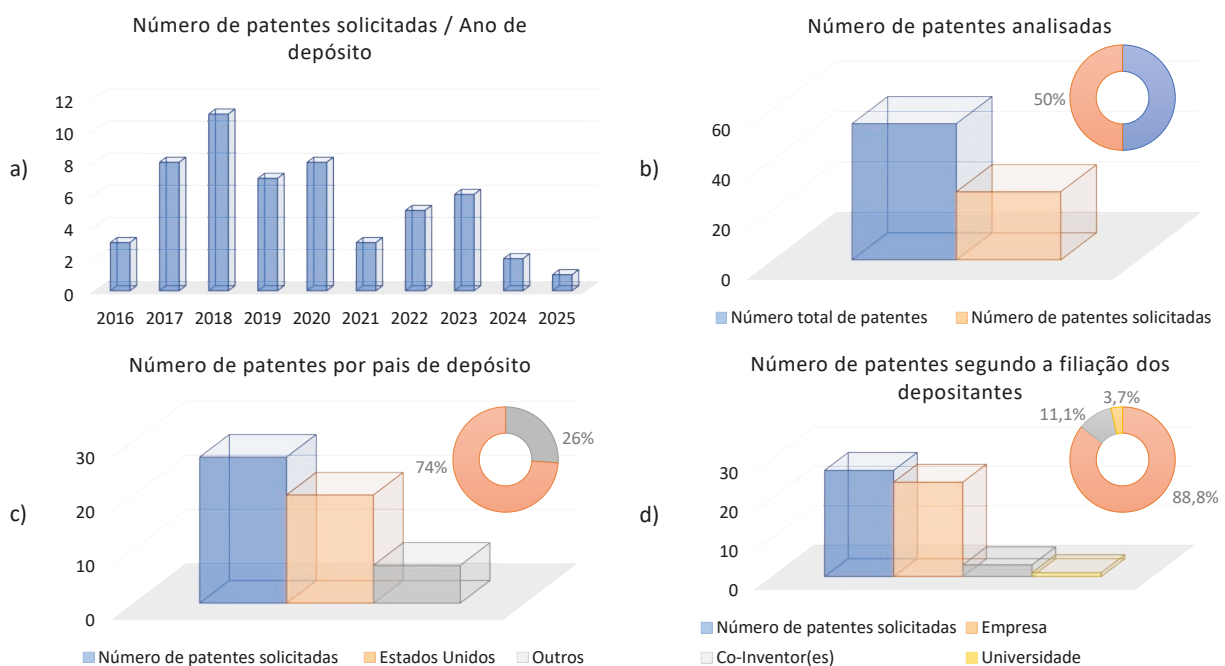
Sendo assim, nesta seção, a terminologia Outros, foi utilizada para agrupar elementos menos recorrentes como o caso das técnicas de inteligência artificial que abrangeram as taxonomias de aprendizado profundo, aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado, processamento de linguagem natural e algoritmos evolucionários, ou das áreas de aplicação de transporte, logística, saúde, agricultura, telecomunicações, construção civil e navegação e posicionamento. Além disso, para as taxonomias Técnicas de IA e Técnicas de controle, a terminologia abrange elementos que podem pertencer a todas as subclasses especificadas no conjunto em questão, tendo em vista que a premissa para a inclusão de patentes ou artigos para análise era que seu conteúdo contemplasse pelo menos uma técnica de IA e uma técnica de controle. Por exemplo, qualquer técnica de controle pode ser aplicada à patente US10739763B2. Do ponto de vista das taxonomias meso, serão utilizadas as mesmas classes identificadas a partir da leitura e análise dos artigos científicos. Sendo assim, para fins de esclarecimento, não foi adotada nenhuma alteração em relação ao que foi apresentado no Capítulo 3.

## 4.1 ANÁLISE MACRO DAS PATENTES SOLICITADAS

A Figura 4-a ilustra a distribuição das patentes conforme o ano de depósito. Observa-se um aumento significativo no número de solicitações entre 2017 e 2020, principalmente relacionadas ao segmento de IoT (do inglês *Internet of Things*). Esse crescimento pode estar associado à expansão contínua do mercado nessa área e a eventos relevantes do período, como o início da disponibilização comercial da tecnologia 5G, que impulsionou a demanda por dispositivos inteligentes nas indústrias. A partir de 2021, verifica-se uma nova tendência de crescimento, possivelmente vinculada à difusão acelerada de tecnologias baseadas em inteligência artificial, em especial sistemas generativos, como foi o caso do ChatGPT, cujo lançamento ocorreu em meados de 2022.

**FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE PATENTES SOLICITADAS SEGUNDO:**

*a) o ano de depósito; b) a comparação com o número total de patentes; c) o país de depósito; e d) a filiação institucional dos depositantes.*



A Figura 4-b ilustra o número de patentes solicitadas com relação o número total de patentes consideradas neste trabalho. Podemos observar que das 54 patentes analisadas, 27 (50%) patentes ainda estão em processo de verificação.

Segundo a Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI), países como China, Estados Unidos e Japão vêm liderando, desde 2020, o ranking mundial dos países mais procurados para o depósito de propriedades intelectuais. Como reflexo dessa tendência, na Figura 4-c, nota-se que a grande maioria dos depósitos foi realizada nos Estados Unidos, contabilizando 20 (74%) patentes. Outro fator que justifica este elevado número de depósitos é que a maioria dos depositantes está vinculada a empresas ou instituições sediadas nos Estados Unidos. Mais precisamente, das 54 patentes consideradas pertinentes ao escopo deste trabalho, incluindo patentes solicitadas e concedidas, um total de 47 foram depositadas nos Estados Unidos, sendo 40 delas provenientes de instituições norte-americanas. Na subclasse Outros, a lista de países ainda inclui o Irã, Finlândia, Canadá, China, Polônia, México e Austrália, cada um com uma patente depositada.

Diferente do que foi mostrado nas seções anteriores, os pedidos de patentes tem sido impulsionados principalmente por instituições privadas, que visam a proteção de inovações tecnológicas como uma estratégia para garantir exclusividade de mercado ou para obter receitas por meio de *royalties*. Neste sentido, na Figura 4-d, nota-se que, 3 (11,1%) patentes foram solicitadas por inventores independentes, 1 (3,7%) patente foi solicitada pela Northeastern University e 24 por empresas privadas (88,8%).

## 4.2 ANÁLISE MESO E MICRO DAS PATENTES SOLICITADAS

Após a leitura da documentação das patentes, o percentual de cada classe de taxonomias meso e micro foi distribuído como apresentado na Figura 5. Visando a simplicidade, as explicações serão listadas abaixo conforme a classe de taxonomia principal.

