

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

REALIDADE AUMENTADA E CAPACIDADES DINÂMICAS NA INDÚSTRIA 5.0:
***Framework* para transformação digital em ambientes controlados e não**
controlados

SÃO PAULO

2025

WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

**REALIDADE AUMENTADA E CAPACIDADES DINÂMICAS NA INDÚSTRIA 5.0:
Framework para transformação digital em ambientes controlados e não
controlados**

Tese apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Engenharia de Produção
da Universidade Paulista – UNIP, para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão de
sistemas de operação.

Linha de pesquisa: Redes de empresas
e planejamento da produção

Projeto de pesquisa: Gestão da
Produção e Inovação na Agricultura,
Indústria e Serviços

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Tsuguio
Okano.

SÃO PAULO

2025

Lopes, William Aparecido Celestino.

Realidade aumentada e capacidades dinâmicas na Indústria 5.0: *framework* para transformação digital em ambientes controlados e não controlados / William Aparecido Celestino Lopes. – 2025.

159 f. : il. color.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Gestão de Sistemas de Operação. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano.

1. Realidade aumentada. 2. Capacidades dinâmicas. 3. Indústria 5.0. 4. Experiência do usuário (UX). 5. Transformação digital. I. Okano, Marcelo Tsuguio (orientador). II. Título.

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Rodney Eloy CRB8-6450

WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

REALIDADE AUMENTADA E CAPACIDADES DINÂMICAS NA INDÚSTRIA 5.0:
Framework para transformação digital em ambientes controlados e não controlados

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Aprovado(a) em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano
Universidade Paulista - UNIP

Profa. Dra. Ana Lúcia Figueiredo
Facin
Universidade Paulista - UNIP

Prof. Dr. Oduvaldo Vendrametto
Universidade Paulista - UNIP

Prof. Dr. Helio Dias
Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Pedro Pinho Senna
Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science
(INESC TEC)
Porto, Portugal

Dedico esta tese aos meus pais, Samuel e Maria Aparecida, pelo apoio e valores transmitidos. À minha esposa, Raquel, pelo amor e incentivos constantes. Ao meu irmão, Wellington, pela amizade e presença. A todos os familiares, amigos e alunos que contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o Grande Arquiteto do Universo, pelo dom da vida e pela saúde concedidos a cada novo dia.

Agradeço ao meu pai, Samuel D. Lopes, pelo suporte incondicional, pelos valores transmitidos e pelo exemplo de força e integridade.

Agradeço à minha mãe, Maria Aparecida C. Lopes, por seu amor, por suas orações e por seu incentivo em todas as etapas desta jornada.

Agradeço à minha esposa, Dra. Raquel de Lima Mergulhão Lopes, meu grande amor, pela compreensão, pela parceria e pelo incentivo incondicional ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, incluindo o desenvolvimento desta tese.

Agradeço ao meu irmão, Wellington C. Lopes, pela presença constante e pelo suporte nos momentos decisivos.

Agradeço aos meus familiares e amigos, em especial a Adilson Rusteiko, a Cleiton Mendes e a Nicolas Honório, alunos e ex-alunos, pelo estímulo e pelas contribuições que enriqueceram este percurso acadêmico.

Agradeço ao meu melhor amigo, Marcio L. Nascimbem, e ao seu filho, Davi Nascimbem (*in memoriam*), que do céu certamente vibram com a conquista do *The Good Doctor*.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Tsugio Okano, pela amizade, pela orientação científica e pela confiança depositada nesta pesquisa.

Agradeço ao SENAI Volkswagen, representado pelo Prof. João Domingos Chiari Sanchez, pelo apoio institucional e pelas condições práticas que possibilitaram a realização dos estudos.

Agradeço à CEAGESP, pela colaboração e pela viabilização dos estudos em ambiente de distribuição alimentícia.

Agradeço à empresa Multinacional do segmento de Autopeças, pela parceria no desenvolvimento e validação dos experimentos em ambiente fabril.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Brasil, pelo apoio institucional e pelo financiamento concedido, fundamentais para a concretização deste trabalho.

Em todas as circunstâncias, dai graças, porque esta é a
vosso respeito a vontade de Deus em Jesus Cristo.

1 Tessalonicenses 5:18

RESUMO

Esta tese investiga a Realidade Aumentada (RA) em contextos produtivos com diferentes níveis de controle: um ambiente aberto de distribuição alimentícia (CEAGESP); outro fechado, industrial, em uma multinacional automotiva, diante da lacuna existente na literatura em comparação sistemática entre esses cenários. O objetivo geral é compreender como a RA, operacionalizada em artefatos concebidos via *Design Science Research* (DSR), afeta desempenho, percepção do operador e transformação organizacional quando interpretada pelas Capacidades Dinâmicas (*Sense*, *Seize* e *Transform*) e pelos pilares da Indústria 5.0. A metodologia articula três artefatos: (i) *AutoSim*, que resultou redução de 7,72% no ciclo e transferência simulação–real sem colisões; (ii) *ARomaticLens*, que opera *offline* com 100% de acurácia e latência média de 1,87s em ambiente aberto; (iii) *ARTechGuide*, que reduziu 57% do tempo de *setup*, aumentou 25% de acurácia e diminuiu 75% dos pedidos de ajuda operacional. A validação multicritério pelo AHP indicou convergência entre especialistas. Capacidades Dinâmicas (peso agregado 0,44) e Núcleo Tecnológico (0,32) foram os elementos mais influentes, com $CR < 0,10$ em todas as matrizes, o que confirma coerência estrutural do modelo conceitual integrador proposto. Os resultados mostram que a RA promove apoio cognitivo, autonomia adaptativa e digitalização de processos em ambos os cenários, responde à variabilidade de ambientes abertos e às exigências de padronização industrial. As contribuições incluem um modelo conceitual validado, protocolos mensuráveis de avaliação e evidências de alinhamento aos princípios da Indústria 5.0. Limitações envolvem tamanho amostral e especificidade setorial. Pesquisas futuras devem ampliar amostras, incorporar métricas automatizadas de UX e avaliar impactos em políticas públicas e estudos longitudinais de aprendizagem.

Palavras-chave: Realidade Aumentada; Capacidades Dinâmicas; Indústria 5.0; Experiência do Usuário (UX); Transformação Digital.

ABSTRACT

This thesis investigates Augmented Reality (AR) in productive contexts with different levels of control: an open food distribution environment (CEAGESP) and a closed industrial environment in a multinational automotive company, given the existing gap in the literature regarding the systematic comparison between these scenarios. The overall objective is to understand how AR, operationalized in artifacts conceived via Design Science Research (DSR), affects performance, operator perception, and organizational transformation when interpreted by the Dynamic Capabilities (Sense, Seize, and Transform) and the pillars of Industry 5.0. The methodology articulates three artifacts: (i) AutoSim, which resulted in a 7.72% reduction in cycle time and simulation-to-real-world transfer without collisions; (ii) ARomaticLens, operating offline with 100% accuracy and an average latency of 1.87s in an open environment; and (iii) ARTechGuide, which reduced setup time by 57%, increased accuracy by 25%, and decreased operational assistance requests by 75%. Multicriteria validation using AHP indicated convergence among experts: Dynamic Capabilities (aggregate weight 0.44) and Technological Core (0.32) were the most influential elements, with $CR < 0.10$ in all matrices, confirming the structural coherence of the proposed integrative conceptual model. The results show that AR promotes cognitive support, adaptive autonomy, and process digitization in both scenarios, responding to the variability of open environments and the demands of industrial standardization. Contributions include a validated conceptual model, measurable evaluation protocols, and evidence of alignment with Industry 5.0 principles. Limitations involve sample size and sectoral specificity. Future research should expand samples, incorporate automated UX metrics, and evaluate impacts on public policies and longitudinal learning studies.

Keywords: Augmented Reality; Dynamic Capabilities; Industry 5.0; User Experience (UX); Digital Transformation.

UTILIDADES

Os resultados desta tese geram aplicações diretas em setores produtivos e, de maneira derivada, contribuem para metas associadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme sugerido por órgãos internacionais (UNITED NATIONS, 2024). Esses efeitos não constituem objetivos do estudo, mas emergem dos resultados experimentais, oferecem caminhos futuros para políticas públicas, qualificação profissional e inovação industrial. No contexto do ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), os experimentos demonstraram que o *Baseline AutoSim* permite validar fluxos digitais com menor risco e retrabalho, com a redução de 7,72% no ciclo simulado–real e maior previsibilidade operacional. Esses resultados fortalecem práticas de engenharia baseadas em digitalização progressiva de processos. Para o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), o *ARomaticLens* apresentou 100% de acurácia, latência média de 1,87s e operação *offline*, favorece monitoramento de qualidade e redução de perdas em cadeias alimentares caracterizadas por baixa padronização e infraestrutura limitada. Em relação ao ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico), o *ARTechGuide* resultou – 57% de tempo de *setup*, + 25% de acurácia e – 75% de pedidos de ajuda, o que amplia segurança, autonomia e confiabilidade de operadores e ainda reduz dependência de especialistas em rotinas críticas. No ODS 4 (Educação de qualidade), as instruções contextuais baseadas em RA, combinadas com a abordagem DSR, demonstraram potencial para transferência estruturada de conhecimento tácito, apoiadas por métricas de UX (SUS/UEQ) que permitem evolução contínua do processo formativo. Quanto ao ODS 13 (Ação climática), os resultados mostram que soluções imersivas podem reduzir impressos técnicos e deslocamentos desnecessários, além de otimizar recursos por meio da eliminação de retrabalhos, o que contribui indiretamente para a redução de emissões. De modo abrangente, os artefatos desenvolvidos e validados quando interpretados pelos pesos do AHP agregado ($CR < 0,10$ e predominância das dimensões Tecnológica e CDs) sugerem utilidade para governos, empresas e centros de distribuição interessados em escalonar soluções digitais alinhadas à Indústria 5.0. Tais aplicações incluem programas de qualificação profissional, *hubs* de inovação, políticas de redução de perdas e iniciativas de digitalização responsável.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da tese	17
Figura 2 - Fluxo metodológico da pesquisa	43
Figura 3 – Robô em ambiente real e simulado para comparação experimental	52
Figura 4 – Fluxo operacional do <i>ARomaticLens</i>	54
Figura 5 – Interface instrutiva do <i>ARTechGuide</i>	57
Figura 6 - Célula real x célula virtual	67
Figura 7 – Avaliação do <i>ARomaticLens</i> no CEAGESP	71
Figura 8 – Avaliação do <i>ARTechGuide</i> na multinacional de autopeças	75
Figura 9 - Resultados da tese	78
Figura 10 - <i>Framework</i> obtido	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala fundamental de Saaty (1980).....	59
Tabela 2 – Índice Randômico (IR) de Saaty (1980).....	63
Tabela 3 - Matriz 1 elaborada pelo especialista 1 - E1.....	86
Tabela 4 - Matriz 2 elaborada pelo especialista 1 - E1.....	86
Tabela 5 - Matriz 3 elaborada pelo especialista 1 - E1.....	86
Tabela 6 - Matriz 4 elaborada pelo especialista 1 - E1.....	87
Tabela 7 - Soma dos elementos da coluna - E1	88
Tabela 8 - Matriz Normalizada da Etapa 2 - E1	88
Tabela 9 - Pesos dos Critérios Etapa 3 – E1	89
Tabela 10 - Matriz 1 elaborada pelo especialista 2 - E2	92
Tabela 11 - Matriz 2 elaborada pelo especialista 2 - E2.....	92
Tabela 12 - Matriz 3 elaborada pelo especialista 2 - E2	93
Tabela 13 - Matriz 4 elaborada pelo especialista 2 - E2	93
Tabela 14 - Soma dos elementos da coluna - E2.....	94
Tabela 15 - Matriz Normalizada da Etapa 2 - E2.....	94
Tabela 16 - Pesos dos Critérios - E2.....	95
Tabela 17 - Matriz 1 elaborada pelo especialista 3 - E3	97
Tabela 18 - Matriz 2 elaborada pelo especialista 3 - E3	97
Tabela 19 - Matriz 3 elaborada pelo especialista 3 - E3	97
Tabela 20 - Matriz 4 elaborada pelo especialista 3 - E3	98
Tabela 21 - Soma dos elementos da coluna - E3.....	98
Tabela 22 - Matriz Normalizada da Etapa 2 - E3.....	98
Tabela 23 - Pesos dos Critérios - E3.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dimensões analíticas das CDs: definição, características e aplicações	31
Quadro 2 – Relações teóricas entre CDs e Pilares da I5.0	35
Quadro 3 – Operacionalização das CDs: evidências empíricas e instrumentos.....	37
Quadro 4 – Comparação entre SUS e UEQ como instrumentos de avaliação da UX.....	42
Quadro 5 - Resultados do <i>Baseline AutoSim</i> no enquadro das CDs e da Indústria 5.0.....	69
Quadro 6 - Resultados intracaso no CEAGESP (<i>ARomaticLens</i>).....	72
Quadro 7 - Resultados intracaso na multinacional automotiva (<i>ARTechGuide</i>)	76
Quadro 8 - Comparação intercaso (AutoSim x CEAGESP x Multinacional).....	80
Quadro 9 – Avaliação de consistência da matriz (E1) com comparação aos valores ideais	90
Quadro 10 - Avaliação de consistência da matriz (E2).....	95
Quadro 11 - Avaliação de consistência da matriz (E3).....	99
Quadro 12 - Validação do <i>Framework</i> por meio dos especialistas	102

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

CDs - Capacidades Dinâmicas

CEAGESP - Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo

IA - Inteligência Artificial

I4.0 – Indústria 4.0

I5.0 – Indústria 5.0

IoT - Internet das Coisas

KPIs - Indicadores Chave de Desempenho

KRL - *KUKA Robot Language*

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

RA - Realidade Aumentada

RV - Realidade Virtual

SCM – Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos

SUS - *System Usability Scale*

UEQ - *User Experience Questionnaire*

UX - Experiência do Usuário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contribuição da tese.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Indústria 4.0 e Indústria 5.0: da automação digital à centralidade humana e sustentável na transformação digital	19
2.3 Capacidades Dinâmicas como lente teórica e operacional na transformação digital.....	27
2.4 Relações teóricas entre I5.0 e Capacidades Dinâmicas (CDs).....	32
2.5 Avaliações qualitativas de usabilidade e Experiência do Usuário	39
3 METODOLOGIA	43
3.1 <i>Design Science Research</i> aplicado em sistemas tecnológicos interativos	46
3.2 Estudo de caso: Estratégias analíticas intracaso e intercaso	47
3.3 Artigo 1 – <i>Baseline AutoSim</i>	49
3.4 Artigo 2 – <i>ARomaticLens</i> – desenvolvimento baseado no DSR	52
3.5 Artigo 3- <i>ARTechGuide</i> – desenvolvimento baseado no DSR.....	55
3.6 Método <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP)	58
4 RESULTADOS.....	65
4.1 Resultados do Artigo 1 - <i>Baseline AutoSim</i>	66
4.2 Resultados intracaso: CEAGESP (<i>ARomaticLens</i>)	70
4.3 Resultados intracaso: multinacional autopeças (<i>ARTechGuide</i>)	73
4.4 Resultados intercaso (comparação cruzada)	77
4.5 <i>Framework</i> para avaliar a capacidade de transformação digital baseado em RA e CDs.....	81
4.6 Validação do <i>Framework</i> pelos especialistas	83
4.7 Discussão Crítica.....	103
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A – Artigo 1 – <i>Baseline AutoSim - Optimization of New Project Validation Protocols in the Automotive Industry: A Simulated Environment for Efficiency and Effectiveness</i>	117
APÊNDICE B – Artigo 2 – <i>ARomaticLens - Augmented Reality Applied to Identify Aromatic Herbs Using</i>	129
APÊNDICE C – Registro do artefato <i>ARomaticLens</i>	150
APÊNDICE D – Artigo 3 – <i>ARTechGuide - Augmented Reality in Industry 5.0: Customizing production to optimize operational processes and technical training of operators</i>	151
APÊNDICE E – Registro do artefato <i>ARTechGuide</i>	157

APÊNDICE F - Formulário de Validação do <i>Framework</i> – Método AHP	158
--	------------

1 INTRODUÇÃO

Esta tese investiga a Realidade Aumentada (RA) como suporte cognitivo e operacional em dois contextos produtivos contrastantes: (i) um ambiente aberto de distribuição alimentícia na Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP) (CEAGESP, 2025) e (ii) um ambiente fechado industrial em uma multinacional de autopeças (LOPES *et al.*, 2025a). A análise é conduzida sob a lente das Capacidades Dinâmicas (CDs), sendo elas *Sense, Seize e Transform* (SALVATO; VASSOLO, 2018), e enquadrada nos pilares da Indústria 5.0, sendo eles Humanocêntrico, Sustentabilidade e Resiliência (XIANG *et al.*, 2024). Essa combinação teórico-analítica permite interpretar como artefatos de RA, concebidos via *Design Science Research* (DSR), afetam desempenho operacional, experiência do usuário (UX) e transformação organizacional em condições de variabilidade ambiental e em níveis distintos de controle operacional.

A relevância científica decorre da crescente adoção da RA em tarefas críticas de produção e de ausência de evidências comparáveis entre contextos heterogêneos. Estudos apontam ganhos em eficiência e padronização. Também destacam barreiras de adoção associadas à infraestrutura digital, à ergonomia e à variabilidade ambiental (MARINO *et al.*, 2024). A literatura necessita de análises integradas que examinem o desempenho da RA sob a mesma lente conceitual em ambientes abertos e fechados, que testam robustez e transferibilidade dos resultados.

Esta pesquisa enfrenta tal lacuna por meio de três artigos articulados que se complementam metodológica e empiricamente:

1. Artigo 1 – *Baseline AutoSim* estabelece o protocolo metodológico de validação e de comparação entre ambientes; cria o marco temporal e estrutural de referência para todos os demais estudos;
2. Artigo 2 – *ARomaticLens* aplica RA em ambiente não controlado (CEAGESP); testa robustez, confiabilidade e operação *offline* em condições adversas;
3. Artigo 3 – *ARTechGuide* valida a RA em ambiente industrial controlado; avalia padronização, ergonomia e eficiência em *setups* críticos.

O problema de pesquisa consiste em compreender como artefatos de RA, concebidos via DSR, influenciam desempenho operacional, UX e transformação organizacional, sob diferentes graus de controle e infraestrutura, e como os resultados variam entre os ambientes aberto e fechado.

O objetivo geral é arquitetar, aplicar e avaliar artefatos de RA em contextos produtivos controlados e não controlados, interpretá-los sob a ótica das CDs e dos pilares da Indústria 5.0, a fim de sintetizar um quadro replicável de análise e transformação digital.

Os objetivos específicos da tese são

1. Construir um *baseline* metodológico para experimentos de RA, que estabelecem protocolo de validação, métricas e indicadores comparáveis (Artigo 1 – *Baseline AutoSim*).
2. Desenvolver artefatos RA baseados em DSR, assegurar integração entre visão computacional, usabilidade e suporte operacional, alinhados às dimensões *Sense*, *Seize* e *Transform*.
3. Aplicar e avaliar o *ARomaticLens* em ambiente aberto (CEAGESP), com a medição de acurácia, latência, UX e impactos na rastreabilidade de produtos.
4. Aplicar e avaliar o *ARTechGuide* em ambiente fechado (industrial), com a medição de tempo de *setup*, acurácia, redução de falhas e ganhos ergonômicos.
5. Comparar intracaso e intercaso, identificar convergências e divergências entre os três artigos e avaliar a robustez dos artefatos e da estrutura proposta.
6. Validar o *framework* proposto por meio de três especialistas e o método AHP.

Três questões norteadoras estruturam a investigação: (i) como as dimensões *Sense*, *Seize* e *Transform* se manifestam em indicadores de UX, tempo, acurácia e padronização; (ii) quais convergências e diferenças surgem entre os contextos CEAGESP e Industrial; (iii) quais condições técnicas e contextuais garantem a escalabilidade e a resiliência das aplicações de RA. Parte-se da hipótese de que a RA melhora desempenho e padronização, com intensidade dependente das restrições ambientais e infraestruturais.