### 4.2.1 Técnicas de IA

Considerando as técnicas de IA, a maioria das patentes foi classificada junto às subclasses de Aprendizado de máquina e de Redes neurais, com 13 (48,14%) e 11 (40,74%) patentes identificadas, respectivamente. É importante ressaltar que, de maneira geral, aprendizado de máquina é um ramo da IA que engloba campos como aprendizado por reforço, aprendizado supervisionado, não supervisionado e aprendizado profundo. Então, por via de regra, quando é dito que o processo em questão faz o uso de um modelo de rede neural, presume-se, que também emprega alguma técnica de aprendizado de máquina para treinamento deste modelo. Entretanto, de maneira análoga ao procedimento adotado na análise dos artigos, neste estudo, são incluídas na subclasse de aprendizado de máquina apenas as patentes que apresentam tal especificação em sua documentação de maneira

explícita. Caso contrário, quando não há especificação da técnica de IA ou quando a patente permite a aplicação de qualquer das subclasses taxonômicas identificadas neste estudo ou ainda, permitem a aplicação de técnicas como aprendizado supervisionado, não supervisionado, aprendizado profundo, algoritmos evolucionários ou processamento de linguagem natural, ela é considerada como parte da subclasse Outros.

#### 4.2.2 Técnicas de controle

Note que a maior parcela das patentes analisadas englobam a subclasse Controle preditivo, com um percentual de 18,51% do número de patentes solicitadas, ou a subclasse taxonômica Outros, com um percentual de 62,96%. Mais especificamente, das 27 patentes solicitadas, foram identificadas 5 que possuem pelo menos uma técnica de controle preditivo ou que possibilitam a implementação da técnica, e 17 que permitem a implementação de uma técnica diferente daquelas descritas no conjunto de subclasses taxonômicas ou permitem o uso de técnicas como PID, controle por aprendizado iterativo, controle robusto ou controle por modos deslizantes, que foram identificadas com um percentual menor. Além disso, se não houvesse nenhum tipo de especificação sobre a técnica de controle utilizada, mas a patente apresentava aplicabilidade geral à qualquer técnica de controle, ela era classificada na subclasse Outros.

#### 4.2.3 Área de aplicação

Assim como observado para os artigos científicos, observou-se uma predominância de patentes com o foco em aplicações nas grandes áreas de manufatura e energia, sendo identificadas 8 (29,62%) e 3 (11,11%) patentes, respectivamente. Uma possível explicação para esta tendência é a crescente busca por soluções tecnológicas para desafios de urbanização como é o caso das chamadas casas inteligentes ou cidades inteligentes. Estes sistemas dependem de uma rede IoT e da integração de dispositivos com capacidade de computação de borda, recursos que permitem a aquisição e manipulação de dados de maneira local e descentralizada, possibilitando a aplicação de algoritmos de inteligência artificial embarcada diretamente nos dispositivos. A finalidade deste tipo de implementação permite a otimização em termos de variáveis que sejam prioritárias ao sistema em questão. Por exemplo, das 3 patentes que se enquadram na subclasse Energia, 2 possuem como foco principal, o gerenciamento energético em sistemas de iluminação voltados para cidades inteligentes, enquanto a outra está associada a um sistema de resfriamento para centrais de dados. Entretanto, sistemas que utilizam redes IoT e computação de borda não se restringem apenas ao setor energético. No contexto industrial, podem ser implementados em diversos segmentos como é o caso

da manufatura. Por fim, para além do que já foi discutido previamente, a subclasse Outros engloba patentes solicitadas cujo foco da aplicação se estende a áreas como logística, saúde, agricultura, telecomunicações, construção civil, transporte ou navegação e posicionamento.

#### **4.2.4 Equipamento**

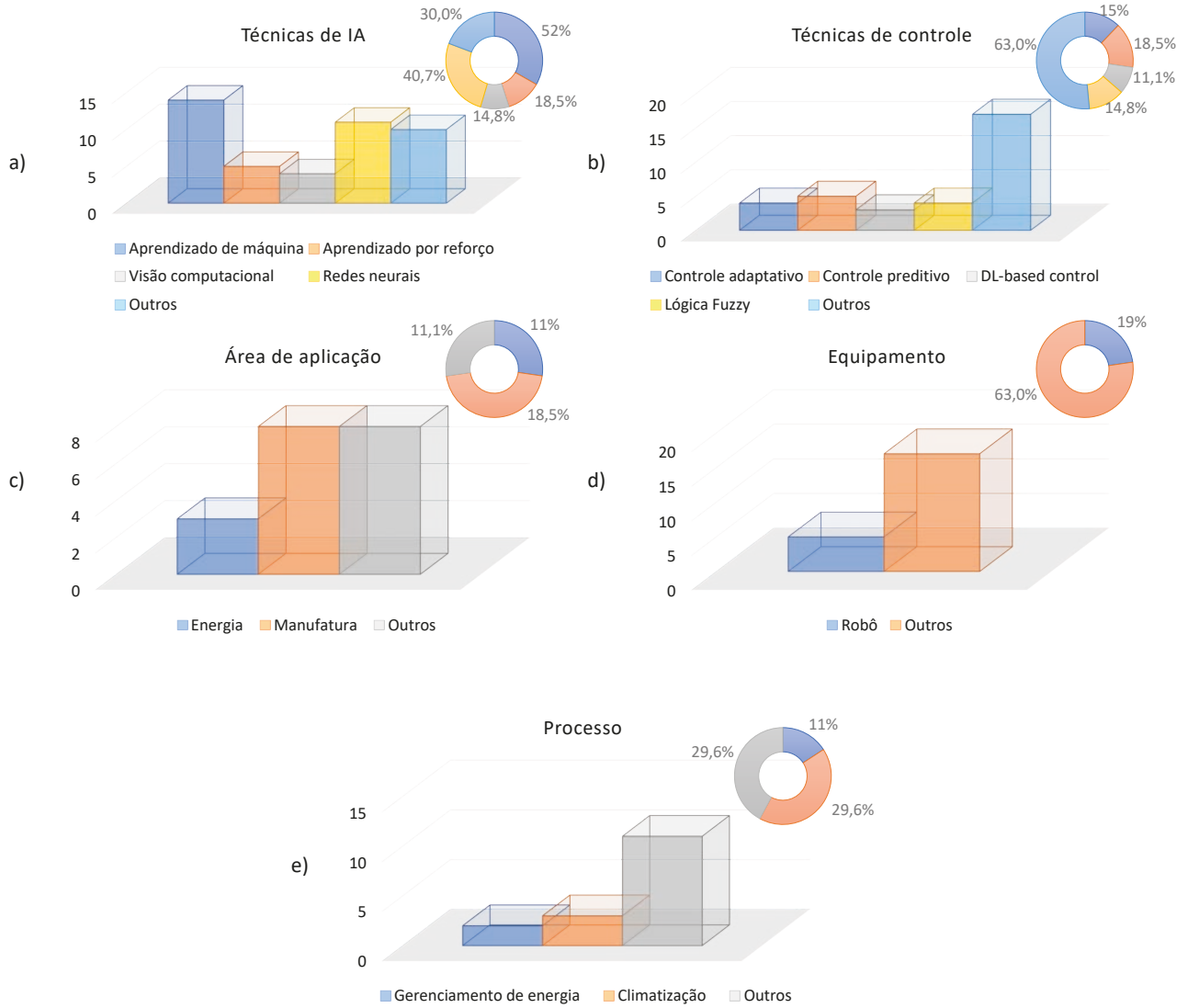
No que se refere aos equipamentos, a distribuição do percentual de patentes pode ser considerada como um reflexo do que foi mencionado no item anterior, uma vez que grande parte delas permitiam aplicações em manufatura, segmento reconhecido pela extensa utilização de robôs industriais. Neste sentido, foram identificadas 5 (18,51%) patentes que pertenciam à subclasse Robô, com temas que incluíam desde o controle de posição e orientação de peças em linhas de produção (patente US2024261962A1) até o gerenciamento de frotas de robôs para redes de cadeia de valor (patente US2022187847A1). Além disso, na subclasse Outros foram incluídas patentes que permitiam o uso de equipamentos como câmeras, computadores embarcados, microcontroladores ou veículos autônomos.

#### **4.2.5 Processo**

No caso da classe Processo, verificou-se que 2 (7,40%) patentes pertenciam à subclasse Gerenciamento de energia, uma vez que grande parte delas tratavam de aplicações no setor energético, e 3 (11,11%) à subclasse Climatização, que em sua maioria abordavam tópicos associados principalmente à sistemas HVAC, cuja busca por inovações tem se ampliado nos últimos anos. Já as patentes que foram alocadas na subclasse Outros incluíam, também, processos associados ao gerenciamento de tráfegos rodoviários, ao gerenciamento de tarefas em linha de produção ou à locomoção.

**FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE PATENTES SOLICITADAS SEGUNDO:**

a) as técnicas de IA; b) as técnicas de controle; c) a área de aplicação; d) equipamentos permitidos; e e) o processo envolvido.



# 5 RESULTADOS – PATENTES CONCEDIDAS

Nesta seção serão apresentadas as análises das patentes concedidas. No geral, o conteúdo desta seção se assemelha ao que foi apresentado anteriormente no Capítulo 4, com algumas ressalvas, como a inclusão da distribuição das patentes em função do ano de concessão e algumas alterações no conjunto de subclasses taxonômicas que são apresentadas nas figuras. De um modo geral, a distribuição das patentes concedidas se dá de maneira mais uniforme, com menor divergência entre as subclasses, então, não se faz necessária a inclusão dos percentuais menos expressivos na subclasse Outros. Além disso, como mencionado no Capítulo 4, tal subclasse possui significados diferentes e que dependem da classe principal analisada. Mais especificamente, nas subclasses Outros, das classes Técnicas de IA e Técnicas de controle, foram incluídas as patentes que permitiam o uso de alguma técnica diferente daquelas especificadas no conjunto taxonômico, ou que, de maneira geral, permitiam o uso de qualquer técnica, ou ainda aquelas que não possuíam quaisquer informações sobre as técnicas utilizadas. Em contrapartida, nas demais classes, se não fosse identificada a área de aplicação, os equipamentos ou o processo, a patente não recebia classificação na taxonomia em questão.

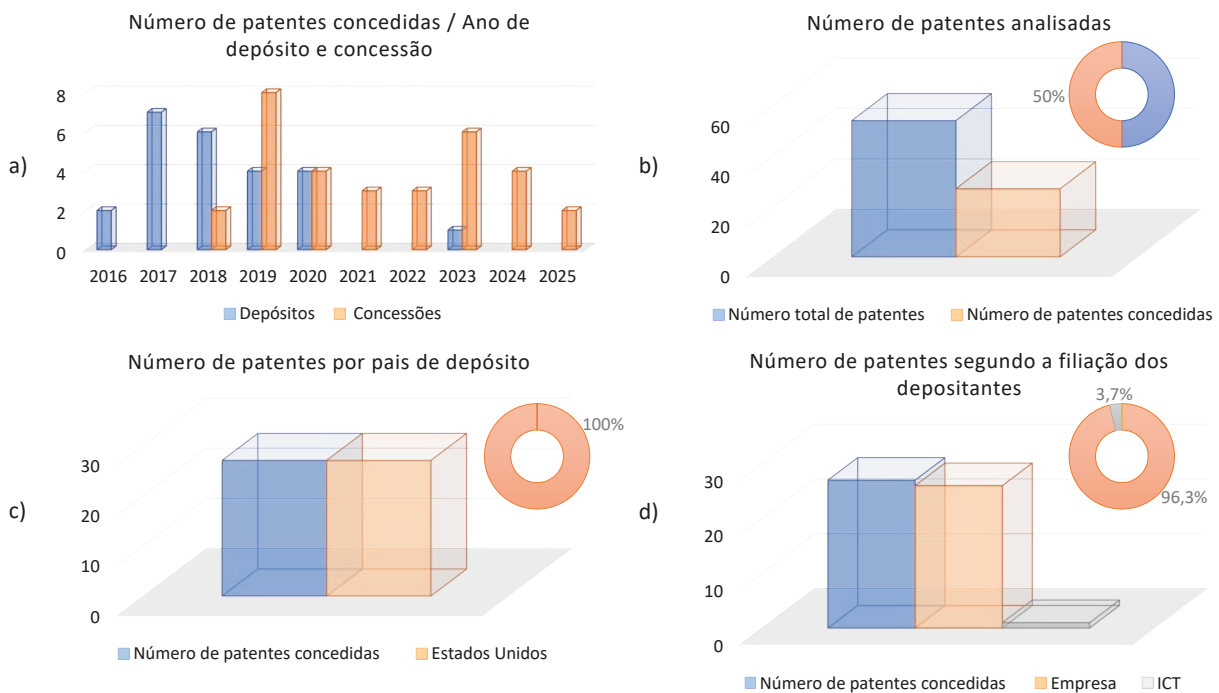
## 5.1 ANÁLISE MACRO DAS PATENTES CONCEDIDAS

O gráfico na Figura 6-a apresenta a distribuição do número de patentes concedidas em função do ano de depósito e do ano de concessão. É possível observar que a distribuição das patentes, no que se refere ao número de depósitos, segue as mesmas tendências observadas na análise macro das patentes solicitadas, com números mais expressivos entre os anos de 2017 e 2020 (total de 17 patentes no período). Como consequência, podemos inferir que as possíveis causas para este comportamento são as mesmas discutidas nas seções anteriores. Em contrapartida, considerando que o tempo médio das concessões varia de 3 a 5 anos, em geral, o número de concessões prevaleceu no período de 2021 a 2025, contabilizando um total de 18 patentes.

A Figura 6-b apresenta o número total de patentes que foram concedidas em comparação com o número total de patentes consideradas neste trabalho. Mais especificamente, de um total de 54 patentes analisadas, 27 (percentual de 50%) foram concedidas. Além disso, todos os depósitos foram realizados nos Estados Unidos (veja a Figura 6-c), majoritariamente por empresas e institutos sediados no país. No que se refere à filiação dos depositantes, novamente, foi identificado um maior percentual de pedidos provenientes de depositantes vinculados a empresas (percentual de 96,3%), incluindo 23 empresas norte-americanas, 2 empresas com sede no Reino Unido e 1 empresa israelense, além de 1 pedido realizado por ICT (veja a Figura 6-d).

### FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE PATENTES CONCEDIDAS SEGUNDO:

a) o ano de depósito e de concessão; b) a comparação com o número total de patentes; c) o país de depósito; e d) a filiação institucional dos depositantes.



## 5.2 ANÁLISE MESO E MICRO DAS PATENTES CONCEDIDAS

Após a leitura da documentação das patentes, o percentual de cada classe de taxonomias meso e micro foi distribuído como apresentado na Figura 6. Visando a simplicidade, as explicações serão listadas abaixo conforme a classe de taxonomia principal.

### 5.2.1 Técnicas de IA

No que se refere à técnica de IA, os maiores percentuais foram concentrados nas subclasses Aprendizado de máquina e redes neurais, ou seja, das 27 patentes concedidas, 20 (percentual de 74%) permitiam o uso de alguma técnica de aprendizado de máquina e 8 (percentual de 29, 6%) algum tipo de modelo de rede neural. Com números menos expressivo, 3 (percentual de 11, 1%) patentes foram classificadas na subclasse aprendizado por reforço, 1 (percentual de 3, 7%) em aprendizado supervisionado e 2 (percentual de 7, 4%) em visão computacional. Além disso, vale ressaltar que não foram identificadas outras técnicas que diferem do conjunto taxonômico considerado neste trabalho, nem patentes concedidas que não especificassem alguma subclasse de maneira explícita. Sendo assim, não houve patentes classificadas na subclasse Outros.

### 5.2.2 Técnicas de controle

Majoritariamente, a distribuição das patentes segundo as técnicas de controle foram classificadas na subclasse Controle adaptativo, incluindo 11 (percentual de 40,7%) de um total de 27 patentes concedidas. Este percentual está intrinsecamente associado ao significado da palavra controle adaptativo, que remete a qualquer técnica de controle com alguma característica de autoajuste. Neste sentido, técnicas como controle de aprendizado iterativo, controles baseados em lógica Fuzzy ou controles baseados em IA, nas quais a ação de controle é determinada diretamente por modelos de redes neurais, podem ser consideradas como controles adaptativos. Ou seja, termos que generalizam as especificidades técnicas de uma patente tendem a ser mencionados com frequência. As classificações ainda incluem 2 patentes na subclasse Controle preditivo, 3 patentes em *DL-based control*, 1 em lógica Fuzzy e 11 patentes na subclasse Outros.

### 5.2.3 Área de aplicação

O conteúdo das patentes era voltado principalmente para as áreas de energia, manufatura e agricultura ou, mais precisamente, das 27 patentes, 1 (percentual de 3,7%) foi classificada na subclasse Energia e 2 (percentual de 7, 4%) nas subclasses Manufatura e Agricultura. Além disso, na subclasse Outros foi incluída apenas 1 patente, cuja aplicabilidade abrange qualquer setor industrial do conjunto de taxonomias.

### 5.2.4 Equipamento

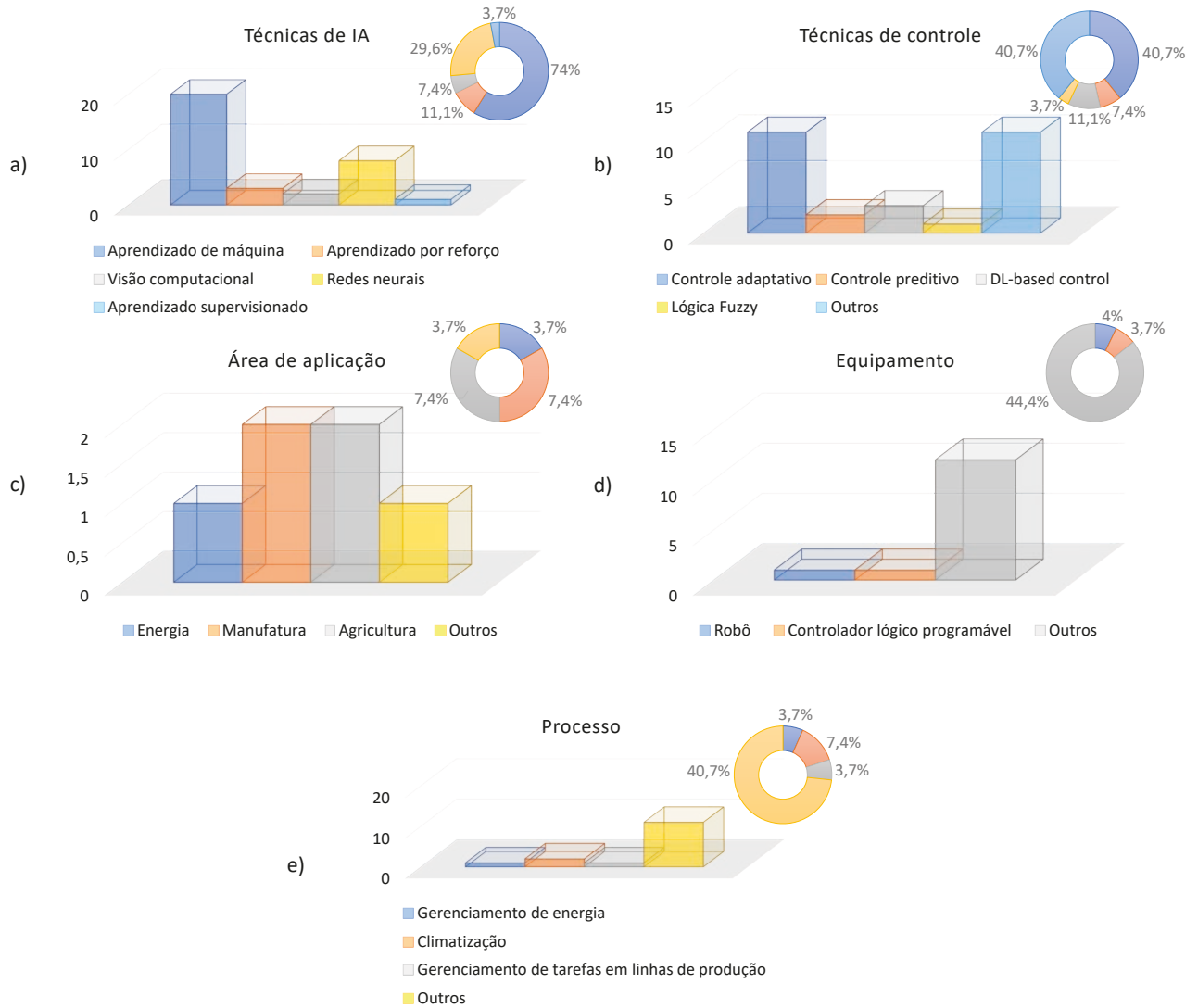
No que se refere a equipamentos, a maioria das patentes não estava associada a um equipamento específico, geralmente eram métodos ou algoritmos para uso geral como sistemas autônomos que realizam a configuração das políticas ou protocolos de automação em ambiente industrial (patente US11334063B2) ou o uso de gêmeos digitais para treinamento de algoritmos de IA (patente US11080441B2). Nestes casos, não foram identificadas quaisquer informações sobre a instrumentação e as patentes não tiveram classificação na classe Equipamentos. Em contrapartida, patentes como US11789413B2, que trata de um método de avaliação de desempenho de sistemas de controle em máquinas agrícolas, e US10496047B2, que descreve um método para controlar sistemas em um edifício por meio de computadores acoplados aos terminais de comutação, foram incluídas na subclasse Outros. Considerando este aspecto generalista, 12 (percentual de 44,4%) patentes foram classificadas na subclasse Outros enquanto apenas 1 (percentual de 3,7%) foi classificada em Robô e Controlador lógico programável.