O método segue o modelo *Design Science Research* (DSR) em cinco fases, com os artefatos *ARomaticLens* e *ARTechGuide*, ancorados no *baseline AutoSim*, que garante rastreabilidade e comparabilidade entre cenários. A coleta integra indicadores operacionais, avaliações de UX (SUS e UEQ) e evidências qualitativas. As análises combinam intracaso e intercaso, mapeiam os dados às dimensões das CDs: *Sense* (percepção e UX), *Seize* (tempo, acurácia e erros) e *Transform* (padronização, retomada e segurança).

A justificativa científica reside na necessidade de comparar sistematicamente a RA em contextos com diferentes graus de controle, interpretá-la pela ótica das CDs. A justificativa prática é demonstrar como a RA, ao ser adaptada a ambientes de baixa ou alta infraestrutura, pode orientar projetos de digitalização, padronização e capacitação industrial.

A tese considera a RA como tecnologia humanocêntrica na Indústria 5.0, orientada à segurança, à padronização e à aprendizagem situada no trabalho. Ela reforça que o humano permanece no centro das decisões e interações. O uso da RA, portanto, não substitui o operador, mas amplia sua capacidade cognitiva e adaptativa em processos digitais.

O estudo delimita-se a um protocolo experimental de referência (*AutoSim*) e dois casos reais. Nos casos reais, as tarefas analisadas são classificação e identificação no CEAGESP (ambiente aberto) e *setup* e manutenção industrial (ambiente fechado). Os indicadores priorizados são operacionais, de UX e organizacionais, com premissas de aderência a protocolos técnicos, experiência mínima dos participantes e viabilidade em dispositivos móveis.

A trajetória desta pesquisa foi delineada para compreender, de forma progressiva, por que a Realidade Aumentada poderia sustentar processos de transformação digital sob a ótica das Capacidades Dinâmicas. Em 2023, desenvolveu-se o *Baseline AutoSim*, fundamentado em modelagem e simulação digital, como etapa inicial destinada a reduzir incertezas e a estabelecer protocolos comparativos em ambiente virtual. Em 2024, o estudo avançou para o ambiente não controlado do CEAGESP (*ARomaticLens*), com a aplicação da RA em condições reais de variabilidade e baixa conectividade. Em 2025, consolidou-se o experimento industrial controlado (*ARTechGuide*), na validação de desempenho, de ergonomia e de

replicabilidade. Essa sequência metodológica estruturou o *framework* final de integração entre RA, CDs e Indústria 5.0.

A tese está organizada de modo a garantir rastreabilidade e replicação: o Capítulo 2 revisa os fundamentos sobre RA, Indústria 5.0, CDs, DSR e UX; o Capítulo 3 detalha os métodos utilizados nas diversas fases do experimento; o Capítulo 4 apresenta os resultados dos três artigos com o *Baseline AutoSim* como linha de base para os estudos intracaso (CEAGESP e Multinacional) e a análise intercaso comparativa; o Capítulo 5 consolida conclusões, limitações e agenda de pesquisa. Os Apêndices de A a E reúnem os artigos e os registros de software associados. A estrutura pode ser observada na Figura 1.



Figura 1 - Estrutura da tese

Fonte: Autor (2025)

1.1 Contribuição da tese

A tese constitui a primeira análise estruturada que compara aplicações de RA em ambientes abertos e fechados sob a ótica da Indústria 5.0. Utiliza as CDs como instrumento de interpretação e o *Baseline AutoSim* como fundamento metodológico de validação (SALVATO; VASSOLO, 2018; XIANG *et al.*, 2024).

A pesquisa integra DSR, métricas quantitativas (tempo, acurácia, falhas) e qualitativas (SUS e UEQ) em um fluxo comparável entre os três artigos; garante rigor analítico e replicabilidade (MARINO *et al.*, 2024). O *AutoSim* atua como protocolo-base de medição e de transferência virtual-real, assegura consistência nas demais aplicações (*ARomaticLens* e *ARTechGuide*).

A prática desenvolvida no trabalho demonstra que a RA pode reduzir desperdícios, aumentar a confiabilidade em ambientes abertos (CEAGESP) e elevar eficiência e segurança em ambientes fechados (multinacional). Sob os pilares Humanocêntricos, Sustentabilidade e Resiliência, a RA mostra-se capaz de unir ganhos

técnicos, autonomia humana e digitalização organizacional. Ela posiciona esta tese como referência em transformação digital orientada à Indústria 5.0.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A literatura sobre RA evidencia avanços significativos em setores educacionais, alimentícios, saúde e industriais, mas ainda necessita de análises comparativas sistemáticas entre ambientes produtivos abertos e fechados. Apesar do uso crescente da RA em diferentes setores, as pesquisas ainda apresentam limitações no que diz respeito à avaliação crítica da aplicabilidade dessas tecnologias em contextos contrastantes, o que reforça a lacuna explorada nesta tese (LI *et al.*, 2018).

Esse vazio teórico limita a compreensão sobre como a RA se comporta em ambientes com diferentes níveis de controle operacional e maturidade digital, justamente o foco central desta pesquisa. Para suprir essa lacuna, a revisão da literatura foi reorganizada e aprofundada em cinco subcapítulos (2.1–2.5). O primeiro apresenta a evolução conceitual da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, destaca a transição da automação digital para uma visão humanocêntrica e sustentável.

O segundo discute fundamentos, aplicações e desafios da RA em ambientes controlados e não controlados, evidencia suas limitações e potencialidades. O terceiro aprofunda o papel das Capacidades Dinâmicas como lente teórica e operacional da transformação digital. O quarto examina as articulações entre I5.0 e CDs, integra mecanismos de *sensing*, decisão e reconfiguração.

O quinto apresenta as abordagens de avaliação qualitativa da usabilidade e da Experiência do Usuário (UX), inclui instrumentos padronizados amplamente utilizados na literatura. Essa estrutura fortalece o encadeamento conceitual da tese, explicita variáveis, indicadores e vínculos teóricos e orienta de forma consistente a análise empírica desenvolvida nos capítulos seguintes.

2.1 Indústria 4.0 e Indústria 5.0: da automação digital à centralidade humana e sustentável na transformação digital

Este subcapítulo apresenta a evolução conceitual da Indústria 4.0 (I4.0) para a Indústria 5.0 (I5.0), situa a passagem de um paradigma tecnocêntrico, orientado da eficiência e da integração digital, para um paradigma orientado ao valor humano, à sustentabilidade e à robustez sistêmica (XU, 2021).

A I4.0 é compreendida como um arranjo tecnológico-organizacional fundamentado na digitalização ampla, na integração ciberfísica e na orquestração de processos em tempo real. Esse paradigma resulta da convergência entre a tração da demanda impulsionada por exigências de personalização, de flexibilidade e de rapidez de resposta ao mercado e o impulso tecnológico, decorrente dos avanços em automação, digitalização e miniaturização de sistemas. Dessa interação emergem fábricas inteligentes, caracterizadas por conectividade total, auto-organização e rastreabilidade integral ao longo da cadeia de valor, o que consolida um novo modelo de produção orientado por dados e pela integração contínua entre sistemas físicos e digitais (LASI, 2014).

No consenso da literatura aplicada, a I4.0 é operacionalizada por nove pilares: (1) *Big Data & Analytics*; (2) Robôs Autônomos; (3) Simulação; (4) Integração Horizontal e Vertical; (5) IIoT; (6) Cibersegurança; (7) Computação em Nuvem; (8) Manufatura Aditiva; (9) Realidade Aumentada. Tecnologias, como gêmeos digitais e inteligência artificial, atuam como habilitadores transversais que potencializam esses pilares, mas não integram a lista canônica (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

No nível operacional, a arquitetura da I4.0 conecta o chão de fábrica por meio do Sistema de Execução da Manufatura (MES) e o Gerenciamento das Operações de Manufatura (MOM) que coordenam produção, qualidade, manutenção e logística interna nas camadas corporativas. O Planejamento dos Recursos Empresariais (ERP) integra finanças, compras e recursos humanos, enquanto o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (SCM) amplia o planejamento e a visibilidade para fornecedores e distribuição. Essa integração viabiliza personalização em escala e redução de variabilidade, estabelece a base para as discussões de valor social e ambiental que passam a ser exigidas no cenário seguinte (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018; LASI, 2014).

No âmbito da sustentabilidade, estudos estruturais demonstram que os ganhos econômicos iniciais, como eficiência produtiva e inovação em modelos de negócio, tendem a anteceder e a viabilizar benefícios socioambientais de longo prazo, como redução de energia e emissões, além da promoção do bem-estar. Essa relação de precedência destaca a importância de modelos integrados que articulem custo, desempenho e impacto ambiental de forma clara e mensurável (GHOBAKHLOO, 2020).

Mesmo com os avanços da Indústria 4.0, alguns limites se tornaram evidentes. O foco exagerado na tecnologia e na eficiência acabou deixando em segundo plano o valor humano. Muitas empresas ainda não estão totalmente preparadas para reagir às crises ou às mudanças bruscas. Enfrentam lacunas na formação profissional, dificuldades em lidar com questões éticas e de transparência nos sistemas inteligentes e tratam a sustentabilidade como algo secundário. Esses desafios evidenciam a necessidade de uma mudança de foco, abrem caminho para o surgimento da Indústria 5.0, que busca equilibrar tecnologia, pessoas e propósito (GRABOWSKA, 2022).

A Indústria 5.0 não substitui a Indústria 4.0. Ela a expande, ao institucionalizar três pilares: humanocentrismo, sustentabilidade e resiliência, definidos pela Comissão Europeia. Nesse enquadramento, a hiperpersonalização deixa de ser “ pilar” e passa a derivação operacional do humanocentrismo. Ela orienta o ajuste de produtos e de processos às necessidades humanas sem comprometer segurança e propósito, o que reordena prioridades de projeto, operação e governança tecnológica (COMISSÃO EUROPEIA, 2021; LENG *et al.*, 2022; XU *et al.*, 2021).

O humanocentrismo implica redesenhar a colaboração entre homem e sistema, para que pessoas sigam no controle das decisões críticas, com o apoio de tecnologias colaborativas e interfaces que reduzam carga cognitiva, padronizem execuções e ampliem transparência. Trata-se de reposicionar o trabalho qualificado como ativo, central em ambientes socio ciberfísicos (NAHAVANDI, 2019; TÓTH *et al.*, 2023).

A sustentabilidade na I5.0 prioriza circularidade, uso eficiente de recursos e governança de impactos, com indicadores alinhados a metas sociais e ambientais ao articular produtividade e preservações ambientais. O paradigma desloca o critério de sucesso de ganhos locais de eficiência para valor sistêmico mensurável (RAME; PURWANTO; SUDARNO, 2024).

A resiliência enfatiza adaptação a perturbações, à reconfiguração organizacional, de modo a sustentar continuidade operacional e qualidade sob incerteza. Na prática, os sistemas e as cadeias devem tolerar falhas e recuperar desempenho sem comprometer pessoas, ativos ou objetivos ambientais (LENG, 2022).

A literatura recente discute a coexistência de I4.0 e I5.0 e propõe configurações integradas. A eficiência técnica permanece necessária, mas subordinada a objetivos de valor humano e social. A governança da automação é orientada por critérios de

responsabilidade e preservação do julgamento humano em decisões de alto impacto (GOLOVIANKO, 2023; XU *et al.*, 2021).

A relação com a Sociedade 5.0 evidencia que indústria e sociedade evoluem de forma interdependente, que compartilham princípios de bem-estar humano, sustentabilidade e ética tecnológica. As comparações em quatro dimensões - objetivo, valor, organização e tecnologia - mostram convergências que orientam a inovação produtiva da I5.0 para equilibrar desempenho dos envolvidos neste cenário (HUANG, 2022).

Entre 2022 e 2025, as pesquisas passaram a destacar a colaboração entre pessoas e sistemas inteligentes nas fábricas, buscaram uma integração fluida e compreensível entre diferentes tecnologias. Nesse período, também surgiram métricas voltadas ao ser humano, que avaliam não apenas a produtividade, mas o bem-estar e o sentido do trabalho. Assim, o foco deixa de ser apenas o “fazer tecnicamente possível” e passa a ser o “fazer de forma humana, responsável e resiliente”. O fato reflete uma mudança de paradigma rumo à Indústria 5.0 (TÓTH *et al.*, 2023; LENG, 2022; RAME; PURWANTO; SUDARNO, 2024).

Em síntese, o avanço da I4.0 para a I5.0 ainda enfrenta lacunas estruturais que desafiam a consolidação de sistemas produtivos verdadeiramente humanocêntricos, sustentáveis e resilientes. Persistem dificuldades na padronização da mensuração de valor humano, na interoperabilidade entre sistemas legados, na governança ética da inteligência artificial, além dos dilemas entre produtividade, bem-estar e impacto ambiental. Superar essas limitações requer novos modelos conceituais e operacionais, capazes de integrar dimensões tecnológicas e sociais, de equilibrar desempenho técnico com propósito humano (LENG, 2022; GRABOWSKA, 2022).

Diante deste cenário, a transição da Indústria 4.0 para a 5.0 ainda enfrenta desafios estruturais que dificultam a criação de sistemas realmente humanocêntricos, sustentáveis e resilientes. Persistem falhas na mensuração do valor humano, na integração entre tecnologias antigas e novas e na governança ética da inteligência artificial. Equilibrar produtividade, bem-estar e meio ambiente segue como um problema. Superar essas barreiras exige novos modelos que unam tecnologia e ação humana (LENG, 2022; GRABOWSKA, 2022).

Como perspectiva futura, o campo aponta para a consolidação de *frameworks* replicáveis que unam tecnologias imersivas, governança de dados e sustentabilidade operacional, com a promoção da aprendizagem organizacional contínua. A articulação entre os nove pilares da Indústria 4.0 e os três pilares da Indústria 5.0, sustentada por metodologias de mensuração integradas e práticas de capacitação constante, delineia o caminho para uma transformação digital centrada nas pessoas, na transparência, baseada em evidências, visão que fundamenta a próxima etapa desta pesquisa (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018; LENG, 2022; GHOBAKHLOO, 2020).

2.2 Realidade Aumentada na Indústria 5.0: fundamentos, aplicações e desafios em ambientes controlados e não controlados

A RA caracteriza-se pela sobreposição de elementos digitais ao ambiente físico, permite ao usuário acessar informações adicionais em tempo real sem perder a referência espacial do mundo real (DARGAN *et al.*, 2023).

Diferentemente da Realidade Virtual (RV), que cria ambientes totalmente artificiais, a RA potencializa a percepção humana e amplia a capacidade cognitiva em atividades técnicas e operacionais. Esse aspecto a torna estratégica no contexto da Indústria 5.0, em que a colaboração entre humanos e sistemas inteligentes requer ferramentas capazes de conciliar eficiência produtiva, ergonomia e sustentabilidade (TRSTENJAK *et al.*, 2025).

As aplicações da RA abrangem múltiplos setores, e cada um explora suas potencialidades de acordo com necessidades específicas. Na educação, a tecnologia tem sido utilizada para apoiar o ensino-aprendizagem por meio de simulações e conteúdos interativos (ALGERAFI *et al.*, 2023).

Na saúde, evidencia-se sua relevância em cirurgias assistidas, visualização de exames e treinamentos de reabilitação (SUN *et al.*, 2023). No setor industrial, destaca-se em manutenção, inspeção, *setup* de máquinas e treinamento de operadores, proporciona maior confiabilidade e padronização dos processos (YAZDI, 2024). Na logística e na cadeia de suprimentos, estudos recentes mostram benefícios em rastreabilidade e em redução de perdas, sobretudo em ambientes não controlados (REJEB *et al.*, 2021a).

As principais descobertas da literatura indicam que a RA contribui para a redução do tempo de execução de tarefas, de falhas humanas e para o aumento da acurácia em operações críticas. Pesquisas em ambientes industriais relatam ganhos mensuráveis, como a redução significativa do tempo de *setup* e a melhoria na padronização de procedimentos (SEELIGER; CHENG; NETLAND, 2023).

Em contextos alimentícios, as aplicações voltadas à classificação de produtos demonstram maior confiabilidade na identificação de espécies e no menor desperdício de insumos (CHAI *et al.*, 2022). Tais evidências reforçam a adequação da RA como instrumento de suporte cognitivo e estratégico, contribuem para processos produtivos analisados nesta tese sob a lente das CDs (CHARI *et al.*, 2022).

Entretanto, as limitações também são recorrentes na literatura. A dependência de conectividade contínua representando um desafio em ambientes com baixa infraestrutura digital, como centros de distribuição de alimentos (SYED *et al.*, 2023).

Aspectos ergonômicos, como a fadiga visual e a física associadas ao uso prolongado de dispositivos móveis ou óculos de RA, além dos custos de implementação e customização, são barreiras à adoção em larga escala. Essas restrições reforçam a necessidade de soluções resilientes, capazes de operar em condições adversas e adaptadas ao perfil dos usuários (PATEL *et al.*, 2022).

As perspectivas futuras apontam para a convergência da RA com Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT), na viabilização de sistemas preditivos e adaptativos com capacidade de aprendizado contínuo (BIBRI; JAGATHEESAPERUMAL, 2023).

A disseminação das redes 5G tende a viabilizar maior estabilidade de conexão, enquanto a popularização de dispositivos mais acessíveis deverá reduzir barreiras técnicas e econômicas, ampliar o alcance da tecnologia em diferentes setores. Nesse sentido, espera-se que a RA seja cada vez mais incorporada a ecossistemas digitais voltados à Indústria 5.0 (MOURTZIS; ANGELOPOULOS; PANOPOULOS, 2021).

Os fundamentos da RA, quando relacionados à Indústria 5.0, evidenciam seu papel como tecnologia de suporte à colaboração homem-máquina, à flexibilidade operacional e à resiliência organizacional (RANI *et al.*, 2024). Ao possibilitar a adaptação de processos a diferentes perfis de usuários e a contextos produtivos, a RA

integra os princípios de eficiência, de personalização e de sustentabilidade. Consolidase como um dos elementos-chave para o avanço da transformação digital em ambientes controlados e não controlados (CONTINI; GRANDI; PERUZZINI, 2025).

A literatura sobre RA, aplicada a processos produtivos, evidencia duas vertentes principais: os contextos abertos, caracterizados por variabilidade ambiental e baixa infraestrutura digital, e os contextos fechados, definidos por maior controle operacional e suporte tecnológico consolidado (MÜLLER; STEGELMEYER; MISHRA, 2023).

No setor alimentício, a RA tem sido estudada como ferramenta de apoio à inspeção e à classificação de produtos. Ela busca maior confiabilidade na identificação e na redução de perdas. Um exemplo é a proposta de Fernandes *et al.* (2023), que desenvolveu uma arquitetura aplicada na CEAGESP para identificação de 18 tipos de ervas aromáticas por meio de RA e visão computacional em dispositivos móveis. A solução demonstrou precisão no reconhecimento visual, resposta em tempo real e maior confiança para decisões de compra; mitigou falhas decorrentes de semelhanças morfológicas entre espécies (FERNANDES *et al.*, 2023).

No setor industrial, a tecnologia é aplicada em rotinas de manutenção, *setup* de máquinas e treinamento de operadores, com ênfase na padronização de procedimentos e na mitigação de falhas humanas (REJEB; REJEB; KEOGH, 2021b).

No ambiente alimentício, exemplos recentes apontam para o uso da RA na classificação de espécies vegetais e no auxílio à tomada de decisão por parte de vendedores e consumidores. A tecnologia mostra-se promissora ao ampliar a precisão em cenários marcados por diversidade morfológica e por instabilidade de infraestrutura digital (SENTHIL *et al.*, 2024).

Entretanto, grande parte das soluções relatadas ainda depende de conectividade contínua e foi concebida para ambientes controlados, o que limita sua aplicação em centros de distribuição de larga escala (XIONG *et al.*, 2021). Essa restrição é particularmente crítica em ambientes como a CEAGESP, onde a ausência de redes estáveis compromete a adoção de sistemas baseados em nuvem, o que evidencia a necessidade de aplicações *offline*, capazes de operar de forma autônoma (LOPES *et al.*, 2024)

Na esfera industrial, a RA tem sido investigada principalmente em linhas de produção de alta complexidade que envolvem atividades críticas, como *setup* de máquinas, inspeção de equipamentos e protocolos de segurança operacional. A literatura aponta ganhos consistentes, como redução no tempo de execução, aumento da acurácia e da padronização de tarefas. Aplicações em treinamentos de operadores demonstram melhorias no aprendizado e maior retenção de conhecimento técnico (MORALES MÉNDEZ; DEL CERRO VELÁZQUEZ, 2024).