### 5.2.5 Processo

Assim como o ocorrido na análise das patentes solicitadas, as patentes foram classificadas majoritariamente em Outros, ou seja, das 27 patentes concedidas, 11 (percentual de 40,7%) foram agrupadas na subclasse, 2 (percentual de 7,4%) em Climatização e apenas 1 (percentual de 3,7%) em Energia e Gerenciamento de tarefas em linhas de produção.

**FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE PATENTES CONCEDIDAS SEGUNDO:**

a) as técnicas de IA; b) as técnicas de controle; c) a área de aplicação; d) equipamentos permitidos; e e) o processo envolvido.





# 6 CONSTRUÇÃO DO ROADMAP

Nesta seção é apresentada a abordagem adotada para a escolha dos *players* que compõem o *roadmap* nos períodos atual, de curto, médio e longo prazo. Ressalta-se que cada período possui características próprias que influenciam a estratégia de seleção. A organização segue uma estrutura seccional: em cada subseção são descritos as explicações e os *players* selecionados para o respectivo período. Ao final das subseções serão apresentados os *roadmaps* relativos aos períodos correspondentes.

## 6.1 ESTÁGIO ATUAL

A abordagem para a seleção dos *players* neste estágio foi conduzida considerando fatores de impacto no que diz respeito às aplicações de IA e controle, como a relevância da instituição no mercado, o nível de investimento da instituição em inteligência artificial e a importância da inovação proposta para desafios do cotidiano. As informações sobre os *players* e suas respectivas parcerias que são pertinentes ao tópico principal deste estudo serão discutidas a seguir:

- **Parceria: Universidade / Empresa**

Uma parceria formada principalmente entre as empresas *Vodafone*, *Ford*, *PTV Group*, *e.GO MOOVE*, *ZF Friedrichshafen AG* e o instituto de engenharia automotiva da Universidade de Aachen, desenvolveu um ambiente para validação de veículos autônomos na cidade de Aachen, na Alemanha. Basicamente, o sistema inclui estações de transporte inteligente e sensores para coleta de dados de tráfego em tempo real. Estes dados, então, são usados em um modelo de gêmeo digital, onde as funcionalidades de veículos autônomos podem ser desenvolvidas e testadas em ambiente controlado, simulando os desafios encontrados na prática. O sistema ainda inclui câmeras de alta definição, câmeras infravermelho e uma rede integrada de iluminação.

- **Empresa: *Tesla***

A Tesla destaca-se pelo desenvolvimento de funcionalidades com IA embarcada como o *Autopilot* e o sistema de condução autônoma total (do inglês *Full Self-Driving*) em veículos autônomos. Os algoritmos de condução autônoma também possuem uma versão modificada para robôs bípedes, os chamados *Optimus Robots*. Resumidamente, estes sistemas possuem modelos baseados em redes neurais, treinados por algoritmos de aprendizado profundo, que são alimentados por dados provenientes dos sistemas de visão computacional. Os modelos, então, enviam comandos para os sistemas de controle, necessários para o planejamento de rotas de movimento ou locomoção.

- **Empresa: *Jacto***

É uma empresa brasileira que atua no segmento de maquinário agrícola com uma linha de produtos destinados a operações de pulverização, adubação, colheita de café e agricultura de precisão. Entre suas iniciativas destaca-se o desenvolvimento de inovações em veículos autônomos de pulverização como o *Arbus 4000 JAV*. O veículo possui um sistema de visão computacional que identifica o ambiente e a localização da planta. Os dados coletados, então, são processados e enviados para o sistema de controle que otimiza a aplicação do produto através da manipulação do fluxo de ar de saída de ventiladores, localizados nas extremidades de braços articulados.

- **Empresa: *Alibaba***

O grupo chinês Alibaba desenvolveu uma iniciativa que oferece uma visão abrangente dos processos de aquisição, integração e análise de dados gerados por diversas fontes em ambientes urbanos, utilizando sistemas de vídeo, reconhecimento de imagens e técnicas avançadas de aprendizado de máquina, nomeada como *City Brain*. A plataforma integra-se a múltiplos sistemas de gerenciamento urbano, incluindo serviços de emergência, despacho de ambulâncias e controle de semáforos, possibilitando otimizar o fluxo de tráfego e aprimorar as rotas de veículos de emergência. Essa solução utiliza algoritmos de inteligência artificial aliados à computação em nuvem para processar grandes volumes de dados em tempo real, fornecendo suporte à tomada de decisão e aumentando a eficiência operacional das cidades inteligentes.










- **Empresa: Ford**

O grupo Ford desenvolve iniciativas voltadas ao aprimoramento da segurança automotiva e ao fornecimento de sistemas eficazes de assistência ao condutor, enfrentando um dos principais desafios da indústria automotiva. Para isso, a empresa integrou algoritmos de inteligência artificial aos seus sistemas avançados de assistência ao motorista (do inglês *Advanced Driver Assistance Systems*), incorporando funcionalidades como controle de cruzeiro adaptativo, assistência de permanência em faixa e prevenção de colisões. Esses sistemas utilizam sensores e câmeras para coletar dados em tempo real, que são processados por modelos de IA capazes de tomar decisões instantâneas, elevando a segurança do condutor e o desempenho do veículo.

- **Parceria: Empresa / Empresa**

Recentemente, o *software* de desenvolvimento de gêmeos digitais *Emulate3D*, da *Rockwell Automation* (líder mundial no fornecimento de instrumentação para automação industrial) incorporou as tecnologias da plataforma de serviços da *Nvidia* (líder mundial no fornecimento de GPUs para centro de dados e aplicações de inteligência artificial). Essa integração fornece acesso a APIs de inteligência artificial, bem como à tecnologia de renderização *NVIDIA RTX*.

FIGURA 8 - CONSTRUÇÃO DO ROADMAP: ESTÁGIO ATUAL

		Estágio Atual						
		Parceria Universidade / Empresa	Empresa	Empresa	Empresa	Empresa	Parceria Empresa / Empresa	
Técnicas de IA	Aprendizado de máquina							 
	Aprendizado por reforço							
	Aprendizado supervisionado							
	Aprendizado profundo							
	Visão computacional							
	Algoritmos evolucionários							
	Redes neurais							
	Outros							
	Controle adaptativo							
	Controle robusto							
Controle preditivo								
Controle por aprendizado iterativo (ILC)								
Controle baseado em aprendizado profundo (DL-based control)								
PID e variações								
Lógica Fuzzy								
Controle por modos deslizantes (SMC)								
Outros								
Transporte								
Saúde								
Energia								
Agricultura								
Logística								
Manufatura								
Construção civil								
Telecomunicação								
Navegação e posicionamento								
Outros								
Microcontrolador								
Câmera								
Robô								
Veículos autônomos								
Computador embarcado								
Outros								
Gerenciamento de energia								
Climatização								
Gerenciamento de tarefas em linhas de produção								
Gerenciamento de Tráfego Rodoviário								
Locomoção								
Outros								

## 6.2 CURTO PRAZO

Para este período, os *players* serão provenientes da lista de patentes concedidas, que foram incluídas nas análises do Capítulo 4. Além dos fatores já mencionados na seção anterior, a abordagem para a escolha dos *players* no curto prazo incluiu também aqueles que apareciam com recorrência, tanto em outros períodos da análise, como as empresas *NVIDIA* e *Rockwell Automation*, quanto no período atual (curto prazo), como é o caso da empresa *Strong Force Portfolios*. As informações sobre os *players* que são pertinentes ao tópico principal deste estudo serão discutidas a seguir:

- **Empresa: *Rockwell Automation***

É a líder mundial no fornecimento de instrumentação para automação industrial. Além disso, investe em tecnologias e serviços para aplicações de inteligência artificial como os *softwares Emulate3D*, para desenvolvimento de gêmeos digitais, *Fiix Asset Risk Predictor*, que usa IA para manutenção preditiva e *Factory Talk Design Studio*, utilizando LLM (do inglês *Large Language Models*). A patente concedida envolvia um controlador lógico programável que incluía um módulo de previsão permitindo o uso de algoritmos de IA.

- **Empresa: *Strong Force Innovation Portfolios***

A maior parte das patentes concedidas incluídas nas classificações foi solicitada pela empresa. Basicamente, a estratégia da empresa inclui antecipar tendências tecnológicas e capturar inovação por meio de patentes. Os tópicos das patentes, em geral, estavam associados a métodos para automatizar políticas em sistemas de coleta de dados em ambiente industrial que geram recomendações de otimização de parâmetros, sistemas de manutenção preditiva que permitiam o uso de aprendizado de máquina, entre outros.

- **Empresa: *John Deere***

É a líder mundial do mercado de fabricação de maquinários agrícolas. Com relação à patente concedida à empresa, trata-se de um sistema de controle adaptativo de análise e ajuste automático de regra de controle em máquinas móveis. O sistema coleta dados sobre a frequência de disparo das regras e o desempenho obtido, gerando uma classificação via *machine learning*, de modo a modificar automaticamente as regras quando necessário.

- **ICT: *The Research Foundation for The State University of New York***

É uma organização que serve como braço administrativo da *State University of New York*. A patente analisada, concedida à instituição, aborda a melhoria rápida e segura de políticas em ambientes de aprendizado por reforço online. Para isso, utiliza uma estratégia de exploração diversa (do inglês *Diverse Exploration*), que aprende e implementa um conjunto variado de políticas seguras para explorar o ambiente.

- **Empresa: *Rolls Royce***

A patente analisada, concedida à empresa, refere-se a um sistema de soldagem automatizada usando robótica. Um *scanner* é empregado para mapear os perfis dos componentes e gerar uma nuvem de pontos com coordenadas das superfícies e bordas a serem soldadas. A posição da ponta do eletrodo é determinada pelo *scanner*, permitindo o controle automático da soldagem, mantendo a ponta da tocha em posições pré determinadas de distância ao redor dos componentes.

- **Empresa: *Imubit***

A *Imubit* é uma empresa israelense especializada em otimização de processos industriais por meio de inteligência artificial, com foco em refinarias, plantas químicas e outros setores industriais de processos contínuos. Sua principal solução é a Plataforma *Imubit Closed Loop Neural Network*, que utiliza algoritmos de aprendizado profundo para otimizar operações em tempo real. No que se refere à patente analisada e concedida para a empresa, trata-se de controlador para plantas com dinâmica não linear, baseado em modelo de rede neural e metodologias de controle preditivo.

- **Empresa: *Nvidia***

A *NVIDIA Corporation* é uma empresa global de tecnologia e líder mundial no fornecimento de unidades de processamento gráfico (GPUs), mas que também possui forte atuação em inteligência artificial, computação de alto desempenho e soluções para *data centers*, tornando a empresa, um *player* relevante para o âmbito do presente trabalho. Neste sentido, a patente concedida à empresa e incluída no *roadmap* refere-se a um sistema de resfriamento para *datacenters*, ou mais especificamente, um sistema de controle de temperatura projetado para extrair calor de um circuito de resfriamento secundário localizado no *datacenter* ou fornecer resfriamento suplementar para componentes conectados a esse circuito. Além disso, o sistema permitia aplicações de aprendizado de máquina e redes neurais.

- **Empresa: *Johnson Controls***

É uma multinacional irlandesa especializada em soluções para edifícios inteligentes, eficiência energética e sustentabilidade, incluindo uma ampla gama de soluções tecnológicas como o ecossistema digital *OpenBlue*, o sistema de gerenciamento e controle *Metasys* e, de modo geral, instrumentação para controle climático e automação predial. Neste sentido, a patente analisada e concedida à empresa teve como foco sistemas e métodos para treinar modelos de aprendizado por reforço voltados para o controle de HVAC.

- **Empresa: *SLB***

É uma empresa global de tecnologia focada em inovação energética e transformação digital para a indústria de energia. O foco da patente analisada e concedida à empresa descreve um sistema de controle baseado em aprendizado por reforço.