Apesar desses avanços, observa-se que muitos estudos permanecem limitados a ambientes experimentais, com forte dependência de redes estáveis e custos elevados de customização, o que dificulta sua disseminação em larga escala em fábricas de pequeno porte (CHU; WENG; CHEN, 2024).

As descobertas disponíveis reforçam que a RA pode atuar como suporte cognitivo em atividades que exigem precisão e tomada de decisão rápida. Contudo, a ausência de estudos comparativos entre ambientes abertos e fechados representa uma lacuna significativa, limita a compreensão da eficiência da tecnologia em cenários produtivos distintos (BUCHNER; BUNTINS; KERRES, 2022).

As limitações apontadas pela literatura reforçam a necessidade de novos modelos de aplicação. Entre as mais recorrentes, destacam-se a dependência de infraestrutura digital, os desafios ergonômicos relacionados ao uso prolongado de dispositivos móveis e os custos associados à adaptação de sistemas a diferentes perfis de usuários (JANSSEN; MÜLLER; MANN, 2023). Essas barreiras evidenciam que, embora a RA tenha potencial de transformação, sua implementação requer soluções mais resilientes e mais escaláveis, alinhadas às condições específicas de cada contexto produtivo (MARTINS *et al.*, 2022).

Ao comparar a aplicação da RA em ambientes abertos e fechados, é possível identificar não apenas os benefícios e limitações da tecnologia, mas também avaliar sua adequação às demandas da Indústria 5.0 (MARINO *et al.*, 2024).

Ao integrar a análise com a lente das CDs, a pesquisa amplia o debate sobre como a RA pode ser incorporada como recurso estratégico em processos de transformação digital que exigem simultaneamente eficiência, flexibilidade e resiliência (MELE *et al.*, 2023). A literatura recente indica que as Indústrias 4.0 e 5.0 têm

incorporado tecnologias como simulação de processos industriais, RA e IA para otimização produtiva (YAZDI, 2024; SEELIGER; CHENG; NETLAND, 2023).

A simulação virtual em células robóticas reduz o tempo de validação e antecipa falhas operacionais e é essencial no setor automotivo. Contudo, ainda há lacunas na integração entre simulação, RA e *frameworks* estratégicos que permitam mensurar, de forma unificada, desempenho técnico e cognitivo. Essa limitação restringe a aplicação da RA como ferramenta de validação e aprendizado organizacional. Assim, torna-se necessária uma abordagem baseada em *Design Science Research* (DSR) que una simulação digital e RA para ampliar a eficiência e a adaptabilidade nos processos de transformação digital industrial (LOPES *et al.*, 2025b).

Essa ausência é mais evidente em contextos industriais não controlados, nos quais variáveis ambientais complexas demandam modelos que articulem tecnologias digitais e capacidades organizacionais (JOUSSEN; KANBACH; KRAUS, 2025; PITELIS; TEECE; YANG, 2024). A comprovação reforça a necessidade de ampliar o entendimento sobre esses arranjos em cenários de transformação digital.

2.3 Capacidades Dinâmicas como lente teórica e operacional na transformação digital

O conceito de Capacidades Dinâmicas (CDs) nasce como uma evolução da visão baseada em recursos, preenche uma lacuna crítica ao explicar como as organizações sustentam vantagens competitivas em ambientes caracterizados por mudanças rápidas, complexidade e incerteza (SALVATO; VASSOLO, 2018). As CDs podem ser definidas como a capacidade de integrar, construir e reconfigurar competências internas e externas em relação a transformações no ambiente, vão além das capacidades operacionais de caráter rotineiro (KERO; BOGALE, 2023).

Diferentemente das capacidades ordinárias, que estão associadas à execução eficiente de atividades estabelecidas, as CDs permitem a adaptação estratégica contínua, constituem uma estrutura analítica para compreender a renovação e a resiliência organizacional em contextos turbulentos. Desta forma, tornam-se uma lente essencial para investigar como as empresas identificam, capturam e transformam oportunidades, preservam sua competitividade ao longo do tempo (JOUSSEN; KANBACH; KRAUS, 2025).

Entre as características centrais, destacam-se três dimensões: *Sense* (envolve a detecção de oportunidades e de ameaças no ambiente externo); *Seize* (envolve mobilização de recursos para captura dessas oportunidades) e *Transform* (relaciona-se à capacidade de reconfigurar processos, estruturas e modelos de negócio). Essas dimensões não atuam de forma isolada, mas em ciclos interdependentes; garantem que a organização mantenha flexibilidade e resiliência frente a pressões externas (DEJARDIN *et al.*, 2023).

A literatura avançou ao indicar que tais capacidades não são abstratas, mas manifestam-se em processos específicos e identificáveis, como desenvolvimento de produtos, alianças estratégicas e tomada de decisão. Podem ser classificadas em três níveis: incrementais - voltadas à melhoria contínua; renovadoras - responsáveis por atualizar e ampliar a base de recursos; regenerativas - as que transformam o próprio conjunto de CDs. Essa hierarquia evidencia a profundidade do conceito, reforça sua relevância como ferramenta analítica (PITELIS; TEECE; YANG, 2024).

No campo da gestão estratégica, as CDs explicam como empresas adaptam seus modelos de negócio frente a disrupções tecnológicas ou a mudanças regulatórias. Para isto, constituem uma ponte entre estratégia e inovação (SIEMS; LAND; SEURING, 2021).

No contexto de inovação e de transformação digital, permitem avaliar como tecnologias emergentes são integradas para aprimorar processos internos, fortalecer relacionamentos com *stakeholders* e ampliar a competitividade global (STEININGER *et al.*, 2022).

Na sustentabilidade, o processo de *Sense* permite identificar riscos ambientais e sociais, enquanto *Seize* e *Transform* orientam a adoção de práticas responsáveis, com a conciliação de desempenho econômico e responsabilidade socioambiental (BUZZAO; RIZZI, 2021).

A perspectiva dinâmica também dialoga com a noção de ciclos de vida das capacidades, em que estas evoluem da fundação ao amadurecimento e podem se ramificar em novos caminhos adaptativos. Esse processo explica a heterogeneidade organizacional e reforça a importância da renovação contínua das capacidades como fonte de vantagem competitiva (BARI; CHIMHUNDU; CHAN, 2024).

Por sua abrangência, as CDs se consolidaram como uma das teorias mais influentes na administração estratégica contemporânea. Elas permitem compreender não apenas a eficiência operacional, mas também a capacidade de responder, aprender e se transformar em ambientes dinâmicos. Tornam-se uma lente teórica fundamental para investigações acadêmicas e aplicações práticas (KNOPPEN; KNIGHT, 2022). A adaptação contínua e a inovação tecnológica são reconhecidas como elementos essenciais para a sustentação da vantagem competitiva, em consonância com o papel das CDs na Indústria 5.0 (GEHANI, 2016).

A aplicação empírica das CDs requer a identificação de evidências observáveis e instrumentos de mensuração, capazes de traduzir os constructos teóricos de *Sense*, *Seize* e *Transform* em variáveis verificáveis. Conforme a abordagem de Teece (2007), aprofundada por Salvato e Vassolo (2018), as CDs se manifestam em práticas organizacionais concretas que podem ser capturadas por métricas, indicadores e observações de desempenho.

Sua operacionalização nesta tese apoia-se em três eixos analíticos: (i) evidências empíricas (dados de observação direta, tempos de execução, respostas de usuários e registros de operação); (ii) instrumentos de coleta e validação (como questionários SUS e UEQ para avaliar usabilidade e experiência, cronometrias e logs do sistema para mensurar eficiência e reconfiguração operacional); (iii) dimensões correspondentes às CDs, associadas ao contexto da Indústria 5.0. Essa estrutura permite mapear o ciclo *Sense*, *Seize*, *Transform* de forma sistemática, permite conectar o desempenho tecnológico e cognitivo aos resultados de aprendizado organizacional e sustentabilidade digital (PITELIS; TEECE; YANG, 2024; JOUSSEN; KANBACH; KRAUS, 2025).

Dessa forma, a dimensão *Sense* será evidenciada por indicadores de percepção e diagnóstico situacional, como a capacidade de identificar falhas ou oportunidades via realidade aumentada e sensores IoT. A dimensão *Seize* será capturada por métricas de tomada de decisão e alocação de recursos, avaliadas pela rapidez e pela assertividade das respostas observadas nos experimentos controlados e não controlados. A dimensão *Transform* será identificada por registros de reconfiguração e de aprendizado contínuo, medidos por *logs* de desempenho, por adaptação do sistema e evolução das rotinas de uso. Essa triangulação empírica permite evidenciar a natureza processual,

cumulativa e mensurável das CDs, conforme indicado por Steininger *et al.* (2022) e Knoppen e Knight (2022), traduzir a teoria em evidências concretas.

O Quadro 1 sintetiza as principais dimensões das CDs, destaca suas definições, características e aplicações práticas no contexto da transformação digital e da Indústria 5.0.

Quadro 1 – Dimensões analíticas das CDs: definição, características e aplicações

Capacidades Dinâmicas - Dimensão analítica	Definição	Características	Aplicações
<i>Sense</i>	Capacidade de detectar oportunidades e ameaças no ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento contínuo. - Interpretação de sinais de mercado. - Antecipação de mudanças externas. 	Identificação de tendências tecnológicas, riscos ambientais e novas demandas de consumidores.
<i>Seize</i>	Mobilização de recursos para capturar oportunidades.	<ul style="list-style-type: none"> - Alocação ágil de investimentos. - Estruturação de modelos de negócio. - Tomada de decisão baseada em evidências. 	Desenvolvimento de produtos, adoção de tecnologias emergentes, implementação de práticas sustentáveis.
<i>Transform</i>	Reconfiguração de processos e estruturas organizacionais.	<ul style="list-style-type: none"> - Redesenho de fluxos produtivos. - Inovação contínua. - Criação de novas rotinas e cultura organizacional. 	Transformação digital, reorganização estratégica, adaptação a cenários de crise e disrupções.

Fonte: Autor (2025)

2.4 Relações teóricas entre I5.0 e Capacidades Dinâmicas (CDs)

A I5.0 redefine a lógica da transformação industrial ao reposicionar o ser humano como elemento central dos sistemas produtivos e ao ampliar o foco da automação para a criação de valor humano, ambiental e organizacional. Essa abordagem propõe que a eficiência tecnológica seja acompanhada por propósito, sustentabilidade e resiliência, que consolide um modelo de produção orientado pela interação entre inteligência digital e responsabilidade social (COMISSÃO EUROPEIA, 2021; LENG *et al.*, 2022; XU *et al.*, 2021).

Compreender como essa integração ocorre exige uma base teórica capaz de explicar os mecanismos que permitem que as organizações percebam mudanças, tomem decisões e adaptem-se continuamente. Diante deste cenário, as Capacidades Dinâmicas (CDs) oferecem uma lente analítica adequada, pois descrevem o modo como as empresas identificam oportunidades, mobilizam recursos e reconfiguram processos para sustentar vantagem competitiva em ambientes complexos e em rápida transformação (TEECE, 2007; SALVATO; VASSOLO, 2018; PITELIS; TEECE; YANG, 2024).

O conceito de CDs evoluiu da visão baseada em recursos, preencheu uma lacuna crítica ao explicar não apenas o que as organizações possuem, mas como aprendem, reagem e se renovam. As CDs podem ser definidas como a capacidade de integrar, construir e reconfigurar competências internas e externas em resposta a transformações do ambiente, como capacidade de ir além das capacidades operacionais de caráter rotineiro (KERO; BOGALE, 2023).

Diferentemente das capacidades ordinárias, que buscam eficiência na execução de atividades estabelecidas, as CDs promovem adaptação estratégica contínua; tornam-se uma estrutura essencial para compreender a renovação e a resiliência organizacional em contextos turbulentos (JOUSSEN; KANBACH; KRAUS, 2025).

Entre suas dimensões fundamentais, destacam-se *Sense*, relacionada à detecção de sinais e oportunidades; *Seize*, voltada à mobilização de recursos e à captura de valor; *Transform*, que representa a reconfiguração de processos, de estruturas e de modelos de negócio. Essas dimensões não atuam de forma linear, mas

se interligam em ciclos interdependentes que permitem que a organização mantenha flexibilidade e resiliência diante de pressões externas (DEJARDIN *et al.*, 2023).

A literatura mostra ainda que essas capacidades não são meramente abstratas, mas se expressam em processos concretos, como o desenvolvimento de produtos, alianças estratégicas e inovação em modelos de negócio. Elas também podem ser classificadas como incrementais, quando aprimoram o que já existe; renovadoras, quando atualizam e ampliam a base de recursos; regenerativas, quando transformam a própria estrutura das CDs (PITELIS; TEECE; YANG, 2024).

No campo da gestão estratégica, as CDs explicam como as empresas ajustam seus modelos de negócio diante de disrupções tecnológicas e mudanças regulatórias, como constituem um elo entre estratégia e inovação (SIEMS; LAND; SEURING, 2021).

Em ambientes de transformação digital, elas permitem analisar como tecnologias emergentes são integradas para aprimorar processos internos, fortalecer relacionamentos com *stakeholders* e aumentar a competitividade global (STEININGER *et al.*, 2022). Já na perspectiva da sustentabilidade, o *Sense* possibilita identificar riscos e oportunidades ambientais e sociais, enquanto *Seize* e *Transform* direcionam a adoção de práticas responsáveis que conciliam desempenho econômico e responsabilidade socioambiental (BUZZAO; RIZZI, 2021).

A abordagem dinâmica também dialoga com os ciclos de vida das capacidades, em que estas evoluem da fundação ao amadurecimento e podem se ramificar em novas trajetórias adaptativas (BARI; CHIMHUNDU; CHAN, 2024). Essa evolução explica a heterogeneidade organizacional e reforça a importância da renovação contínua das CDs como fonte de vantagem competitiva. Por sua abrangência e poder explicativo, as CDs tornaram-se uma das teorias mais influentes da administração estratégica contemporânea. Elas permitem compreender não apenas a eficiência operacional, mas também a capacidade de responder, aprender e se transformar (KNOPPEN; KNIGHT, 2022).

A adaptação contínua e a inovação tecnológica são reconhecidas como elementos essenciais para a manutenção da vantagem competitiva, o que as alinha diretamente ao papel das CDs na I5.0, que busca conciliar automação, propósito humano e sustentabilidade (GEHANI, 2016).

Desta forma, as CDs atuam como elo conceitual e operacional entre os pilares teóricos da I5.0. O *Sense* está associado ao humanocentrismo, pois permite compreender as necessidades cognitivas, físicas e emocionais das pessoas que interagem com as tecnologias. Ele viabiliza a hiperpersonalização como consequência prática desse pilar. O *Seize* conecta-se à sustentabilidade; orienta a alocação eficiente de recursos, a redução de desperdícios e a incorporação de critérios socioambientais nas decisões produtivas. O *Transform* corresponde à resiliência e garante que a organização mantenha continuidade e aprendizado mesmo diante de rupturas externas (MÜLLER; STEGELMEYER; MISHRA, 2023).

A relação entre essas dimensões e os pilares da I5.0 é sintetizada no Quadro 2 que apresenta como as CDs traduzem valores conceituais em mecanismos práticos de percepção, captura e reconfiguração.

Quadro 2 – Relações teóricas entre CDs e Pilares da I5.0

Dimensão das CDs	Pilar da I5.0	Justificativa teórica	Referências
Sense (detecção e interpretação de sinais)	Humanocentrismo	O Sense reflete a capacidade de compreender riscos e necessidades humanas; ele integra tecnologias, como sensores, RA e IA, para adaptar sistemas à cognição e à ergonomia do trabalhador. A hiperpersonalização emerge como resultado prático dessa sensibilidade, ao traduzir percepções humanas em ajustes produtivos.	TEECE (2007); TRSTENJAK <i>et al.</i> (2025); CONTINI; GRANDI; PERUZZINI (2025)
Seize (mobilização e alocação de recursos)	Sustentabilidade	O Seize traduz a mobilização racional de recursos, integra decisões baseadas em dados e elimina desperdícios. Sua expressão prática está na busca de equilíbrio entre desempenho produtivo e responsabilidade ambiental.	BUZZAO; RIZZI (2021); MOURTZIS; ANGELOPOULOS; PANOPOULOS (2021)
Transform (reconfiguração e renovação organizacional)	Resiliência	O <i>Transform</i> representa a capacidade de reconfigurar fluxos e estruturas diante de rupturas, assegura continuidade e aprendizado organizacional. Essa plasticidade é a base da resiliência.	PITELIS; TEECE; YANG (2024); MÜLLER; STEGELMEYER; MISHRA (2023)

Fonte: Autor (2025)

O Quadro 2 reforça que as CDs sustentam a lógica de funcionamento da I5.0; transformam princípios abstratos, como humanização, sustentabilidade e resiliência, em mecanismos organizacionais tangíveis. Assim, as CDs não apenas descrevem “como” as organizações se adaptam, mas também “por que” certas configurações tecnológicas produzem resultados mais equilibrados entre eficiência e bem-estar humano.

Com base nessa relação, torna-se necessário demonstrar como essas dimensões são operacionalizadas e mensuradas empiricamente. Essa etapa permite validar a presença e a intensidade das CDs em diferentes contextos de maturidade digital.

Na presente tese, essa operacionalização se apoia em três estudos complementares: o *AutoSim*, empregado como *baseline* metodológico para validar a correspondência entre simulação e realidade; o *ARomaticLens* aplicado na CEAGESP como exemplo de ambiente aberto e não controlado; o *ARTechGuide*, desenvolvido em empresa do setor de autopeças, ele representa um ambiente controlado e de alta integração digital, e sua estrutura se apresenta no Quadro 3.

Quadro 3 – Operacionalização das CDs: evidências empíricas e instrumentos

Estudo / Contexto	Evidência empírica observada	Instrumento de coleta / validação	Dimensão CD associada	Referências
AutoSim – baseline metodológico (ambiente híbrido)	Correspondência entre simulação virtual e operação real, com redução do ciclo produtivo e validação cruzada de dados empíricos.	Cronoanálise segmentada; <i>logs</i> de trajetória; relatórios comparativos de desempenho; observação de campo.	<i>Sense / Seize / Transform</i> – percepção, captura e reconfiguração integradas.	JOUSSEN; KANBACH; KRAUS (2025); LOPES <i>et al.</i> (2025a)
ARomaticLens – CEAGESP (ambiente aberto)	Redução de erros de classificação e aumento da precisão na identificação de espécies aromáticas.	Observação direta; métricas de acurácia; entrevistas semiestruturadas; <i>logs</i> de uso do aplicativo.	<i>Sense</i> – percepção de padrões e necessidades humanas no processo decisório.	FERNANDES <i>et al.</i> (2023); LOPES <i>et al.</i> (2024)
	Melhoria da rastreabilidade e redução de perdas no fluxo logístico.	Indicadores de tempo de ciclo; registros fotográficos; diário de bordo operacional.	<i>Seize</i> – mobilização de recursos e eficiência operacional sustentável.	REJEB <i>et al.</i> (2021a)
	Adaptação do aplicativo para operação <i>offline</i> sob restrições de conectividade.	<i>Logs</i> de uso <i>offline</i> ; <i>feedback</i> dos operadores; testes de estabilidade.	<i>Transform</i> – reconfiguração tecnológica e aprendizado organizacional.	SYED <i>et al.</i> (2023)
ARTechGuide – empresa do segmento de autopeças (ambiente controlado)	Redução do tempo médio de <i>setup</i> e diminuição de falhas humanas em rotinas técnicas.	Cronometria; registros de erro; análise comparativa pré e pós-uso.	<i>Seize</i> – captura de oportunidades e padronização de processos.	SEELIGER; CHENG; NETLAND (2023)
	Aumento da acurácia e da retenção de conhecimento técnico em treinamentos operacionais.	Questionários SUS e UEQ; observações diretas; <i>logs</i> de interação.	<i>Sense</i> – suporte cognitivo e percepção humanocêntrica.	MORALES MÉNDEZ; DEL CERRO VELÁZQUEZ (2024)

	Integração entre RA, IoT e simulação digital; promove autonomia operacional e resiliência.	Relatórios de integração; medições de latência; registros de retomada.	<i>Transform</i> – reconfiguração adaptativa e resiliência digital.	LOPES <i>et al.</i> (2025b)
--	--	--	---	-----------------------------

Fonte: Autor (2025)

A análise comparativa dos três contextos evidencia que as CDs se manifestam de maneira distinta conforme o grau de controle e maturidade digital do ambiente. Em cenários abertos, o *Sense* se destaca como competência cognitiva voltada à interpretação de sinais sob incerteza. Em ambientes controlados, o *Seize* traduz-se em eficiência operacional e uso intensivo de dados. O *Transform* atua de forma transversal, assegura a reconfiguração tecnológica e organizacional necessária à continuidade e à resiliência.