FIGURA 9 - CONSTRUÇÃO DO ROADMAP: CURTO PRAZO

	Curto Prazo							
	Empresa	Empresa	Empresa	Empresa	Empresa	ICT	Empresa	Empresa
Técnicas de IA	Rockwell Automation	Strong Force	John Deere	SUNY RF	Rolls Royce	IMUBIT	NVIDIA	Johnson Controls
	Aplicação de máquina							
	Aplicação supervisionada							
	Aplicação profunda							
	Visão computacional							
Técnicas de controle	Algoritmos evolucionários							
	Redes neurais							
	Outros							
	Controle adaptativo							
	Controle robusto							
Técnicas de controle	Controle preditivo							
	Controle por aprendizado iterativo (ILC)							
	Controle baseado em aprendizado profundo (DL-based control)							
	PID e variações							
	Lógica Fuzzy							
Área de aplicação	Controladores deslizados (SMC)							
	Outros							
	Transporte							
	Saúde							
	Energia							
Equipamento	Agricultura							
	Logística							
	Manufatura							
	Construção civil							
	Telecomunicação							
Processos	Navegação e posicionamento							
	Outros							
	Microcontrolador							
	Câmera							
	Robô							
Processos	Veículos autônomos							
	Computador embarcado							
	Outros							
	Gerenciamento de energia							
	Climatização							
Processos	Gerenciamento de tarefas em linhas de produção							
	Gerenciamento de Tráfego Rodoviário							
	Locomoção							
	Outros							

## 6.3 MÉDIO PRAZO

Para este período, os *players* serão provenientes da lista de patentes solicitadas que foram incluídas nas análises do Capítulo 5. Seguindo a mesma abordagem das seções anteriores, as informações sobre os *players* que são pertinentes ao tópico principal deste estudo serão discutidas a seguir:

- **Empresa: *Mitsubishi electric***

Trata-se de um *player* de destaque em âmbito mundial e que atua nos setores de automação industrial, robótica, eletrônicos, energia e transporte. A patente solicitada pela empresa consiste em um controlador robótico capaz de ajustar a orientação de objetos de forma automatizada. O sistema recebe dados de posição e orientação do objeto, envia comandos para acionar atuadores que aplicam impulsos na superfície de apoio e, de maneira iterativa, corrige a orientação até atingir a posição desejada.

- **Empresa: *Toyota***

Possui relevância mundial no que se refere a aplicações e inovações com inteligência artificial, como, por exemplo, a cidade experimental *Woven City*, situada no Japão, desenvolvida com o intuito de testar tecnologias de mobilidade, robótica, veículos autônomos e IA aplicada à infraestrutura urbana, bem como o uso de gêmeos digitais (em colaboração com a *Nvidia* e *Ready Robotics*) e manutenção preditiva para o setor de manufatura. A patente solicitada pela empresa aborda o tema com foco no gerenciamento de dados em nível de produto. Basicamente, estes dados são recebidos, codificados em uma estrutura de dados padronizada e armazenados em uma torre de controle, permitindo o compartilhamento de parâmetros e informações entre todos os produtos digitais.

- **Empresa: *Strong Force***

Foram identificadas patentes que abordam uma variedade de temas, tais como: uma plataforma para desenvolvimento de inteligência em sistemas IIoT (do inglês *Industrial Internet of Things*), estruturada em camadas de tratamento de dados; uma plataforma de gerenciamento de frotas robóticas, integrando um conjunto de serviços de inteligência artificial, um sistema baseado em IA generativa, treinado com dados de redes da cadeia de valor; e um método de processamento de dados para criação de gêmeos digitais industriais, entre outros.

- **Universidade: *Northeastern university***

Trata-se de um *player* identificado com recorrência durante as análises do Capítulo 3. O conteúdo da patente solicitada pela universidade descreve um método de controle baseado em múltiplos agentes inteligentes utilizando teoria dos jogos evolutiva. Mais especificamente, o método cria um sistema evolutivo com seleção natural, permitindo que os agentes resolvam conflitos e coordenem suas ações.

- **Empresa: *John Deere***

Foi identificada a solicitação de uma patente descrevendo um sistema de distribuição de ração para animais que integra um veículo de alimentação equipado com sensores, uma plataforma em nuvem e um controlador de alimentação. O veículo distribui a ração de forma uniforme na área de alimentação, tomando decisões baseadas nos dados coletados pelos sensores e na comunicação com a plataforma em nuvem, permitindo maior precisão e eficiência na alimentação animal.

- **Empresa: *Nvidia***

Foi identificada a solicitação de uma patente descrevendo um simulador diferenciável para corte de materiais macios. O método envolve receber uma malha do objeto, adicionar nós virtuais para o plano de corte, otimizar parâmetros do simulador com base em dados reais de corte e executar a simulação para gerar trajetórias do instrumento de corte.

- **Empresa: *Imubit***

A patente solicitada pela empresa refere-se a uma atualização de escopo da patente mencionada no item 6, da seção 6.2.

- **Empresa: *Hewlett Packard***

A Hewlett Packard é uma empresa global de tecnologia reconhecida pela inovação em impressão, computação e soluções de tecnologia da informação, com crescente investimento em inteligência artificial e análise de dados para otimização de processos e produtos. Sua expertise em *hardware*, *software* e integração de sistemas digitais torna a empresa relevante no desenvolvimento de soluções inteligentes aplicáveis a ambientes industriais e de Internet das Coisas (IoT). Nesse contexto, a patente solicitada pela empresa foi incluída no *roadmap*. O tópico principal da patente estava voltado a sistemas e métodos para integrar aquisição de dados e análise por

aprendizado de máquina. Resumidamente, o sistema opera em três fases, são elas: descoberta, aprendizado de máquina e integração. Isso permite que grandes volumes de dados sejam coletados e analisados em tempo real, melhorando a comunicação de sensores e ajustando automaticamente a operação de dispositivos distribuídos IoT ou de computação de borda, potencializando eficiência e inteligência operacional.



## 6.4 LONGO PRAZO

Para este período, os *players* serão provenientes da lista de artigos científicos que foram incluídos nas análises do Capítulo 3. Além disso, uma das prioridades neste período foi destacar as parcerias entre instituições. Por exemplo, podemos citar a recorrência da universidade chinesa, *Central South University*, e do laboratório nacional de energia renovável (*National Renewable Energy Laboratory - NREL*), nos Estados Unidos, em colaborações com diversas outras instituições. Nesse contexto, e considerando os fatores de impacto já discutidos nas seções anteriores, a seguir, serão apresentadas as parcerias mais relevantes e os artigos produzidos por elas, que se destacam para o escopo da pesquisa.

- **Parceria: Universidade / Empresa**

A pesquisa em questão propõe uma abordagem orientada a dados para a automação de sistemas de manufatura inteligente, utilizando gêmeos digitais para representar células de manufatura, simular comportamentos, prever falhas de processo e controlar variáveis de forma adaptativa. O trabalho foi desenvolvido em parceria entre a Siemens e a Universidade da Carolina do Sul. Além disso, o estudo inclui a aplicação de *Deep Q-Learning* para treinar agentes inteligentes capazes de tomar decisões de controle no ambiente de manufatura.

- **Parceria: Universidade / Empresa**

Como resultado da parceria entre a Universidade Nacional de Seoul e o grupo Hyundai, foi desenvolvida uma abordagem de controle por aprendizado online para escavadeiras hidráulicas, com foco em segurança e eficiência na automação de equipamentos de construção. Diferentemente dos métodos tradicionais baseados em modelos matemáticos – que são de difícil obtenção devido à não linearidade do sistema hidráulico –, a pesquisa propõe o uso de *Echo State Networks* (ESNs), uma classe de redes neurais recorrentes cujo treinamento equivale à resolução de um problema de regressão linear, tornando-as adequadas para implementação online. Mais especificamente, o *framework* de controle aprende um modelo inverso do sistema a partir dos sinais de entrada e saída, permitindo gerar, de forma simultânea, os comandos necessários para o acompanhamento de trajetórias desejadas.