Essa estrutura estabelece coerência teórica entre I5.0 e CDs; explica a hiperpersonalização como implicação prática do humanocentrismo e apresenta evidências empíricas observáveis e rastreáveis; garante consistência entre teoria, método e resultados.

As CDs constituem o eixo funcional da I5.0, permite que as organizações percebam (*Sense*) as necessidades humanas e contextuais, capturem (*Seize*) oportunidades sustentáveis e transformem (*Transform*) continuamente seus sistemas para manter propósito, desempenho e longevidade. Essa integração teórico-empírica fundamenta o subcapítulo seguinte, no qual são discutidos os procedimentos de operacionalização e mensuração das CDs no contexto da transformação digital e da maturidade organizacional.

2.5 Avaliações qualitativas de usabilidade e Experiência do Usuário

A Experiência do Usuário (UX) constitui um campo de estudo voltado à análise da qualidade da interação entre pessoas e sistemas tecnológicos, abrange aspectos funcionais e perceptivos que influenciam a aceitação e o uso das soluções digitais (VIRVOU, 2023).

Diferente da usabilidade tradicional, que se concentra em eficiência e eficácia de tarefas, a UX incorpora dimensões cognitivas, emocionais e contextuais. Ela permite compreender como os usuários percebem clareza, confiabilidade e valor agregado em uma tecnologia (NTOA *et al.*, 2021). Entre as principais características avaliadas pela UX destacam-se clareza das instruções, facilidade de aprendizado, eficiência no uso, confiança na execução de tarefas e satisfação geral com a experiência digital (ALOMARI *et al.*, 2020).

Esses elementos são particularmente relevantes em contextos produtivos, nos quais erros ou ambiguidades de interface podem comprometer tanto a segurança operacional, quanto a eficiência do processo. A análise da UX, portanto, vai além da estética ou do *design*. É reconhecida como métrica estratégica para validar tecnologias aplicadas em ambientes de alta criticidade (ALEXIOU; SCHIPPERS, 2018).

As aplicações da UX em estudos recentes abrangem desde o desenvolvimento de softwares educacionais até soluções industriais, como interfaces de sistemas de manutenção, aplicativos de suporte cognitivo e plataformas de realidade aumentada (DIRIN; LAINE, 2018).

A coleta de percepções de usuários e especialistas permite comparar diferentes métodos ou sistemas, resulta métricas padronizadas que expressam a qualidade percebida da interação. Escalas de avaliação, como notas atribuídas em intervalos de 0 a 10 ou 1 a 5 pontos, têm sido amplamente utilizadas para consolidar a percepção de especialistas sobre a adequação e a confiabilidade das interfaces digitais em cenários reais de uso (KHAMAISI *et al.*, 2021).

Apesar de sua relevância, a avaliação da UX apresenta limitações; os resultados podem variar em função da experiência prévia dos usuários, das condições ambientais durante o teste ou da familiaridade com a tecnologia avaliada (LAMPROPOULOS *et al.*, 2022). Essa variabilidade demanda amostras representativas e, quando possível, a triangulação com outros métodos qualitativos, como entrevistas e observação direta, para aumentar a consistência das conclusões (RUSU *et al.*, 2015).

Como direcionamento futuro, a UX tende a assumir papel cada vez mais integrado ao desenvolvimento tecnológico, sobretudo em ambientes da Indústria 5.0, que exigem interfaces adaptáveis, seguras e acessíveis (ALBERT; TULLIS, 2022).

O uso combinado de métricas quantitativas e qualitativas permite avaliações mais robustas, favorece comparações entre contextos distintos, controlados e não controlados, e amplia a confiabilidade de estudos aplicados em ambientes produtivos (LUTHER; TIBERIUS; BREM, 2020). Para garantir consistência na mensuração da UX, diferentes instrumentos padronizados foram desenvolvidos. O *System Usability Scale* (SUS) e o *User Experience Questionnaire* (UEQ) são os mais consolidados na literatura internacional (MORTAZAVI *et al.*, 2024).

O SUS, criado por Brooke, é composto por 10 itens organizados em escala *Likert* de 1 a 5 pontos. Ele mede a percepção de facilidade de uso, a complexidade, a consistência e a confiança no sistema, o que resulta uma pontuação única de 0 a 100 que indica o nível de usabilidade percebida. Seu diferencial é a simplicidade e a rapidez na aplicação, fato que o tornou referência em diferentes setores tecnológicos (LEWIS, 2018).

O UEQ, desenvolvido por Laugwitz, Held e Schrepp, apresenta abordagem mais abrangente que o SUS, avalia dimensões como atratividade, eficiência, clareza, estímulo e inovação. Utiliza escalas bipolares (por exemplo: difícil/fácil, entediante/estimulante), gera um perfil mais detalhado da experiência do usuário (LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008). Por essa característica, é amplamente aplicado em estudos que buscam compreender não apenas a usabilidade funcional, mas também aspectos emocionais e contextuais da interação (PERRIG *et al.*, 2024).

Embora os artigos aplicados em contextos alimentícios e industriais tenham utilizado notas atribuídas por especialistas para avaliar UX, a fundamentação em SUS e UEQ fortalece o enquadramento teórico e confere validade internacional aos resultados qualitativos (LU; QU; CHEN, 2025).

Assim, mesmo sem aplicação literal desses questionários, os conceitos neles baseados sustentam as avaliações realizadas, asseguram rigor analítico e comparabilidade em diferentes contextos produtivos, conforme indicado no Quadro 4.

Quadro 4 – Comparação entre SUS e UEQ como instrumentos de avaliação da UX

Instrumento	Dimensões principais	Tipo de escala	Resultado esperado	Principais aplicações
<i>SUS (System Usability Scale)</i>	Facilidade de uso, complexidade percebida, consistência, confiança	<i>Likert</i> (1–5) com 10 itens	Pontuação 0–100, com indicação do nível de usabilidade	Avaliação rápida de usabilidade em sistemas digitais diversos
<i>UEQ (User Experience Questionnaire)</i>	Atratividade, eficiência, clareza, estímulo, inovação	Escalas bipolares (ex.: difícil/fácil, chato/divertido)	Perfil detalhado da experiência do usuário	Estudos de UX em softwares, aplicativos móveis e sistemas interativos complexos

Fonte: Autor (2025)

3 METODOLOGIA

A presente tese adota um desenho metodológico que integra o *Design Science Research* (DSR) ao estudo de caso múltiplo, de modo a conciliar rastreabilidade científica e aplicabilidade prática. Essa combinação é amplamente reconhecida como apropriada para investigações que envolvem desenvolvimento tecnológico e observação empírica em contextos reais (EISENHARDT, 1989; YIN, 2017; PEFFERS *et al.*, 2007). O DSR fornece a estrutura processual para a criação, a demonstração e a avaliação dos artefatos de RA, enquanto o estudo de caso organiza a análise comparativa entre diferentes ambientes produtivos, o que garante que os resultados reflitam tanto a robustez experimental, quanto a relevância organizacional das soluções propostas.

O desenho do estudo de caso foi estruturado segundo a lógica de replicação e extensão teórica (EISENHARDT, 1991). Ele articula três unidades empíricas contrastantes: (i) o *Baseline AutoSim*, conduzido em ambiente controlado/simulado de manufatura; (ii) o *ARomaticLens*, desenvolvido em ambiente não controlado com restrição de conectividade (CEAGESP); (iii) o *ARTechGuide*, aplicado em ambiente fabril controlado com foco em padronização e setup de máquinas.

A abordagem quantitativa e qualitativa foi operacionalizada por métricas técnicas, instrumentos padronizados de UX e pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). As medições de tempo, acurácia, falhas e experiência do usuário alimentaram a avaliação do *framework*. O AHP permitiu priorizar dimensões e subcritérios, pois agregou os julgamentos de três especialistas para validar a coerência estrutural e a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos industriais e logísticos. O fluxo metodológico da pesquisa foi dividido em 6 etapas e pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 - Fluxo metodológico da pesquisa

Fonte: Autor (2025)

A escolha dos casos obedeceu a critérios de contraste (controlado × não controlado), acesso aos dados e pertinência ao objetivo central da pesquisa. O perfil de cada caso foi caracterizado por setor, processo produtivo, nível de digitalização, conectividade e variabilidade operacional, o que assegurou comparabilidade entre os contextos.

A unidade de análise corresponde à tarefa operacional assistida por RA, ou seja, a atividade em que o operador interage diretamente com o artefato digital para executar, inspecionar ou ajustar um processo. Essa definição, conforme Yin (2017), permite estabelecer fronteiras claras de observação e medir o impacto da tecnologia sobre desempenho, percepção e aprendizado organizacional.

A análise empírica foi conduzida em duas camadas complementares: intracaso e intercaso, conforme o protocolo metodológico de Eisenhardt (1989) e Yin (2017). No nível intracaso, cada cenário foi examinado individualmente para identificar padrões locais, relações causais e interações entre fatores humanos, tecnológicos e organizacionais (STAKE, 1995; FLYVBJERG, 2006).

As evidências foram obtidas por meio de observações estruturadas, cronometrias, registros digitais e questionários de experiência do usuário. No nível intercaso, as evidências foram comparadas de forma sistemática, com base em um protocolo de comparação padronizado, que assegura consistência e replicabilidade dos resultados. As métricas adotadas incluíram tempo de *setup* (s), taxa de erro (%), latência de carregamento da RA (s), aderência a padrão (*checklist*) e avaliações SUS e UEQ de usabilidade e experiência do usuário.

Esse conjunto foi selecionado por representar dimensões operacionais e cognitivas relevantes para a análise da transformação digital em ambos os contextos. A uniformização dos instrumentos e a normalização dos dados possibilitaram comparações diretas, sustentaram a validade externa dos achados (BOUNCKEN; CZAKON; SCHMITT, 2025).

A integração entre o DSR e as Capacidades Dinâmicas (CDs) foi concebida para vincular evidências empíricas às dimensões teóricas *Sense*, *Seize* e *Transform*. As fases do DSR foram associadas a essas dimensões de forma estruturada. O diagnóstico e a identificação de requisitos correspondem ao *Sense*; representam o reconhecimento de oportunidades e de restrições tecnológicas; o *design* e o

desenvolvimento do artefato materializam o *Seize*; refletem a mobilização de recursos; as decisões técnicas, a avaliação e a iteração em campo compõem o *Transform*, que evidencia a aprendizagem organizacional e a reconfiguração de práticas produtivas. Esse encadeamento assegura coerência entre a lógica construtiva do DSR e a lente analítica das CDs; permite interpretar a adoção da RA como um processo dinâmico de adaptação tecnológica e cognitiva (TEECE, 2007; PITELIS; TEECE; YANG, 2024).

Para garantir rastreabilidade e triangulação de evidências, todos os instrumentos formulários, planilhas e *scripts* de coleta foram analisados e arquivados. Cada resultado foi associado à sua fonte primária (entrevista, observação ou métrica de desempenho); compôs uma cadeia de evidências auditável, conforme preconizado por Yin (2017) e Eisenhardt (1989). A triangulação entre dados quantitativos, qualitativos e multicritério reduz vieses individuais e aumenta a robustez interpretativa (SURR *et al.*, 2020).

A validação final do *framework* foi conduzida pelo método AHP (SAATY, 1980; MARDANI *et al.*, 2015), aplicado a especialistas em Indústria 5.0, RA e IoT. O AHP permitiu quantificar a relevância relativa das dimensões humanocêntrica, sustentável, resiliente, *Sense*, *Seize* e *Transform*, o que transformou julgamentos qualitativos em pesos objetivos e mensuráveis. A consistência dos julgamentos foi verificada pelo índice de razão ($CR \leq 0,10$), e a concordância interavaliador foi analisada pelo coeficiente de Kendall ($W \geq 0,70$), e isto assegurou coerência estatística.

Os resultados do AHP foram triangulados com as métricas empíricas da análise intercaso; constituíram um fechamento metodológico robusto entre evidência observável e avaliação especializada.

Todos os procedimentos obedeceram às normas éticas e à Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018). As empresas e participantes foram anonimizados por questões de confidencialidade, e as informações coletadas foram armazenadas em ambiente restrito, de acesso controlado.

Essa estrutura assegura que a pesquisa mantenha integridade ética, validade empírica e coerência teórica. Alinharam-se os resultados às exigências contemporâneas de rigor científico em pesquisas aplicadas em engenharia e gestão da inovação.

3.1 Design Science Research aplicado em sistemas tecnológicos interativos

O *Design Science Research* (DSR) pode ser definido como o método de pesquisa voltado ao desenvolvimento de artefatos tecnológicos com finalidade prática e validade científica (PEFFERS *et al.*, 2007).

Sua essência está nas soluções aplicáveis a problemas reais. Ele estrutura o processo investigativo em criação, aplicação e avaliação. Ao contrário de métodos puramente descritivos ou observacionais, o DSR busca construir conhecimento por meio da intervenção sistemática no ambiente estudado (SORDI, 2021).

Entre suas principais qualidades, destacam-se a orientação à solução de problemas, a estrutura metodológica e a relevância prática. O DSR é composto por fases: identificação do problema, definição de objetivos, *design* e desenvolvimento do artefato, demonstração em ambiente real ou simulado e avaliação dos resultados. Essa estrutura garante replicabilidade e fornece uma base sólida para que os artefatos desenvolvidos possam ser avaliados tanto sob a ótica técnica, quanto sob o impacto organizacional (VENABLE; PRIES-HEJE; BASKERVILLE, 2016).

As aplicações do DSR abrangem sistemas interativos, tecnologias digitais emergentes e processos de inovação organizacional. Em áreas, como engenharia, automação e RA, a metodologia tem sido utilizada para criar protótipos funcionais, validar arquiteturas digitais e estruturar soluções de apoio à decisão em contextos produtivos. Nesses cenários, o DSR favorece a integração entre *design* tecnológico e práticas organizacionais, o que assegura que os resultados gerados possuam relevância operacional e acadêmica (JOHANNESSON; PERJONS, 2021).

Apesar de sua ampla aceitação, o DSR apresenta limitações que precisam ser reconhecidas. A principal refere-se à dependência de ambientes de teste e de recursos técnicos especializados, o que pode diminuir a precisão dos resultados. Outro ponto a ser observado é a orientação prática que pode levar a desafios na delimitação entre inovação tecnológica e contribuição científica, e o fato exige clareza metodológica para evitar vieses de validação (SONNENBERG; VOM BROCKE, 2012).

Como direcionamento futuro, observa-se a tendência de ampliar o uso do DSR em cenários complexos de transformação digital, com foco em artefatos adaptativos e integrados a múltiplas tecnologias. A incorporação de abordagens híbridas, que associam métodos qualitativos e quantitativos, surge como caminho para aumentar a

robustez das análises. O DSR mantém-se como ferramenta metodológica capaz de alinhar rigor científico, inovação tecnológica e aplicabilidade prática em sistemas tecnológicos interativos (VOM BROCKE; MAEDCHE, 2019).

3.2 Estudo de caso: Estratégias analíticas intracaso e intercaso

O estudo de caso é um método científico que permite a análise detalhada de fenômenos inseridos em seu contexto real, especialmente quando não há delimitação clara entre os limites do objeto e do ambiente em que se manifesta (GERRING, 2006). Essa característica torna-o adequado para responder a questões de “como” e “por que”, em situações nas quais o pesquisador não exerce controle direto sobre os eventos, o que reforça sua aplicabilidade em investigações empíricas voltadas à prática (YIN, 2017).

A solidificação desse método decorre de sua capacidade de articular múltiplas fontes de evidência, como entrevistas, documentos, métricas quantitativas e observações. Essa integração assegura que aspectos qualitativos e quantitativos sejam analisados de forma complementar, e o fato permite interpretações que consideram simultaneamente as perspectivas dos participantes e os registros objetivos (AYRES; KAVANAUGH; KNAFL, 2003). Dessa forma, o estudo de caso mantém a centralidade no contexto e gera conhecimento analítico com potencial de transferência para ambientes semelhantes (MERRIAM, 1998; STAKE, 1995; FLYVBJERG, 2006).

Na literatura, diferentes tipologias orientam o uso do estudo de caso. Yin (2017) distingue modalidades exploratórias, descritivas e explanatórias, enquanto Eisenhardt (1989) enfatiza a força da utilização de múltiplos casos para a construção de teorias fundamentadas em evidências empíricas. Essa visão é expandida por White e Cooper (2022), que introduzem vertentes críticas, ampliam o alcance metodológico e sua adequação a pesquisas qualitativas contemporâneas.

No interior dessa abordagem, surgem as estratégias analíticas que organizam a interpretação dos dados. A análise intracaso dedica-se ao exame aprofundado de um único contexto, permite identificar padrões internos, relações causais e particularidades organizacionais. Essa lente revela como fatores técnicos, humanos e institucionais interagem localmente e orientam a compreensão da dinâmica própria de cada ambiente (STAKE, 1995; YIN, 2017).

Quando os resultados provenientes de diferentes contextos precisam ser colocados em diálogo, aplica-se a análise intercaso, estratégia que permite identificar convergências e divergências entre os achados e ampliar a compreensão dos fenômenos estudados. Além de evidenciar padrões comparativos, essa abordagem fornece base para avaliar a escalabilidade das soluções e a generalização analítica dos resultados. Isto reforça a consistência metodológica e a validade externa da pesquisa (BOUNCKEN; CZAKON; SCHMITT, 2025). Ao permitir a comparação estruturada entre cenários, fortalece a validade externa da pesquisa e amplia a relevância das conclusões (EISENHARDT, 1989; YIN, 2017). A utilização de estudos de caso em mercados emergentes demonstra potencial para a construção teórica aplicada; permite compreender fenômenos tecnológicos sob condições de restrição e incerteza (REDDY, 2015).

A triangulação de evidências, por sua vez, conecta e valida essas estratégias. Ao combinar diferentes fontes de informação, reduz vieses, assegura a consistência dos achados e reforça a confiabilidade do método (SURR *et al.*, 2020). Essa prática é reconhecida como fundamental para sustentar a robustez do estudo de caso. Ela garante que os resultados não dependam de uma única linha de observação, mas da convergência entre múltiplas perspectivas (YIN, 2017; FLYVBJERG, 2006).

Na presente tese, o estudo de caso é estruturado a partir de três bases complementares. O Artigo 1 - *Baseline AutoSim* estabelece protocolos de mensuração em ambiente controlado/simulado; constitui o *baseline* metodológico que fundamenta os indicadores e a comparabilidade. O Artigo 2 - *ARomaticLens* aplica a RA em ambiente não controlado, na CEAGESP; enfrenta desafios de variabilidade ambiental. O Artigo 3 - *ARTechGuide* avalia a RA em ambiente fabril controlado, com foco em padronização de processos e setup de máquinas. A análise intracaso interpreta cada contexto isoladamente, enquanto a análise intercaso sintetiza convergências e divergências, assegura validade metodológica por meio da triangulação de evidências (YIN, 2017; EISENHARDT, 1989; STAKE, 1995).

3.3 Artigo 1 – *Baseline AutoSim*

A definição de um baseline metodológico foi necessária para estabelecer fundamentos de mensuração e análise que orientassem os estudos subsequentes desta tese. O ponto de partida foi o Artigo 1 – *Baseline AutoSim*, conduzido em ambiente controlado/simulado no setor automotivo, que teve como problemática central a ausência de protocolos padronizados para validação de novos projetos de manufatura. Em contextos industriais, processos de validação são frequentemente fragmentados e dependentes da experiência de especialistas, o que compromete comparabilidade, eficiência e replicabilidade dos resultados.

As principais necessidades identificadas concentraram-se na criação de métricas objetivas e replicáveis para avaliar desempenho em tarefas críticas de manufatura, tais como tempo de *setup*, acurácia de execução e retomada pós-falha. A falta de critérios uniformes dificultava a avaliação comparativa entre operadores, células produtivas e cenários simulados de novos projetos. Esse problema metodológico comprometia a possibilidade de generalizar aprendizados e, sobretudo, de integrar indicadores operacionais com dimensões organizacionais e de experiência do usuário.

Os desafios enfrentados estavam ligados a três dimensões principais. No campo técnico, havia a necessidade de simular um ambiente suficientemente representativo das condições industriais, mas com controle adequado das variáveis experimentais. No campo organizacional, identificou-se a dificuldade de alinhar critérios objetivos de validação com rotinas produtivas já estabelecidas. No campo metodológico, a ausência de um protocolo de referência exigia desenvolver instrumentos de coleta e análise que fossem ao mesmo tempo rigorosos e aplicáveis em estudos posteriores com artefatos de realidade aumentada.

Diante desse cenário, o objetivo do *Baseline AutoSim* foi construir um protocolo experimental que consolidasse requisitos técnico-organizacionais, definisse indicadores chave de desempenho (KPIs) e estabelecesse trilhas de auditoria confiáveis para processos de validação de projetos. Pretendia-se, assim, estruturar uma base comparável que pudesse ser replicada em diferentes contextos produtivos, tanto em ambientes simulados, quanto em situações reais com aplicação de tecnologias digitais emergentes.

Os materiais utilizados incluíram softwares de simulação de células de manufatura, modelos tridimensionais de componentes automotivos, dispositivos de controle para registro de tempo de execução e formulários estruturados para avaliação por especialistas. Esses recursos foram selecionados de modo a permitir medições objetivas, coleta de *feedback* qualitativo e integração entre dados observacionais e métricas quantitativas.

Os materiais e métodos utilizados no *Baseline AutoSim* consistiram em modelagem e simulação computacional, com foco na representação detalhada de uma célula robótica e das operações de montagem em ambiente virtual e real. Essa abordagem possibilitou a análise sistemática de cenários produtivos distintos e a avaliação do impacto de melhorias propostas com base em parâmetros objetivos de desempenho. A fidelidade da modelagem foi assegurada por meio de validação com dados coletados diretamente da célula física e reforço da confiabilidade do estudo.

A simulação foi conduzida no software *CoppeliaSim* 4.0.0, com os módulos de dinâmica e de programação em Lua habilitados. O *layout* da célula robótica foi modelado a partir de medições do ambiente físico, para garantir correspondência entre dimensões, suportes e zonas de trabalho. Para definir a trajetória do robô, foram estabelecidos pontos de referência, designados como *Home*, *P1*, *P2*, *P3* e *P4*, que estruturaram o ciclo de manipulação. Os tempos de operação foram registrados por cronometragem manual em oito ciclos por movimento, e os dados foram validados estatisticamente por média e desvio padrão.

Com o objetivo de padronizar a validação de novos processos de manufatura, foram definidas dez etapas sequenciais, que abrangeram desde a verificação inicial dos parâmetros de operação até a validação final em ambiente real. Entre essas etapas destacam-se: seleção do modelo robótico no *CoppeliaSim*, posicionamento na célula virtual, atribuição das variáveis de carga, alcance e fixação, simulação das trajetórias, checagem de colisões, geração e pós-processamento do programa em linguagem ISO, e, por fim, execução controlada no robô real. Essa sistematização assegurou reprodutibilidade e mitigação de riscos durante a fase de testes.

Do ponto de vista da cinemática da célula, foi fundamental a definição do *Tool Center Point (TCP)*, que estabelece a distância entre o flange do sexto eixo do robô e a extremidade da ferramenta. No ambiente virtual, o TCP foi configurado por meio do

recurso *Dummy*, com sua integração ao modelo do robô para assegurar coerência entre movimentos simulados e reais. Parâmetros como massa, momento de inércia e orientação foram especificados de acordo com a geometria e as propriedades do objeto manipulado, o que assegurou realismo dinâmico à simulação.

Uma vez concluída a programação virtual, as trajetórias foram validadas quanto à ausência de colisões, convertidas em comandos ISO e transferidas para o controlador físico do robô. Essa transição do ambiente simulado para o real foi acompanhada por testes controlados, nos quais a velocidade de eixos foi reduzida como medida de segurança inicial. Após a validação bem-sucedida, a célula foi liberada para operação, o que confirmou a efetividade do protocolo proposto.

O método, portanto, consolidou-se em cinco macro etapas inspiradas no ciclo do DSR: (i) identificação do problema (ausência de protocolos comparáveis), (ii) definição de requisitos (KPIs e variáveis), (iii) concepção do artefato (protocolo experimental), (iv) demonstração em ambiente simulado e (v) avaliação por métricas quantitativas e validação qualitativa. Embora o artigo não declare formalmente a adoção da DSR, a lógica aplicada é plenamente convergente com seus princípios e oferece consistência teórica ao processo.

A triangulação de evidências foi assegurada pela combinação de três perspectivas: registros quantitativos dos KPIs, observações diretas dos experimentos e avaliações de especialistas. Essa integração reduziu vieses individuais e garantiu maior precisão ao processo de validação. O resultado metodológico foi a consolidação de um conjunto de indicadores comparáveis e de um protocolo padronizado que, além de resolver a lacuna identificada, constituiu a base para os estudos posteriores com realidade aumentada.

A correspondência entre os ambientes de análise pode ser observada na Figura 3 que apresenta, à esquerda, a célula robótica utilizada no experimento real, e, à direita, sua representação virtual, modelada no software de simulação. A comparação evidencia a equivalência geométrica entre *layout*, alcances operacionais e zonas de trabalho, condição essencial para garantir a transferibilidade dos resultados obtidos no ambiente simulado para a célula física e, conseqüentemente, para a validação do protocolo *Baseline AutoSim*.

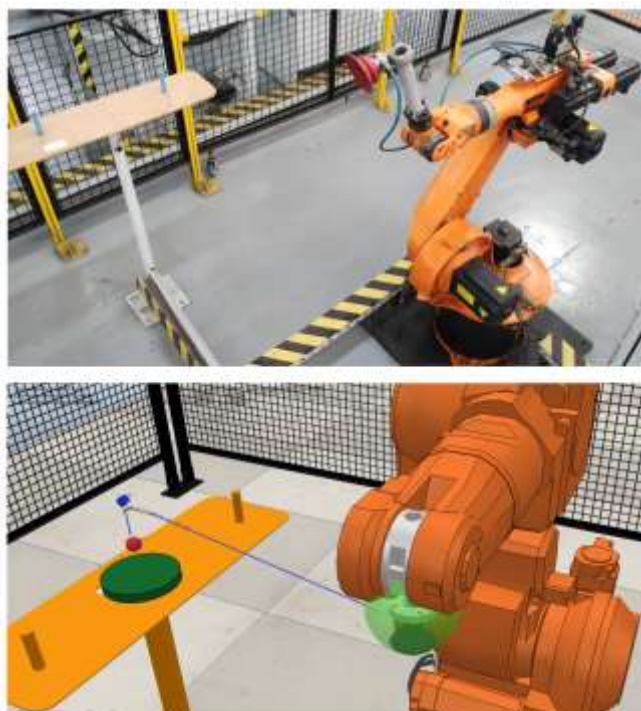


Figura 3 – Robô em ambiente real e simulado para comparação experimental

Fonte: Autores (2025)

Desta forma, o Artigo 1 – *Baseline AutoSim* cumpriu papel fundacional na tese, pois estabeleceu os parâmetros de referência que orientam tanto as análises intracaso, quanto as comparações intercaso. Sua contribuição metodológica viabiliza interpretar, em etapas seguintes, os efeitos da realidade aumentada sob lentes consistentes e comparáveis, assegura alinhamento com as dimensões das CDs e com os pilares da Indústria 5.0, conforme apresentado no APÊNDICE A.

3.4 Artigo 2 – ARomaticLens – desenvolvimento baseado no DSR

O *ARomaticLens* foi desenvolvido para identificar, classificar e instruir 18 ervas aromáticas em ambiente de atacado alimentício sob restrição de conectividade. O método DSR estruturou o projeto em cinco fases iterativas: (i) diagnóstico em campo (CEAGESP), (ii) definição de requisitos junto aos especialistas, (iii) desenho e desenvolvimento do artefato, (iv) demonstração e (v) avaliação e validação.

No diagnóstico, observaram-se alta variabilidade morfológica intraespécies e interespcies, iluminação heterogênea, múltiplos objetos no quadro, dependência de material impresso e conectividade limitada. Esses achados delimitaram o problema:

prover reconhecimento via dispositivos moveis com a utilização de sobreposição informacional em tempo real, sem dependência de serviços em nuvem.

Os requisitos funcionais e não funcionais priorizaram base local de imagens rotuladas com 600 imagens, latência de reconhecimento com 2s para casos de alta qualidade, tolerância à variação de iluminação e foco, operação *offline*, interface com legibilidade imediata no ponto de uso. Requisitos informacionais incluíram taxonomias alinhadas à prática do usuário: família botânica, grupos químicos, parâmetros de secagem (tempo/temperatura) e usos culinários.

A arquitetura da solução adotou *Unity* 2022.3 (motor gráfico, UI, compilação Android) e *Vuforia* 10.6 (rastreamento por alvos de imagem, *feature tracking*, *plane detection*), com banco local embarcado. A modelagem de dados contemplou metadados por espécie (ID, nome científico, família, grupo químico, parâmetros de secagem, usos), versão do *dataset* e controles de integridade. Padrões de usabilidade definiram contraste mínimo, hierarquia tipográfica, densidade informacional por tela e tempos máximos de transição.

O desenvolvimento integrou 600 imagens de referência (JPG), coletadas em ambientes distintos (feiras, supermercados, CEAGESP). Os *scripts* foram utilizados com a linguagem em C# e implementaram pré-processamento (normalização de tamanho, equalização de histograma quando necessário), *pipeline* de consulta local, acoplamento RA (painéis informativos). O *Vuforia* 10.6 foi configurado com *image targets* otimizados por contraste e pontos característicos; foram habilitados modos de *feature tracking* para suavizar desfoque e reflexos.

O aplicativo foi compilado para *Android* ≥ 8 (API 26), com pacote do APK em 232MB, o que assegurou base de dados local e mídias embarcadas. A política de desempenho definiu taxa de quadros estável e limites de uso de CPU/GPU, com o intuito de não degradar a responsividade. A interface exibiu, após reconhecimento, camadas sobrepostas: espécie identificada, grupo químico (seis grupos), família (*Amaryllidaceae*, *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Lamiaceae*, *Lauraceae*), tempo/temperatura de secagem e usos culinários.

A demonstração em campo verificou o reconhecimento da aplicação sob condições reais. O protocolo de ensaio controlou: distância câmera–alvo, ângulo de incidência, intensidade luminosa e presença de múltiplos objetos. Cada sessão

registrou latência, taxa de acerto por espécie e estabilidade do *overlay*. Erros potenciais foram categorizados (iluminação, foco, oclusão parcial, confusão morfológica) para posterior refinamento do *dataset*.

Na avaliação, especialistas da CEAGESP realizaram testes de uso real. Mediram-se acurácia por espécie (18/18, 100%), latência média <2 s para imagens com maior qualidade, estabilidade *offline* e clareza da interface. Questionário estruturado coletou percepções sobre confiabilidade, velocidade de decisão e substituição de consultas impressas.

A representação funcional do ARomaticLens é apresentada na Figura 4 e evidencia a integração entre captura de imagem, reconhecimento *offline* e sobreposição informacional em realidade aumentada diretamente no ponto de uso. O fluxo demonstra a sequência operacional composta por aquisição visual, consulta ao banco local, classificação e exibição de metadados estruturados, o que caracteriza o mecanismo que sustenta a identificação de ervas aromáticas sob condições variáveis de iluminação, múltiplos objetos e ausência de conectividade.



Figura 4 – Fluxo operacional do ARomaticLens

Fonte: Fernandes *et al.* (2023)

A aprendizagem que envolve o DSR conduziu a duas iterações de melhoria: (i) enriquecimento do *dataset* com ângulos e condições de luz sub-representados e (ii) inclusão de um guia de captura na UI (distância sugerida, centralização do alvo, aviso de baixa iluminação). Essas mudanças reduziram latência em cenários-limite e mitigaram falsos negativos ocasionais. O emprego do DSR assegurou encadeamento lógico entre problema, requisitos, construção, demonstração e avaliação, com métricas objetivas e evidências em campo.

Sob a ótica das CDs, o *ARomaticLens* operacionalizou *Sense*, ao reduzir incerteza perceptiva via reconhecimento visual confiável; *Seize*, ao mobilizar RA *offline*

e curadoria local para decisão imediata; *Transform*, ao substituir fluxos impressos por camadas digitais auditáveis.

No enquadramento da Indústria 5.0, os resultados alinham-se aos pilares humanocêntrico, sustentabilidade e resiliência. O primeiro reflete o apoio cognitivo direto ao operador, com legibilidade aprimorada e tomada de decisão mais segura no ponto de uso. O segundo expressa a adaptação funcional do sistema a diferentes condições de operação e a perfis de usuário, com a redução de erros e retrabalho. Já o terceiro demonstra a transformação estrutural dos fluxos operacionais, com substituição de práticas manuais por processos digitais auditáveis e maior integração entre pessoas e tecnologias, conforme o apresentado no APÊNDICE B.

3.5 Artigo 3- *ARTechGuide* – desenvolvimento baseado no DSR

O *ARTechGuide* foi desenvolvido para apoiar operadores em ambiente fabril no treinamento e na execução de *setups* críticos em máquinas de inserção pneumática, no contexto de uma multinacional do setor de autopeças. O método DSR norteou a criação do artefato em cinco fases: (i) diagnóstico em campo, (ii) definição de requisitos, (iii) desenho e desenvolvimento, (iv) demonstração em ambiente fabril e (v) avaliação e validação junto aos especialistas. Esse encadeamento garantiu que cada iteração fosse auditável e sustentada por métricas quantitativas e qualitativas.

No diagnóstico, foram identificados gargalos relacionados ao tempo de *setup* (média de 8,9 minutos), alta dependência de manuais impressos, ausência de padronização na execução e elevado número de solicitações de auxílio entre operadores. O contexto fabril apresentava requisitos de padronização e rastreabilidade de falhas e segurança, aspectos críticos para validar uma solução digital.

Os requisitos definidos priorizaram (i) instruções digitais em sobreposição por RA com clareza e ergonomia, (ii) latência inferior a 1 segundo para carregamento das camadas informativas, (iii) suporte a cenários críticos pré-definidos (ex.: falhas de sensor, falha pneumática, perda de alinhamento), (iv) operação em dispositivos móveis *Android* ≥ 9 (API 28) com câmeras integradas e (v) integração com protocolos de rastreabilidade internos da empresa. Requisitos informacionais incluíram exibição sequencial passo a passo e multimídia (texto, imagem, vídeo curto).

A arquitetura da solução utilizou *Unity* 2022.3 para modelagem das interfaces, *Vuforia* 10.8 para rastreamento de alvos (*QR Codes* e *image targets*), e *scripts* em *C#* para controle da lógica de navegação e integração multimodal. O banco local armazenou instruções, parâmetros de falha e material visual com a eliminação de dependência de rede.

O desenvolvimento contemplou (i) geração de painéis multimídia em *Unity*, (ii) codificação em *C#* para sincronização entre instruções visuais e contexto detectado e (iii) integração de métricas de uso (tempo por etapa, número de repetições, falhas de execução). O *Vuforia* foi configurado para leitura de *QR Codes* impressos acoplados aos pontos de setup, *com disparo da* exibição de camadas instrutivas.

A demonstração ocorreu em ambiente fabril real, durante 15 dias de uso, com 4 operadores de diferentes níveis de experiência. O protocolo de avaliação controlou (i) tempo de *setup*, (ii) número de falhas na execução, (iii) número de solicitações de auxílio e (iv) clareza percebida pelos operadores. Em paralelo, especialistas avaliaram ergonomia, padronização e confiabilidade das instruções digitais.

Na avaliação, os resultados quantitativos mostraram redução de 57% no tempo de *setup* (de 8,9 min para 3,8 min), aumento de 25% na acurácia de execução e redução de 75% nas solicitações de ajuda. A clareza e a aergonomia da interface obtiveram média 9,25/10 (escala UX) e 4,5/5 (ergonomia), o que confirma ganhos em padronização e eficiência. O sistema registrou ainda retomada de falhas 71% mais rápida em cinco cenários críticos de operação.

A Figura 5 apresenta a interface do *ARTechGuide* exibida durante o suporte ao *setup* em máquina de inserção pneumática. A tela mostra sobreposições instrutivas acionadas por *QR Code*, com indicação visual das etapas a serem executadas, ícones multimodais, marcadores de risco operacional e instruções sequenciais. Essa interface caracteriza o modo de entrega da informação em realidade aumentada, organizada para reduzir incertezas durante o *setup*, padronizar procedimentos e agilizar a tomada de decisão pelo operador em ambiente fabril.



Figura 5 – Interface instrutiva do *ARTechGuide*

Fonte: Adaptado de Lopes *et al.* (2025a)

Sob a ótica das CDs, o *ARTechGuide* expressou *Sense* na detecção antecipada de falhas e riscos operacionais por meio de instruções visuais contextuais, *Seize* na mobilização de RA multimodal para acelerar *setup*, para reduzir erros e otimizar a resposta a falhas e *Transform* na substituição de fluxos impressos por fluxos digitais auditáveis, o que consolida práticas de padronização fabril.

No enquadramento da Indústria 5.0, os resultados alinham-se aos pilares humanocêntrico, sustentabilidade e resiliência. O primeiro manifesta-se no suporte instrucional contextualizado, que reduz incertezas operacionais e aprimora a interação homem-máquina. O segundo reflete o ajuste do conteúdo às necessidades específicas dos operadores, ajusta instruções conforme o perfil de uso e o cenário fabril. Já o terceiro evidencia a transformação dos fluxos de conhecimento, com a substituição de manuais impressos por rotinas digitais integradas, promove padronização e resposta ágil diante de falhas críticas.

O processo conduzido pelo DSR assegurou que cada etapa, desde a identificação do problema até a validação em ambiente fabril, fosse sustentada por métricas objetivas e *feedback* qualitativo. O artefato consolidou-se como uma solução replicável, passível de expansão a outros setores e máquinas, e forneceu um *baseline* fabril para comparação direta com contextos não controlados (como a CEAGESP), conforme apresentado no APÊNDICE D.

3.6 Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

O Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi empregado para validar o *framework* RA, I5.0 e CDs, o que atende ao Objetivo Específico 6, que consiste em verificar, por meio de julgamento especializado multicritério, a relevância e a coerência das dimensões Núcleo Tecnológico, Indústria 5.0, Capacidades Dinâmicas e Contexto em ambientes controlados e não controlados.

Participaram da avaliação três especialistas com ampla experiência em manufatura avançada e tecnologias imersivas. O primeiro atua como Engenheiro de Produto em desenvolvimento de novos produtos com uso intensivo de XR/VR/AR. O segundo é Engenheiro de Processos Sênior em Produção Digital, responsável por simulação e digitalização de processos industriais. O terceiro é Engenheiro de Processos em Planejamento e Projeto Mecânico de Dispositivos e Simulação de células automatizadas.

As entrevistas foram conduzidas em etapas sequenciais. Inicialmente cada especialista recebeu uma apresentação detalhada da tese, do *framework* e dos artefatos *AutoSim*, *ARomaticLens* e *ARTechGuide*. Em seguida, respondeu-se a um questionário com questões abertas para caracterização do perfil e compreensão do modelo. Posteriormente, preencheram-se as matrizes AHP e concluiu-se o processo com questões abertas e fechadas sobre a aderência e a utilidade do *framework*.

O AHP é um método multicritério de apoio à decisão, desenvolvido por Thomas L. Saaty (1980) e utilizado em contextos científicos e industriais para priorização, seleção e validação de alternativas sob múltiplos critérios. Sua estrutura hierárquica permite que fatores quantitativos e qualitativos sejam integrados em um mesmo processo analítico, o que transforma julgamentos subjetivos de especialistas em pesos objetivos e mensuráveis (SAATY, 1980).