- **Parceria: Universidade / Empresa**

A pesquisa desenvolvida em parceria entre a Mitsubishi, a Universidade Jiao Tong de Xangai e a Universidade de Washington propõe um *framework* de atuação inteligente para sistemas de automação industrial, no contexto da Indústria 4.0 e das arquiteturas de computação *end-edge*. O trabalho apresenta uma estratégia de co-design entre controladores de borda e atuadores inteligentes, conciliando desempenho e segurança frente às imperfeições das redes sem fio. Além disso, explora o uso de controle preditivo baseado em modelo (MPC), aprendido por iteração de políticas e aprendido por reforço, garantindo robustez, estabilidade e adaptação em cenários industriais complexos.

- **Parceria: Universidade / Empresa**

A pesquisa desenvolvida em parceria entre a Yaskawa e Jozef Stefan Institute propõe um novo método de programação por demonstração voltado a operações de acabamento, como polimento e esmerilhamento, utilizando robôs industriais. O sistema registra os movimentos demonstrados por um operador humano no espaço cartesiano e os transfere ao robô, cujo modelo cinemático é expandido com mecanismos virtuais que garantem maior flexibilidade e precisão. Além disso, são empregadas técnicas de estimação de pontos de contato e controle por aprendizado iterativo, permitindo corrigir calibrações imprecisas e adaptar o desempenho do robô às diferenças entre a dinâmica humana e a robótica, com resultados validados em aplicações reais.





111 00 111 0101  
1100 00 110101  
001 00110 00

CONTROLLER



# 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise prospectiva sobre a convergência entre técnicas de controle e inteligência artificial (IA) no contexto industrial, fundamentada na leitura e classificação de artigos científicos e patentes. A metodologia adotada<sup>10,11</sup> permitiu a identificação sistemática de tendências, lacunas e oportunidades tecnológicas a partir de uma estrutura de análise em três níveis: macro, meso e micro.

Os resultados revelam que as técnicas de IA mais empregadas concentram-se em redes neurais, aprendizado de máquina e aprendizado por reforço, enquanto as técnicas de controle predominantes incluem controle preditivo, PID e variações e abordagens adaptativas. Observou-se também que setores como energia, manufatura e logística aparecem como principais áreas de aplicação, refletindo a demanda crescente por sistemas mais inteligentes, eficientes e autônomos. Do ponto de vista dos equipamentos, destacam-se robôs industriais, veículos autônomos e sistemas embarcados como elementos recorrentes em aplicações patenteadas.

Nesse sentido, o *roadmap* construído neste trabalho forneceu uma visão estratégica para orientar ações de curto, médio e longo prazo, apoiando o desenvolvimento de soluções que combinem inteligência artificial e controle clássico de forma segura, confiável e escalável para a indústria nacional.

---

<sup>10</sup> SILVA, A. Lemos Rangel da; BORSCHIVER, S. **Roadmapping tecnológico a partir de prospecção em documentos científicos: estudo de caso para o setor de manufatura híbrida.** [S.l.: s.n.], 2021.

<sup>11</sup> HOELTGEBAUM, T.; VIEIRA, R. de S.; MARTINS, D. **A patent survey methodology focused on automotive mechanisms.** [S.l.: s.n.], 2016.



# 8 REFERÊNCIAS

BORSCHIVIER, S.; TAVARES, A. S. Technology roadmap: planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia. [S.l.]: Editora Interciência, 2016. 110 p. ISBN 8571933863.

COSTA, M. V. de Oliveira. et al. Review and classification of workpiece toggle clamping devices. In: **International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 74–84.

GILL, S. **AI used to control process manufacturing operations**. 2022. Disponível em: <https://www.controleng.com/ai-used-to-control-process-manufacturing-operations/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

HOELTGEBAUM, T.; VIEIRA, R. de S.; MARTINS, D. **A patent survey methodology focused on automotive mechanisms**. [S.l.: s.n.], 2016.

HOELTGEBAUM, T. et al. Walking mechanisms-a state of the art survey and new developments opportunities. In: SPRINGER. **International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics**. [S.l.], 2020. p. 35–43.

HOELTGEBAUM, T.; SIMONI, R.; MARTINS, D. Reconfigurability of engines: a kinematic approach to variable compression ratio engines. **Mechanism and Machine Theory**, v. 96, p. 308–322, 2016.

IMUBIT. **Advanced Process Control, reinvented with AI: here's how plants are evolving**. 2025. Disponível em: <https://imubit.com/article/advanced-process-control-ai/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

IMUBIT. **Industrial process solutions: when old school meets AI**. 2025. Disponível em: <https://imubit.com/article/industrial-process-solutions-meets-ai/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

SILVA, A. Lemos Rangel da; BORSCHIVER, S. **Roadmapping tecnológico a partir de prospecção em documentos científicos: estudo de caso para o setor de manufatura híbrida**. [S.l.: s.n.], 2021.

VANDOREN, V. **Real-world applications of advanced process controls**. 2001. Disponível em: <https://www.controleng.com/real-world-applications-of-advanced-process-controls/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

**CNI**

*Antonio Ricardo Alvarez Alban*  
Presidente

**DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL**

*Jefferson de Oliveira Gomes*  
Diretor de Desenvolvimento Industrial

*Mário Sérgio Carraro Telles*  
Diretor Adjunto de Desenvolvimento Industrial

**Superintendência de Economia**

*Márcio Guerra*  
Superintendente de Economia

**Gerência de Estudos e Prospectiva Industrial**

*Rafael Silva e Sousa*  
Gerente de Estudos e Prospectiva Industrial

*Juliano Antônio Sebben*  
*Marcello José Pio*  
Equipe Técnica

*Carla Regina Pereira Gadêlha*  
Produção Editorial e Diagramação

**DIRETORIA CORPORATIVA**

*Cid Vianna*  
Diretor Corporativo

**Superintendência de Desenvolvimento Humano**

*Renato Paiva*  
Superintendente de Desenvolvimento Humano

**Gerência de Educação Corporativa**

*Priscila Lopes Cavichili*  
Gerente de Educação Corporativa

*Alberto Nemoto Yamaguti*  
Normalização

---

*Feres Salem*  
*Rafael Monteiro Veras*  
*Samuel Rovea*  
Consultoria



[www.cni.com.br](http://www.cni.com.br)

[/cnibrasil](https://www.facebook.com/cnibrasil)

[@CNI\\_br](https://twitter.com/CNI_br)

[@cnibr](https://www.instagram.com/cnibr)

[/cniweb](https://www.youtube.com/c/cniweb)

[/company/cni-brasil](https://www.linkedin.com/company/cni-brasil)