O método é composto por três elementos principais: (i) definição do objetivo central, (ii) estruturação hierárquica dos critérios e subcritérios e (iii) comparação paritária entre os elementos. A partir dessas comparações, são calculados os pesos

relativos e a consistência das respostas, para garantir-se racionalidade e coerência no processo decisório (SAATY, 2008).

A fundamentação e a utilidade do método AHP aplicada à tese parte do princípio de que decisões complexas podem ser decompostas em partes menores e comparáveis entre si (MARDANI *et al.*, 2015).

A escala fundamental de Saaty (1980) é a base das comparações par a par e é estudada conforme a intensidade de importância. Cada par de critérios é avaliado com base em uma escala fundamental (Tabela 1), na qual o valor 1 representa igual importância entre os elementos e 9 indica importância extrema de um sobre o outro. Valores fracionários, como $1/3$ ou $1/5$, indicam que o primeiro critério é, respectivamente, “um pouco menos importante” ou “muito menos importante” que o segundo. Essa escala é a base para a construção das matrizes de comparação, que refletem a percepção de prioridade dos especialistas (SAATY, 1980; VARGAS, 1990; ESHTAIWIA *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Escala fundamental de Saaty (1980)

Intensidade	Definição verbal	Recíproco
1	Mesma importância	1
3	Moderadamente mais importante	$1/3$
5	Fortemente mais importante	$1/5$
7	Muito fortemente mais importante	$1/7$
9	Extremamente mais importante	$1/9$

Fonte: Adaptado de SAATY, 1980

Por exemplo, se um especialista considera que o pilar humanocêntrico é “muito mais importante” que o pilar tecnológico, atribui o valor 7. Em contrapartida, a célula oposta da matriz receberá automaticamente $1/7$, o que assegura reciprocidade e coerência matemática. Essa relação recíproca é o que torna o método auto consistente e simétrico, é o que permite que cada julgamento humano seja espelhado matematicamente (SAATY, 1980; VARGAS, 1990).

O AHP é amplamente aceito em pesquisas de engenharia, administração e inovação por oferecer transparência, reprodutibilidade e rastreabilidade. Sua aplicação reduz a subjetividade inerente à avaliação humana, uma vez que cada julgamento é

matematicamente equilibrado por seu recíproco, e a consistência das respostas é verificada pelo Índice de Consistência (IC) e pela Razão de Consistência (CR). Caso o valor de CR seja menor ou igual a 0,10, os julgamentos são considerados coerentes e válidos (SAATY, 1980).

O AHP é não apenas uma ferramenta de priorização. É também um mecanismo de validação científica que assegura integridade e lógica ao raciocínio decisório. Os cálculos e consistência dos julgamentos no método AHP segue sete etapas principais para obter os valores numéricos com base nos julgamentos qualitativos (AL-HARBI, 2001).

Na etapa 1 o avaliador compara dois critérios por vez e responde às perguntas: (i) “Qual dos dois é mais importante?” e (ii) em que intensidade?”. As comparações são feitas com base na escala de Saaty (1–9). Valores inversos (1/3, 1/5, 1/7) são usados quando o segundo critério é mais importante que o primeiro. Essa reciprocidade assegura consistência e simetria na matriz de decisão (SAATY, 1980).

Na etapa 2, é realizada a construção da matriz de comparação entre os critérios, organizadas em uma matriz quadrada de ordem n . Nela, n representa o número de critérios avaliados. Cada elemento a_{ij} da matriz representa o julgamento da importância do critério i em relação ao critério j , de modo que a relação é definida conforme a Equação (3.6.1).

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \text{ e } a_{ii} = 1 \quad (3.6.1)$$

Assim, a diagonal principal sempre contém o valor 1 (pois cada critério é igualmente importante em relação a si mesmo), e a metade inferior da matriz contém os inversos das comparações da metade superior. Esse formato garante a consistência estrutural e reduz a redundância de julgamentos necessários, uma das razões pelas quais o AHP é adotado em avaliações complexas (SAATY, 2008; MARDANI *et al.*, 2015).

Na etapa 3, é realizada a normalização da matriz; após preenchida, a matriz é normalizada para que os valores de cada critério se tornem proporcionais. Primeiro, soma-se cada coluna da matriz; em seguida, cada elemento é dividido pela soma de sua respectiva coluna, de forma que a soma total de cada coluna seja igual a 1. O

resultado é uma matriz normalizada (A_n), cujas proporções refletem as relações de importância relativas conforme definida na Equação (3.6.2).

$$A_n = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (3.6.2)$$

Essa transformação torna todos os critérios comparáveis; ela elimina diferenças de escala entre os julgamentos e permite que o método avance para o cálculo dos pesos relativos (PEGETTI, 2014; AL-HARBI, 2001).

Na quarta etapa, é realizada a determinação dos pesos relativos. Cada linha da matriz normalizada é então mediada (calculada a média aritmética dos elementos da linha). O resultado dessa média é o peso relativo (w) de cada critério, o que representa sua importância percentual em relação ao objetivo geral. Em termos matemáticos, o peso do critério i é dado pela Equação (3.6.3).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n A_{n_{ij}}}{n} \quad (3.6.3)$$

Esses pesos são posteriormente normalizados novamente para garantir que sua soma total seja igual a 1, para assegurar coerência entre os critérios avaliados.

Na etapa 5, é realizado o cálculo da consistência ($\lambda_{\text{máx}}$, IC e CR). O AHP introduz um teste de consistência para avaliar se o avaliador foi coerente nas comparações realizadas. Para isso, é calculado o autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) da matriz, obtido pelo produto entre a matriz original A e o vetor de pesos w , seguido pela divisão de cada elemento resultante pelo peso correspondente. O valor médio obtido representa o $\lambda_{\text{máx}}$, conforme a Equação (3.6.4).

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(A \cdot w)_i}{w_i} \right)}{n} \quad (3.6.4)$$

Em seguida, calcula-se o Índice de Consistência (IC), que é dado pela Equação (3.6.5):

$$IC = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n - 1)} \quad (3.6.5)$$

Por fim, verifica-se a Razão de Consistência (CR), que averigua a coerência dos julgamentos, conforme a Equação (3.6.6).

$$CR = \frac{IC}{IR} \quad (3.6.6)$$

O IR é o índice randômico definido por Saaty (1980), cujo valor depende da dimensão da matriz (por exemplo, para uma matriz 4×4, IR = 0,90). De acordo com os autores, os julgamentos são considerados consistentes quando $CR \leq 0,10$ (10%), o que assegura confiabilidade no processo decisório (SAATY, 1980; SAATY, 2008; AL-HARBI, 2001).

Na etapa 6, é realizada a consolidação e a validação dos julgamentos. Quando há mais de um especialista, o AHP propõe a agregação geométrica das opiniões individuais para formar um resultado consolidado. Nesse caso, os pesos de cada critério atribuídos pelos avaliadores são combinados pela média geométrica, conforme a Equação (3.6.7).

$$W_i = \sqrt[k]{w_{i1} \times w_{i2} \times \dots \times w_{ik}} \quad (3.6.7)$$

Como mostrado na fórmula (3.6.7), a média geométrica dos pesos atribuídos pelos avaliadores é utilizada para consolidar as opiniões individuais. k representa o número de avaliadores. Após a agregação, os pesos consolidados são novamente normalizados e comparados, o que permite a análise conjunta e a verificação de concordância interavaliador. Nesta pesquisa, essa concordância é medida pelo coeficiente de correlação de *Spearman* (ρ), considerado satisfatório quando $\rho \geq 0,70$, conforme recomendações metodológicas para validações multicritério (MARDANI *et al.*, 2015; ESHTAIWIA *et al.*, 2017).

Na sétima etapa, é realizada a interpretação e a síntese dos resultados. O vetor final de pesos revela a prioridade relativa de cada dimensão do *framework* RA, I5.0, CDs e ambiente controlado e não controlado. Assim, os critérios com maiores pesos

representam os pilares mais determinantes para a transformação digital analisada, enquanto os de menor peso indicam dimensões secundárias. Os resultados são então interpretados à luz dos pilares da Indústria 5.0 humanocentrismo, sustentabilidade e resiliência e das CDs *Sense*, *Seize* e *Transform*, o que permite mensurar quantitativamente a maturidade digital promovida pela RA em ambientes controlados e não controlados (SAATY, 2008; TEECE, PISANO, SHUEN, 1997; PITELIS, TEECE, YANG, 2024; EUROPEAN COMMISSION, 2021).

Após a construção das matrizes de comparação, o AHP calcula os pesos relativos por meio da normalização e da média dos valores de cada linha. Para verificar a consistência dos julgamentos, são utilizados o Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (CR), cujas expressões matemáticas foram apresentadas nas fórmulas (3.6.5) e (3.6.6), respectivamente:

- O IC é dado pela fórmula $(\lambda_{\text{máx}} - n)/(n - 1)$, onde $\lambda_{\text{máx}}$ é o maior autovalor da matriz e n é a ordem da matriz (número de critérios).
- A Razão de Consistência (CR) é calculada na divisão do Índice de Consistência (IC) pelo Índice Randômico (IR); o IR é definido por Saaty (1980) e varia conforme o número de critérios, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Índice Randômico (IR) de Saaty (1980)

n	3	4	5	6	7	8	9
IR	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: Adaptado de SAATY, 1980

De acordo com Saaty (1980), os julgamentos são considerados consistentes quando $CR \leq 0,10$ (10%). Essa verificação assegura que o avaliador manteve coerência lógica entre as comparações realizadas, e o fato torna o método confiável e matematicamente válido (AL-HARBI, 2001).

O AHP é aplicado nesta pesquisa para validar o framework de RA e as CDs em convergência com os pilares da I5.0 humanocentrismo, sustentabilidade e resiliência. O método quantifica a coerência e a prioridade entre as dimensões tecnológica, humana e estratégica (*Sense*, *Seize* e *Transform*) em dois contextos de experimentação: ambiente controlado e não controlado (SAATY, 2008).

O estudo foi estruturado sobre os resultados acumulados de três artigos-base: *AutoSIM* (*framework baseline* para integração digital e IoT em manufatura), *ARTechGuide* (validação empírica em realidade aumentada aplicada à manufatura) e *ARMaps/CEAGESP* (aplicação em logística e ambiente aberto). Essa sequência garantiu continuidade metodológica e sustentação teórico-prática entre os experimentos (TEECE, 2007; SAATY, 2008; EUROPEAN COMMISSION, 2021).

O objetivo central da hierarquia é identificar quais dimensões do *framework* contribuem mais intensamente para a transformação digital promovida pela RA, com a consideração das relações entre desempenho tecnológico, percepção humana e impacto sustentável. Essa estrutura assegura aderência teórica às diretrizes da I5.0 da Comissão Europeia (2021) e coerência metodológica com o modelo de CDs (TEECE, 2007; PITELIS; TEECE; YANG, 2024; EUROPEAN COMMISSION, 2021).

Durante a aplicação, dois especialistas com mais de 10 anos de experiência em Indústria 4.0/5.0 e RA/IoT realizaram comparações par a par entre os critérios do *framework* (ex.: “Humanocêntrico é mais importante que Tecnológico?”). As respostas foram processadas em uma planilha AHP automatizada, que gerou os pesos relativos, *rankings* e índices de consistência (CR). A concordância interavaliador foi avaliada pelo coeficiente de Kendall ($W \geq 0,70$), o que garantiu robustez estatística (PEGETTI, 2014; MARDANI *et al.*, 2015).

O método traduz julgamentos qualitativos em medidas quantitativas, substitui avaliações subjetivas por critérios auditáveis e reproduzíveis. Dessa forma, o AHP evidencia a interação entre tecnologia, pessoas e sustentabilidade. Ele permite comparar o comportamento do *framework* em condições que envolvem ambiente controlado e não controlado (ESHTAIWIA *et al.*, 2017; SAATY, 2008).

4 RESULTADOS

Este capítulo apresentou a integração entre os resultados empíricos, a fundamentação teórica e os princípios metodológicos que estruturaram o desenvolvimento dos artefatos de RA sob a lente das CDs. A análise foi conduzida com o propósito de demonstrar a evolução entre os experimentos realizados e consolidar um *framework* aplicável e validável para mensurar a transformação digital em ambientes controlados e não controlados.

A investigação adotou o delineamento de estudo de caso múltiplo, sustentado pelo método DSR. Essa abordagem permitiu compreender o comportamento integrado entre sistemas digitais e operadores humanos em contextos produtivos contrastantes, a partir da lógica *Sense, Seize, Transform*.

Cada artefato *AutoSim*, *ARomaticLens* e *ARTechGuide* representou uma etapa incremental do modelo; avançaram da simulação técnica para a aplicação prática e validaram empiricamente os mecanismos de percepção, decisão e reconfiguração sustentáveis. Os resultados foram interpretados em duas camadas analíticas complementares:

- Intracaso: análises individuais em cada cenário experimental, com a consideração de indicadores de desempenho técnico, métricas de latência e precisão e resultados qualitativos de usabilidade e experiência do usuário (UX);
- Intercaso: comparação cruzada entre os ambientes controlado e não controlado, com a utilização de métricas homogêneas de tempo de *setup*, taxa de erro, latência de RA, aderência a padrões operacionais e índices SUS e UEQ.

Essa estrutura analítica garantiu coerência entre teoria e prática. Ela permitiu identificar como a integração entre RA e CDs potencializou os pilares da Indústria 5.0, Humanocentrismo, Sustentabilidade e Resiliência, em diferentes estágios de maturidade digital. As seções subsequentes detalharam os resultados específicos de cada caso e culminaram na formulação e na validação do framework que sintetizou as relações observadas entre as dimensões tecnológicas, humanas e organizacionais.

4.1 Resultados do Artigo 1 - *Baseline AutoSim*

Os resultados obtidos decorrem do protocolo metodológico descrito em 3.3 e asseguram correspondência entre simulação virtual, pós-processamento e validação no ambiente real. A célula robótica foi modelada no *CoppeliaSim* 4.0.0, com definição do ponto de ferramenta (TCP), pontos de referência (*Home*, *P1–P4*) e verificação de colisões. O programa foi desenvolvido em *Lua* e convertido para *KUKA Robot Language* (KRL), com a garantia de compatibilidade com o robô físico. Esse encadeamento permitiu rastreabilidade entre etapas e análise precisa dos efeitos sobre o tempo de ciclo.

A cronoanálise foi realizada em três trechos principais: *Home* para Suporte 1, Suporte 1 para Suporte 2 e Suporte 2 para *Home*. Cada movimento foi repetido oito vezes, o que gerou valores médios que serviram como base comparativa entre o processo inicial e o otimizado. Esse procedimento possibilitou identificar, de forma segmentada, pontos em que ajustes de trajetória e velocidade poderiam reduzir o tempo total, sem comprometer segurança ou alcance do robô.

No cenário de referência, os tempos médios foram 3,03s, 5,87s e 2,50s, respectivamente, em um total de 11,40s por ciclo. Esses valores constituem o *baseline* temporal, utilizado como linha de base para comparações internas e futuras análises intracaso e intercaso. Esse marco representa a configuração inicial da célula e estabelece o parâmetro sobre o qual ganhos incrementais são avaliados.

A otimização incluiu ajustes de pontos intermediários, suavização de trajetórias e revisão de limites de velocidade e aceleração nas restrições cinemáticas. Os tempos resultantes após simulação foram 2,80s, 4,74s e 2,98s, com total de 10,52s. A redução absoluta de 0,88s corresponde a 7,72% em relação ao *baseline*. A distribuição dos ganhos foi heterogênea; indicou maior impacto no deslocamento entre os suportes.

A verificação de colisões apresentou inexistência de interferências no cenário otimizado, tanto na simulação, quanto na execução real. Esse resultado está associado à parametrização correta do TCP, ao uso de cinemática inversa e à configuração das propriedades dos objetos no simulador. A ausência de colisões possibilitou a transferência direta do programa pós-processado e dispensou o retrabalho estrutural.

A transição virtual para o real foi conduzida com redução preventiva de velocidade e com uso de rotinas de segurança, o que assegura confiabilidade no

comissionamento. A equivalência entre trajetórias simuladas e reais confirma a robustez do fluxo de desenvolvimento e demonstra que a integração virtual antecipou riscos e reduziu ajustes posteriores. Os cenários onde foram obtidos os resultados podem ser observados na Figura 6.



Figura 6 - Célula real x célula virtual

Fonte: Adaptado de LOPES *et al.* (2025b)

Sob a perspectiva das CDs, os resultados evidenciam um processo de aprendizagem e adaptação contínua. O *Sense* ocorreu na identificação prévia de gargalos e riscos, apoiado pela cronoanálise e a simulação. O *Seize* manifestou-se na mobilização de recursos digitais para otimizar trajetórias, redistribuir tempos e obter redução de 7,72% no ciclo. O *Transform* materializou-se na integração do modelo virtual ao real, reconfigurou a célula sem comprometer estabilidade. O *baseline*, portanto, não é apenas um conjunto de métricas, mas a aplicação prática do arcabouço *Sense–Seize–Transform* em ambiente produtivo.

Em paralelo, os resultados obtidos no *Baseline AutoSim* podem ser associados aos pilares centrais da Indústria 5.0. O pilar humanocêntrico manifesta-se na eliminação de colisões e na confiabilidade da trajetória robótica; garante segurança operacional e interação previsível entre operador e robô. A hiperpersonalização reflete-se no ajuste dinâmico de trajetórias e velocidades de acordo com a geometria e os limites cinemáticos da célula. Otimiza o desempenho sem comprometer a integridade do processo. Já o pilar da transformação evidencia-se na integração estável entre os ambientes virtual e real, consolida a digitalização do fluxo de validação e cria uma base comparável para futuras implementações com a RA. Assim, o *AutoSim* estabelece um marco metodológico e tecnológico que fundamenta a análise dos ganhos incrementais nas aplicações subsequentes desta tese.

Os resultados encontrados respondem à primeira questão norteadora e atende ao primeiro objetivo específico da tese, confirma a redução global do ciclo, a eliminação de colisões. A equivalência entre simulação e execução estabelece um *baseline* confiável para análises posteriores. Os indicadores servirão como métrica de comparação para avaliar os ganhos adicionais provenientes das aplicações de RA.

As limitações concentram-se na dependência de um layout específico e na ausência de modelagem de variáveis ambientais, como temperatura, umidade e falhas de sensores. Os resultados foram obtidos em uma célula robótica particular, o que restringe a generalização imediata. Entretanto, tais restrições não comprometem a continuidade da pesquisa, pois o objetivo central deste estudo foi estabelecer um *baseline* comparativo, válido para as análises intracaso e intercaso que estruturam os capítulos seguintes da tese.

Para consolidar os resultados, o Quadro 5 sintetiza os principais resultados do *Baseline AutoSim*. Ele os relaciona às dimensões das CDs e aos pilares da Indústria 5.0. A sistematização amplia a análise, transforma dados em elementos comparáveis, que servirão como referência metodológica para os capítulos seguintes e como ponto de partida para a comparação intracaso e intercaso.

Quadro 5 - Resultados do *Baseline AutoSim* no enquadramento das CDs e da Indústria 5.0

Eixo (Indústria 5.0)	Dimensão (CD)	Indicadores Operacionais	Indicadores UX	Indicadores Organizacionais
Humanocêntrico	<i>Sense</i>	Cronoanálise segmentada; identificação de gargalos e riscos	Clareza no mapeamento de trajetórias	Maior segurança e redução de colisões
Sustentabilidade	<i>Seize</i>	Redução de 7,72% no ciclo (11,40s → 10,52s)	Percepção de eficiência nos ajustes	Otimização de recursos digitais no <i>setup</i> fabril
Resiliência	<i>Transform</i>	Integração simulação–real sem colisões; TCP estável	Confiabilidade na execução final	Reconfiguração da célula fabril e padronização do protocolo

Fonte: Autor (2025)

4.2 Resultados intracaso: CEAGESP (*ARomaticLens*)

O estudo conduzido na Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP) avaliou a aplicação do *ARomaticLens* em ambiente operacional não controlado, caracterizado por variabilidade morfológica das espécies de ervas aromáticas, baixa conectividade de rede e forte dependência de processos impressos. Esse cenário foi selecionado por representar as condições mais críticas da cadeia agroalimentar, em que a confiabilidade na identificação é essencial para reduzir perdas, mitigar erros de classificação e assegurar rastreabilidade.

O artefato, descrito em detalhes metodológicos no APÊNDICE B, foi implementado em dispositivos móveis com *Android* ≥ 8 , que integram *Unity* 2021.3 LTS e *Vuforia* 10.6. O processamento foi realizado em dispositivo móvel, com banco de imagens embarcado, o que garante operação offline mesmo em áreas com interferência eletromagnética. A base de dados incluiu 600 imagens de referência, correspondentes a 18 espécies de ervas, com rotinas de pré-processamento em *C#*, voltadas à robustez em ambientes de iluminação variável.

A avaliação envolveu 12 participantes, todos com mais de cinco anos de experiência na CEAGESP. Os resultados quantitativos mostraram 100% de acurácia na identificação das espécies cadastradas, com latência média de 1,87 segundos, mesmo em condições ambientais instáveis. Esses valores confirmam a viabilidade da operação *offline* em ambientes de baixa infraestrutura.

No plano qualitativo, os usuários atribuíram média 8,7/10 para clareza e confiabilidade da interface. Destacaram ainda maior segurança na classificação, redução na dependência de especialistas e substituição progressiva de registros impressos por digitais. Esses resultados reforçam o papel do *ARomaticLens* como tecnologia de apoio à decisão no ponto de uso.

Sob a ótica das CDs, os dados do APÊNDICE B evidenciam *Sense* na redução de incertezas perceptivas por meio do reconhecimento visual robusto, *Seize* na mobilização de recursos *offline* que asseguraram decisões rápidas e independentes de conectividade e *Transform* na substituição de fluxos impressos por processos digitais auditáveis. A aplicação da validação pode ser observada por meio da Figura 7.



Figura 7 – Avaliação do *ARomaticLens* na CEAGESP

Fonte: Autor (2025)

Para consolidar os resultados do intracaso CEAGESP, o Quadro 6 organiza de forma sistemática os resultados obtidos com o *ARomaticLens*. Ele conecta os indicadores operacionais, de experiência do usuário (UX) e organizacionais às dimensões das CDs e aos pilares da Indústria 5.0. Essa estruturação permite interpretar os ganhos não apenas como métricas isoladas, mas como elementos que expressam a integração entre desempenho técnico, adaptação organizacional e alinhamento estratégico, serve como referência analítica para os capítulos seguintes.

Quadro 6 - Resultados intracaso na CEAGESP (*ARomaticLens*)

Eixo (Indústria 5.0)	Dimensão (CD)	Indicadores Operacionais	Indicadores UX	Indicadores Organizacionais
Humanocêntrico	<i>Sense</i>	100% de acurácia na identificação; latência média <2s; mitigação de incertezas visuais	Clareza e confiabilidade destacadas (média 8,7/10)	Redução da dependência de especialistas; rastreabilidade ampliada
Sustentabilidade	<i>Seize</i>	Operação <i>offline</i> em <i>Android</i> ≥8; estabilidade em baixa conectividade	Percepção de utilidade e redução de esforço decisório	Expansão possível para outros produtos agrícolas
Resiliência	<i>Transform</i>	Aplicação estável em campo mesmo sob variabilidade de iluminação	<i>Feedback</i> positivo sobre replicabilidade e adaptação ao uso real	Reconfiguração gradual de fluxos manuais para digitais auditáveis

Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos no intracaso CEAGESP demonstram que a RA, aplicada em um ambiente não controlado, potencializa a dimensão *Sense* das CDs, ao assegurar maior confiabilidade na detecção de produtos e ao reduzir incertezas operacionais. Demonstram ainda que soluções móveis baseadas em RA permitem *Seize* oportunidades em contextos de restrição tecnológica, por garantir funcionamento estável mesmo em operação offline.

No eixo *Transform*, evidencia-se a substituição de práticas tradicionais impressas por fluxos digitais de classificação, o que resulta digitalização e adaptação contínua dos processos. Essas descobertas confirmam a efetividade do método DSR, visto que cada etapa, desde a identificação do problema até a validação com especialistas, contribuiu de forma sistemática para consolidar o artefato como solução tecnológica robusta.

Os resultados encontrados respondem à segunda questão norteadora, atendem o segundo e o terceiro objetivos específicos da tese, reforçam a escalabilidade organizacional do modelo, cuja lógica de aplicação pode ser replicada em outras feiras, mercados atacadistas e cadeias logísticas agroalimentares, ampliam sua relevância prática e acadêmica.

4.3 Resultados intracaso: multinacional autopeças (ARTechGuide)

O estudo conduzido em uma multinacional do setor de autopeças teve como objetivo validar o artefato *ARTechGuide*, apresentado no subcapítulo 3.5, em ambiente fabril controlado, porém caracterizado por alta complexidade operacional, exigência de padronização e necessidade de minimizar erros em *setups* críticos.

O contexto selecionado foi o de operações de inserção pneumática em linhas de montagem automotiva, cenário em que a confiabilidade do procedimento impacta diretamente a segurança do produto final e a eficiência da produção. A escolha deste ambiente justifica-se pela relevância estratégica de avaliar a RA em tarefas repetitivas de alta precisão, tradicionalmente apoiadas por manuais impressos e instruções verbais de especialistas.

O artefato, descrito em detalhes metodológicos no APÊNDICE D – *ARTechGuide*, foi desenvolvido em *Unity 2021.3 LTS*, integrado ao *Vuforia Engine 10.12*, com *backend* local implementado em *C#* e banco de dados embarcado em dispositivos móveis *Android* ≥ 9 . Diferentemente de soluções em nuvem, a arquitetura

foi projetada para operação *offline*. Ela garante independência de conectividade e segurança na manipulação de dados industriais. As instruções visuais em RA foram sobrepostas em tempo real sobre a área de trabalho do operador, com cinco cenários críticos de *setup* programados para avaliação: troca de ferramentas, calibração de pressões, fixação de componentes, verificação de alinhamento e retomada após falha.

Os testes envolveram 4 operadores durante 15 dias de operação assistida, com coleta sistemática de métricas temporais, acurácia de execução e ocorrências de falhas. O tempo médio de *setup* foi reduzido em 57% (8,9min para 3,8 min), enquanto a acurácia aumentou 25% e as solicitações de ajuda a supervisores diminuíram em 75%. Em casos de falhas simuladas, a retomada do processo foi acelerada em 71%, devido à clareza das instruções audiovisuais. Esses indicadores configuram evidências robustas do potencial da RA em apoiar o desempenho técnico em tarefas de alta repetibilidade e risco operacional.

No plano qualitativo, a interface recebeu média 9,25/10 na escala de Experiência do Usuário (UX) e 4,5/5 em ergonomia, com destaque para clareza dos painéis visuais, compatibilidade com movimentos naturais e redução da sobrecarga cognitiva. Os especialistas apontaram ainda maior padronização dos procedimentos, redução da dependência de manuais impressos e maior segurança no fluxo operacional. Tais aspectos reforçam o papel da RA como tecnologia capaz de consolidar rotinas críticas em um ambiente fabril digitalizado.

Sob a ótica das CDs, conforme detalhado no APÊNDICE D, o *ARTechGuide* evidenciou *Sense*, ao antecipar riscos e reduzir incertezas de execução mediante instruções contextuais precisas; *Seize*, ao mobilizar RA *offline* para acelerar decisões em tempo real; *Transform*, ao reconfigurar fluxos de trabalho com a eliminação de manuais impressos e integração de rotinas digitais replicáveis.

Na perspectiva da Indústria 5.0, os resultados alinham-se ao pilar humanocêntrico, ao oferecer suporte cognitivo direto ao operador por meio de instruções claras, seguras e acessíveis. A hiperpersonalização, ao permitir que o sistema se adapte a diferentes cenários críticos, assegura autonomia na retomada de falhas e na redução de retrabalho e na transformação, ao consolidar fluxos digitais estáveis baseados em arquiteturas locais, ao promover a reconfiguração de processos fabris e o alinhamento às práticas de digitalização industrial. A validação dos

procedimentos pelos especialistas após a utilização do *ARTechGuide* pode ser observada na Figura 8.



Figura 8 – Avaliação do ARTechGuide na multinacional de autopeças

Fonte: Autor (2025)

Os resultados encontrados respondem à segunda questão norteadora e atende o segundo e quarto objetivos específicos da tese. O Quadro 7 organiza de forma analítica os achados, conecta métricas operacionais, perceptivas e organizacionais às dimensões das CDs e aos pilares da Indústria 5.0. Essa abordagem sistemática assegura consistência metodológica e fortalece a base comparativa para a análise intercaso.

Quadro 7 - Resultados intracaso na multinacional automotiva (*ARTechGuide*)

Eixo (Indústria 5.0)	Dimensão (CD)	Indicadores Operacionais	Indicadores UX	Indicadores Organizacionais
Humanocêntrico	<i>Sense</i>	Redução de 57% no <i>setup</i> ; +25% acurácia; –75% pedidos de ajuda	Escala UX média: 9,25/10; ergonomia média 4,5/5	Padronização de procedimentos; maior segurança operacional
Sustentabilidade	<i>Seize</i>	Retomada de falhas acelerada em 71% (5 cenários críticos)	Interface intuitiva; média 4,75/5 em clareza visual	Substituição de manuais físicos; redução de retrabalho
Resiliência	<i>Transform</i>	Fluxo digital consolidado via <i>Unity</i> + <i>Vuforia</i> (offline e local)	Escala <i>Likert</i> média: 4,5/5 em inovação e utilidade	Transformação digital da célula fabril; alinhamento à Indústria 5.0

Fonte: Autor (2025)

4.4 Resultados intercaso (comparação cruzada)

A análise intercaso constitui o elo de integração entre os três estudos que fundamentam esta tese. O *Baseline AutoSim* (3.3; 4.1; Apêndice A) estabeleceu o protocolo metodológico para mensuração e validação em ambiente simulado e controlado, cria um marco temporal e estrutural para comparações futuras. O *ARomaticLens* (3.4; 4.2; Apêndices B e C) testou a robustez da RA em ambiente não controlado (CEAGESP), caracterizado por variabilidade morfológica, restrições de conectividade e práticas manuais. Por fim, o *ARTechGuide* (3.5; 4.3; Apêndices D e E) foi aplicado em ambiente industrial controlado, validou a RA como recurso de padronização e suporte à operação fabril.

Esses três contextos, quando analisados em conjunto, permitem verificar a consistência da estrutura metodológica baseada em DSR, pois cada caso representa uma etapa complementar do ciclo: do protocolo de base (*AutoSim*), à validação em campo aberto (*ARomaticLens*), até a aplicação em ambiente fabril crítico (*ARTechGuide*). Assim, os apêndices documentam a rastreabilidade completa entre conceito, desenvolvimento, teste e validação, asseguram que os resultados intercaso sejam derivados de uma sequência lógica e não de estudos isolados.

Sob a ótica das CDs a convergência entre os três casos evidencia a operacionalização das dimensões *Sense*, *Seize* e *Transform* em diferentes condições ambientais. O *Sense* manifestou-se na antecipação de incertezas: *AutoSim* identificou gargalos e riscos de colisão na simulação; *ARomaticLens* reduziu incertezas perceptivas na classificação de ervas em condições adversas; *ARTechGuide* aprimorou a clareza de instruções em *setups* críticos.

O *Seize* foi expresso pela mobilização de recursos tecnológicos em diferentes níveis: simulação digital para ajustes de trajetória (*AutoSim*), operação *offline* em dispositivos móveis para decisão no ponto de venda (*ARomaticLens*) e sobreposição de instruções visuais para *setup* fabril (*ARTechGuide*). Por fim, o *Transform* configurou-se na reconfiguração dos processos: validação digital replicável (*AutoSim*), substituição progressiva de impressos por fluxos digitais (*ARomaticLens*) e consolidação de rotinas padronizadas de *setup* em ambiente fabril (*ARTechGuide*).

Na perspectiva da Indústria 5.0, os resultados demonstram alinhamento direto com os pilares humanocêntrico, hiperpersonalização e transformação. O pilar humanocêntrico emerge do suporte cognitivo e da interação segura entre pessoas e sistemas: clareza da interface no *ARomaticLens* (8,7/10), ergonomia e previsibilidade das instruções no *ARTechGuide* (9,25/10) e estabilidade de trajetória observada no *AutoSim*.

A hiperpersonalização manifesta-se na adaptação contextual dos artefatos às condições de uso desde o reconhecimento visual robusto em diferentes iluminações no *ARomaticLens*, até o ajuste dinâmico de trajetórias e cenários críticos no *AutoSim* e *ARTechGuide*, o que garante respostas específicas às necessidades de cada ambiente produtivo.

Por fim, o pilar da transformação evidencia a digitalização e a integração dos fluxos operacionais: a substituição de práticas manuais por rotinas digitais auditáveis (*ARTechGuide*), a eliminação de impressos e o ganho de eficiência na classificação de produtos (*ARomaticLens*), e a integração estável entre simulação virtual e execução real (*AutoSim*).

Os resultados encontrados respondem à terceira questão norteadora, atendem o quinto objetivo específico da tese e confirmam que a abordagem proposta consolida um modelo coerente de aplicação da RA e Simulação Digital orientado à Indústria 5.0; equilibram desempenho técnico, autonomia operacional e reconfiguração de processos e podem ser visualizados na Figura 9.

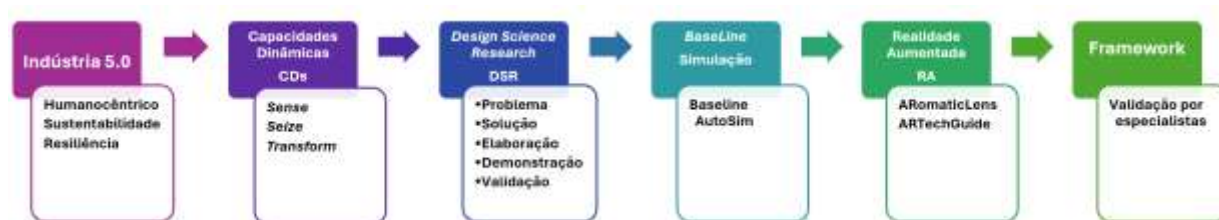


Figura 9 - Resultados da tese

Fonte: Autor (2025)

O Quadro 8 organiza os resultados em três eixos analíticos da Indústria 5.0; é essencial para a autonomia dos trabalhadores e para a adaptação dos sistemas produtivos em cenários distintos (TRSTENJAK *et al.*, 2025; CONTINI; GRANDI; PERUZZINI, 2025). Essa sistematização permite relacionar as evidências empíricas

dos três estudos *AutoSim*, *ARomaticLens* e *ARTechGuide* às CDs. Ela assegura a rastreabilidade metodológica entre os capítulos 3 e 4 e os Apêndices A até E.

Quadro 8 - Comparação intercaso (*AutoSim* x CEAGESP x Multinacional)

Eixo (Indústria 5.0)	Dimensão (CD)	Convergências	Divergências	Fonte (art.)
Humanocêntricos	<i>Sense</i>	Apoio à percepção e à decisão em tempo real	<i>AutoSim</i> : restrição à célula simulada CEAGESP: variabilidade morfológica e iluminação instável; Multinacional: barreiras ergonômicas;	Artigos 1, 2 e 3
Sustentabilidade	<i>Seize</i>	Fortalecimento da autonomia dos trabalhadores	<i>AutoSim</i> : ganho de 7,72% no ciclo; CEAGESP: redução de perdas comerciais; Multinacional: eficiência fabril e menor retrabalho	Artigos 1, 2 e 3
Resiliência	<i>Transform</i>	Reconfiguração de práticas tradicionais em fluxos digitais	<i>AutoSim</i> : integração simulação-real estável; CEAGESP: rastreabilidade agrícola em baixa conectividade; Multinacional: padronização crítica em setups fabris	Artigos 1, 2 e 3

Fonte: Autor (2025)

4.5 *Framework* para avaliar a capacidade de transformação digital, baseado em RA e CDs

O *framework* final sintetiza a integração entre RA, os pilares da I5.0 e CDs sob uma perspectiva empírica e aplicável. Seu propósito é avaliar a capacidade de transformação digital promovida pela RA, mensurar de forma equilibrada o desempenho tecnológico, o impacto humano e a ativação das capacidades organizacionais em ambientes controlados e não controlados.

A estrutura representa um sistema hierárquico e interdependente, no qual o núcleo tecnológico, composto por *hardware*, sensores IoT, dispositivos móveis, softwares *Unity* e *Vuforia* e interface MQTT, atua como base instrumental para geração de dados e experiências imersivas. Essa camada fornece os insumos que, ao serem processados pelos mecanismos de RA, produzem estímulos perceptivos e decisórios, relacionados aos pilares da Indústria 5.0.

Na camada seguinte, a Indústria 5.0 organiza-se em três pilares interpretativos: Humanocentrismo, Sustentabilidade e Resiliência. Cada um desses elementos é ativado por meio das CDs:

- *Sense* associa-se à percepção e ao diagnóstico de variáveis do processo produtivo; apoia o princípio humanocêntrico, pois amplia a consciência situacional do operador e reduz falhas cognitivas.
- *Seize* corresponde à apreensão e ao uso de oportunidades digitais; vincula-se à sustentabilidade operacional, uma vez que otimiza recursos e promove decisões rápidas e de baixo desperdício.
- *Transform* traduz-se na reconfiguração contínua de fluxos e padrões; reforça a resiliência organizacional e a capacidade de adaptação diante de perturbações ou variabilidade ambiental.

Essas relações configuram o núcleo cognitivo do *framework*. Nele, o ciclo *Sense*, *Seize* e *Transform* se manifesta como mecanismo de aprendizagem organizacional. Os resultados dos casos *AutoSim*, *ARomaticLens* e *ARTechGuide* confirmam empiricamente essa lógica. Em cada ambiente, a RA desencadeou percepções mais precisas, decisões mais assertivas e reconfigurações sustentáveis de processos.

A camada inferior contempla os ambientes de aplicação, controlado (industrial) e não controlado (campo/logística). A interação entre as dimensões é bidirecional: os fluxos controlados favorecem a consolidação de padrões e métricas, enquanto os fluxos abertos revelam a robustez e a adaptabilidade das soluções. Esse cenário complementar confirma a aplicabilidade do modelo em contextos heterogêneos de maturidade digital.

O último resultado do framework materializa-se, portanto, como um artefato funcional e validável, apto a medir o grau de digitalização adaptativa em diferentes contextos produtivos. Ele incorpora pré-requisitos técnicos (infraestrutura e conectividade), processos metodológicos (fases DSR e instrumentos de coleta), saídas mensuráveis (KPIs de desempenho, UX e aprendizado). A Figura 10 ilustra a integração entre essas camadas.

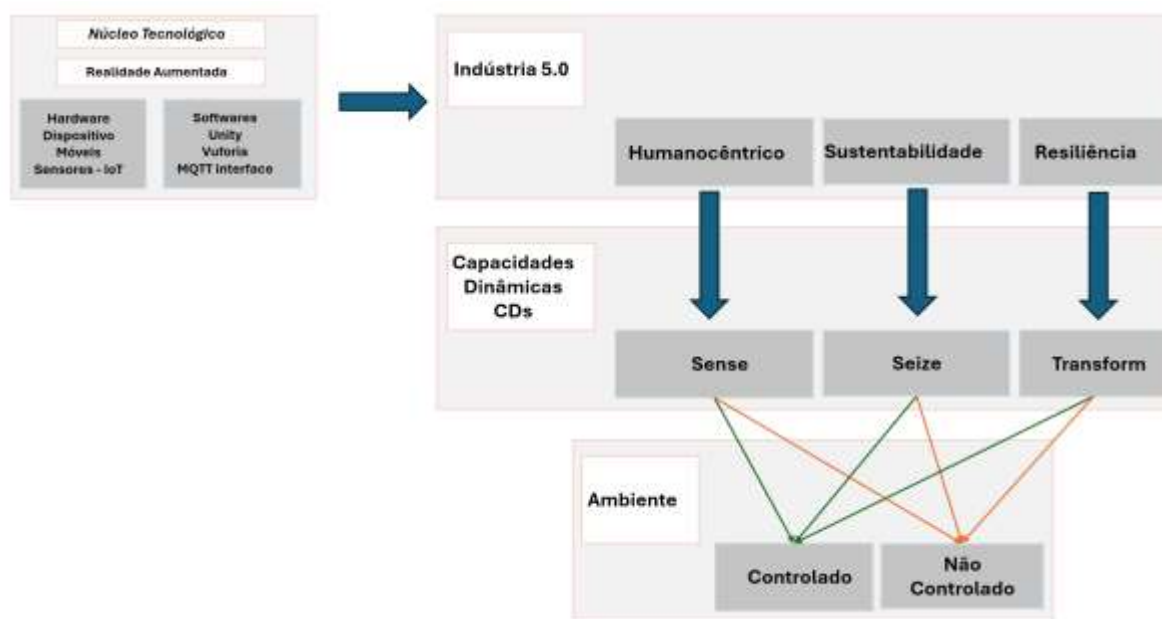


Figura 10 - Framework obtido

Fonte: Autor (2025)

Para fins de validação científica, foi adotado o método AHP, aplicado a três especialistas envolvidos na áreas da engenharia de manufatura, dos dispositivos e desenvolvimento de produto, todos com mais de 10 anos de experiência e atuação direta em tecnologias da Indústria 4.0 e 5.0. O AHP permite calcular pesos relativos entre as dimensões (Núcleo Tecnológico, Indústria 5.0, Capacidades Dinâmicas e Contexto), verificar a consistência dos julgamentos ($CR \leq 0,10$) e medir a concordância

entre avaliadores (*Kendall's W* $\geq 0,70$). Esse procedimento assegura que o *framework* atenda os critérios de replicabilidade, robustez teórica e validade empírica, que ele se consolide como ferramenta de diagnóstico da maturidade digital adaptativa em organizações industriais e logísticas.

4.6 Validação do *Framework* pelos especialistas

O procedimento de coleta de dados com especialistas para validação do *framework* proposto foi conduzido por meio de um instrumento estruturado de coleta de dados composto por 13 questões, conforme apresentado no APÊNDICE F. Dentre essas questões, 10 foram abertas, destinadas a caracterizar o perfil dos especialistas e contextualizar sua experiência profissional; 2 foram fechadas, avaliadas por meio de uma escala *Likert* de 5 pontos (5 = Concordo totalmente; 4 = Concordo parcialmente; 3 = Neutro; 2 = Discordo parcialmente; 1 = Discordo totalmente), e 1 questão fechada dicotômica, com resposta “sim” ou “não”, destinada a verificar o contato prévio do participante com o *framework*.

Os três especialistas selecionados apresentam notório reconhecimento profissional, domínio técnico e experiência comprovada em Realidade Aumentada, Realidade Virtual, Indústria 4.0/5.0, Engenharia de Produto e Tecnologias Emergentes, o que atende os critérios de intencionalidade e adequação amostral, recomendados para pesquisas baseadas em julgamento especializado. A escolha desse grupo assegurou diversidade experiencial e profundidade técnica suficientes para subsidiar uma validação multicritério confiável.

Para garantir rigor metodológico, transparência e replicabilidade, a coleta de dados foi conduzida em três fases complementares: (i) pré-validação, (ii) validação via AHP, (iii) pós-validação. O questionário foi disponibilizado em formato digital elaborado em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018), o que destacou a finalidade estritamente científica da pesquisa, a garantia de anonimato, a ausência de riscos aos participantes e a natureza voluntária da participação.

Na fase de pré-validação, o instrumento coletou dados referentes à função exercida, setor de atuação, principais atividades desempenhadas, tempo de experiência profissional e tempo de contato com os pilares da Indústria 4.0/5.0, além da familiaridade prévia com tecnologias imersivas (RA/RV). Essa etapa teve como

objetivo caracterizar o nível de *expertise* dos participantes e assegurar que suas respostas refletissem julgamento técnico qualificado.

Na etapa de validação AHP, cada especialista recebeu um *link*, para *download* da planilha, que contém as quatro matrizes de comparação paritária, estruturadas segundo a hierarquia analítica que compõe o *framework*: (i) Critérios Gerais (Núcleo Tecnológico, Indústria 5.0, Capacidades Dinâmicas e Contexto), (ii) Dimensões da Indústria 5.0, (iii) Capacidades Dinâmicas (*Sense–Seize–Transform*), (iv) Ambientes (Controlado e Não Controlado). Os especialistas realizaram os julgamentos de importância relativa entre os pares de critérios, conforme os princípios de Saaty e retornaram posteriormente às matrizes preenchidas para processamento dos pesos.

Na fase de pós-validação, o questionário solicitou que os especialistas avaliassem, por meio da escala *Likert*, se o *framework* refletia adequadamente os pilares da Indústria 5.0 e se a combinação entre RA, IoT e CDs favorecia a transformação digital sustentável. Adicionalmente, um campo aberto permitiu que os especialistas apresentassem comentários qualitativos, críticas construtivas e sugestões de aprimoramento do modelo.

A aplicação integrada dessas três etapas possibilitou a triangulação dos resultados, combinou dados qualitativos (percepções, julgamento especializado e recomendações) com dados quantitativos provenientes das matrizes AHP. Esse procedimento, alinhado às boas práticas de pesquisa em Engenharia de Produção, em Métodos Multicritério de Apoio à Decisão e em Estudos Avançados em Indústria 5.0, resultou uma validação robusta, consistente e metodologicamente defensável perante os critérios acadêmicos de rigor científico.

4.6.1 Avaliação do Especialista 1

O Especialista 1 atua como Engenheiro do Produto no setor de Desenvolvimento do Produto da indústria automotiva, desempenha atividades avançadas relacionadas ao uso de tecnologias imersivas (XR/VR/AR) aplicadas ao desenvolvimento de novos produtos. Possui 15 anos de experiência profissional e mantém contato direto com os pilares da Indústria 4.0 e 5.0 há aproximadamente 8 anos, período que coincide também com sua atuação contínua com Realidade Virtual e Realidade Aumentada em

aplicações industriais orientadas à engenharia, à colaboração técnica e à tomada de decisão.

Segundo o especialista, a adoção de RV/RA é considerada fundamental em seu cotidiano profissional, uma vez que essas tecnologias agilizam o processo de desenvolvimento, oferecem apoio direto às tomadas de decisão e contribuem para a redução de retrabalho, o que consolida ganhos operacionais alinhados com os princípios de digitalização e de integração entre pessoas, processos e tecnologias.

Antes da avaliação formal, o especialista já havia sido previamente apresentado ao *framework* conceitual desta pesquisa, o que permitiu uma análise qualificada das matrizes do método AHP. Após o preenchimento das matrizes comparativas, o Especialista 1 atribuiu a nota “5 – Concordo totalmente” à afirmação de que o *framework* reflete adequadamente os pilares da Indústria 5.0. Ele reconheceu aderência conceitual entre o modelo proposto e os elementos humanocêntricos, sustentáveis e resilientes. De forma igualmente positiva, também atribuiu nota “5 – Concordo totalmente” à pergunta sobre a sinergia entre Realidade Aumentada, IoT e Capacidades Dinâmicas. Destacou que essa combinação potencializa os mecanismos de transformação digital sustentável.

O especialista ainda forneceu um comentário qualitativo relevante, classificou o trabalho como “importante na definição das bases teóricas para a Indústria 5.0 no Brasil”, enfatizou sua contribuição conceitual, prática e alinhamento metodológico ao cenário nacional.

A seguir, encontram-se registradas as matrizes comparativas preenchidas pelo Especialista 1, utilizadas para a etapa quantitativa do AHP. A Tabela 3 apresenta a Matriz 1, na qual são comparados os critérios gerais Núcleo Tecnológico, Indústria 5.0, Capacidades Dinâmicas e Contexto — para a avaliação do *framework*.

Tabela 3 - Matriz 1 elaborada pelo especialista 1 - E1

Crêterios / Níveis	Núcleo Tecnológico	Indústria 5.0	Capacidades Dinâmicas	Contexto
Núcleo Tecnológico (RA/IoT)	1	5	3	5
Indústria 5.0	1/5	1	1/3	1
Capacidades Dinâmicas (Sense–Seize–Transform)	1/3	3	1	3
Contexto (Aberto/Fechado)	1/5	1	1	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 4 apresenta a Matriz 2, com a avaliação do especialista E1 para os cr terios da Indústria 5.0, Humanocêntrico, Sustentabilidade e Resiliência.

Tabela 4 - Matriz 2 elaborada pelo especialista 1 - E1

Crêterios / Níveis	Humanocêntrico	Sustentabilidade	Resiliência
Humanocêntrico	1	1/7	1/9
Sustentabilidade	7	1	1/3
Resiliência	9	3	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 5 apresenta a Matriz 3, *que cont m* a avaliação do especialista E1 sobre os cr terios das Capacidades Dinâmicas *Sense*, *Seize* e *Transform*.

Tabela 5 - Matriz 3 elaborada pelo especialista 1 - E1

Crêterios / Níveis	<i>Sense</i>	<i>Seize</i>	<i>Transform</i>
Sense	1	1/3	1/5
Seize	3	1	1/3
Transform	5	3	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 6 apresenta a Matriz 4, com a avaliação do especialista E1 e referente aos critérios de Ambiente Aberto e Fechado.

Tabela 6 - Matriz 4 elaborada pelo especialista 1 - E1

Critérios / Níveis	Ambiente Aberto	Ambiente Fechado
Ambiente Aberto	1	5
Ambiente Fechado	1/5	1

Fonte: Autor (2025)

A contribuição do Especialista 1 evidência elevada aderência entre o *framework* proposto e os princípios estruturantes da Indústria 5.0, reforça a coerência teórica e a aplicabilidade prática do modelo em contextos industriais avançados. Seus julgamentos, distribuídos nas quatro matrizes AHP, permitiram calcular os pesos relativos de cada dimensão, o que compôs o processo de validação multicritério que fundamenta a robustez metodológica deste estudo.

A primeira hierarquia refere-se à comparação dos critérios gerais que estruturam o *framework*: Núcleo Tecnológico (NT), Indústria 5.0 (I5.0), Capacidades Dinâmicas (CDs) e Contexto (Ctx). O processamento desta matriz segue rigorosamente as etapas descritas na Seção 3.6, conforme o método AHP proposto por Saaty (1980, 2008). Cada etapa é apresentada com contextualização teórica, seguida da aplicação matemática e dos resultados obtidos para o Especialista 1.

Nesta etapa inicial, conforme indicado na literatura (SAATY, 1980; VARGAS, 1990), realiza-se a soma dos elementos de cada coluna da matriz de comparação paritária. Essa operação corresponde ao primeiro passo do AHP e constitui a base necessária para a normalização posterior, o que permite equalizar escalas e tornar os julgamentos comparáveis. A primeira etapa consiste na soma das colunas referente à primeira tabela presenciada pelo especialista 1. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Soma dos elementos da coluna - E1

Critério	Col NT	Col I5.0	Col CDs	Col Ctx
NT	1	5	3	5
I5.0	0,2	1	0,333	1
CDs	0,333	3	1	3
Ctx	0,2	1	1	1
Soma	1,733	10	5,333	10

Fonte: Autor (2025)

A segunda etapa do método AHP consiste na normalização da matriz de julgamentos, realizada coluna por coluna. Esse procedimento é fundamental para padronizar os valores atribuídos pelo especialista, o que garante que diferenças de escala não distorçam o último resultado.

A normalização transforma os valores originais em proporções relativas em cada coluna, fato que permite que a soma de cada coluna da matriz normalizada seja igual a 1. Esse processo assegura comparabilidade entre os critérios e prepara a matriz para a etapa de cálculo dos pesos médios.

No caso do Especialista 1, cada valor da matriz original foi dividido pela soma da coluna correspondente. Por exemplo, no critério Núcleo Tecnológico, o valor "1" foi dividido por 1,733; o valor "5" por 10; o valor "3" por 5,333; e o valor "5" novamente por 10, o que resultou nos valores normalizados apresentados.

O mesmo procedimento foi rigorosamente aplicado às demais linhas e formou uma matriz proporcional e matematicamente consistente, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz Normalizada da Etapa 2 - E1

Critério / Coluna	NT (1,733)	I5.0 (10)	CDs (5,333)	Ctx (10)
Núcleo Tecnológico (NT)	0,577	0,500	0,562	0,500
Indústria 5.0 (I5.0)	0,115	0,100	0,062	0,100
Capacidades Dinâmicas (CDs)	0,192	0,300	0,187	0,300
Contexto (Ctx)	0,115	0,100	0,187	0,100

Fonte: Autor (2025)

Na terceira etapa, os pesos relativos dos critérios são calculados por meio da média das linhas normalizadas, conforme descrito na Seção 3.6 e consolidado por Pegetti (2014) e Saaty (2008). Cada peso representa a importância relativa do critério na hierarquia.

Para o Especialista 1, a linha do critério Núcleo Tecnológico soma 2,139 e, dividida por quatro elementos, resulta peso aproximado em 0,535. O mesmo procedimento foi aplicado às demais linhas: CDs resultou em 0,245; Contexto em 0,126; e I5.0 em 0,094. A Tabela 9 apresenta os valores obtidos.

Tabela 9 - Pesos dos Critérios Etapa 3 – E1

Critério	Peso
Núcleo Tecnológico	0,535
Capacidades Dinâmicas	0,245
Contexto	0,126
Indústria 5.0	0,094

Fonte: Autor (2025)

Na quarta etapa, verifica-se a consistência dos julgamentos; avalia-se se as comparações seguem uma lógica coerente. Conforme Saaty (1980) e Al-Harbi (2001), essa verificação utiliza o cálculo do vetor $A \cdot w$ e a razão entre esse resultado e os pesos. Cada divisão gera um valor intermediário que contribui para o cálculo do autovalor máximo.

Para o Especialista 1, as razões obtidas foram: 4,10 (NT), 4,02 (I5.0), 3,96 (CDs) e 3,54 (Ctx). A média dessas razões resultou $\lambda_{\max} \approx 3,91$. A partir dele, obtiveram-se $IC \approx 0,00$ e $CR = 0,00$, o que indica julgamentos perfeitamente consistentes conforme indicado no Quadro 9.

Quadro 9 – Avaliação de consistência da matriz (E1) em comparação aos valores ideais

Indicador	Valor Obtido (E1)	Valor Ideal (Literatura AHP)	Interpretação
$\lambda_{\text{máx}}$	3,91	4,00 (matriz perfeitamente consistente)	Muito próximo do ideal; pequenas variações são esperadas em julgamentos humanos.
IC – Índice de Consistência	$\approx 0,00$	$IC \leq 0,10$	Excelente consistência; nenhum desvio relevante identificado.
CR – Razão de Consistência	0,00	$CR < 0,10$ (Saaty, 1980)	Matriz totalmente consistente; atende plenamente ao critério de Saaty.

Fonte: Autor (2025), com base nos critérios de Saaty (1980) e Al-Harbi (2001).

A análise realizada pelo Especialista 1 demonstra que os critérios estruturantes do *framework* apresentam relações coerentes com o objetivo central da tese, que é validar um modelo capaz de integrar Realidade Aumentada, IoT e Capacidades Dinâmicas na Indústria 5.0.

Os pesos obtidos indicam que o Núcleo Tecnológico e as Capacidades Dinâmicas exercem maior influência na avaliação, o que é consistente com a proposta de um *framework* orientado à transformação digital, baseada em *sensing*, interpretação e reconfiguração de recursos. Indústria 5.0 e Contexto aparecem como dimensões moderadoras, o que reforça que o modelo deve operar em cenários distintos sem perder aderência conceitual.

A consistência plena dos julgamentos ($CR = 0,00$) confirma que as preferências expressas pelo especialista foram estáveis e logicamente estruturadas. Dessa forma, a avaliação do E1 indica que a organização hierárquica do *framework* é adequada para sustentar decisões e análises em ambientes controlados e não controlados. Ela atende

o propósito de verificar sua coerência interna e sua aplicabilidade como instrumento de apoio à transformação digital.

4.6.2 Avaliação do Especialista 2

O Especialista 2 atua como Engenheiro de Processos Sênior no setor de Produção Digital; exerce atividades diretamente relacionadas ao uso de tecnologias avançadas de simulação e digitalização de processos industriais. Sua atuação envolve simulações virtuais de manufatura, uso de Realidade Virtual, captura de movimento (*motion capture*), avaliação ergonômica aplicada, estudos de processos robotizados, experimentação com novas tecnologias, implementação de Realidade Aumentada e iniciativas de digitalização de processos. Com 12 anos de experiência profissional, o especialista também possui 12 anos de contato contínuo com os pilares da Indústria 4.0/5.0 e acumula 8 anos de atuação com tecnologias imersivas. Ele demonstra *expertise* sólida e alinhada às temáticas centrais da pesquisa.

Em suas atividades cotidianas, o especialista considera a RV/RA muito importantes; destaca que essas tecnologias constituem uma das atividades principais em seu escopo de trabalho; reflete maturidade tecnológica e domínio prático na aplicação de ferramentas avançadas para otimização de processos industriais. Antes da etapa formal de avaliação, o especialista já havia sido previamente apresentado ao *framework* conceitual, o que lhe garantiu maior assertividade nos julgamentos realizados nas matrizes AHP.

Após o preenchimento das matrizes, o Especialista 2 atribuiu a nota “5 – Concordo totalmente” para a afirmação de que o *framework* reflete adequadamente os pilares da Indústria 5.0. De forma igualmente positiva, também classificou com “5 – Concordo totalmente” a pergunta sobre a aderência entre Realidade Aumentada, IoT e Capacidades Dinâmicas para favorecer processos de transformação digital sustentável. Isto reforça o alinhamento entre o modelo proposto e as práticas atuais da manufatura avançada.

Como contribuição qualitativa, o especialista observou que a matriz de comparação paritária, especificamente na relação entre critérios e parâmetros, pode gerar dúvidas quanto à proporcionalidade inversa entre linhas e colunas, sugere que, em alguns casos, a representatividade contextual pode resultar relações não

estritamente recíprocas. Essa observação oferece oportunidade para refinamento futuro do instrumento e será considerada na análise interpretativa dos dados.

Na Tabela 10, estão registradas as matrizes AHP preenchidas pelo Especialista 2, utilizadas para a etapa quantitativa de cálculo dos pesos relativos. Os dados contêm a Matriz 1 com a avaliação do especialista E2 para os critérios gerais: Núcleo Tecnológico, I5.0, CDs e Contexto.

Tabela 10 - Matriz 1 elaborada pelo especialista 2 - E2

Crítérios / Níveis	Núcleo Tecnológico	Indústria 5.0	Capacidades Dinâmicas	Contexto
Núcleo Tecnológico (RA/IoT)	1	3	1/7	5
Indústria 5.0	1/3	1	1/5	9
Capacidades Dinâmicas (<i>Sense–Seize–Transform</i>)	7	5	1	1
Contexto (Aberto/Fechado)	1/5	1/9	1	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 11 apresenta a Matriz 2 que reúne a avaliação do especialista E2 para os critérios da Indústria 5.0 Humanocêntrico, Sustentabilidade e Resiliência.

Tabela 11 - Matriz 2 elaborada pelo especialista 2 - E2

Crítérios / Níveis	Humanocêntrico	Sustentabilidade	Resiliência
Humanocêntrico	1	7	1/9
Sustentabilidade	1/7	1	1/5
Resiliência	9	5	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 12 apresenta a Matriz 3, com a avaliação do especialista E2. Ela é referente aos critérios das Capacidades Dinâmicas *Sense*, *Seize* e *Transform*.

Tabela 12 - Matriz 3 elaborada pelo especialista 2 - E2

Critérios / Níveis	<i>Sense</i>	<i>Seize</i>	<i>Transform</i>
Sense	1	3	1/9
Seize	1/3	1	1/5
Transform	9	5	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 13 apresenta a Matriz 4 e contém a avaliação do especialista E2 para os critérios de Ambiente Aberto e Fechado.

Tabela 13 - Matriz 4 elaborada pelo especialista 2 - E2

Critérios / Níveis	Ambiente Aberto	Ambiente Fechado
Ambiente Aberto	1	5
Ambiente Fechado	1/5	1

Fonte: Autor (2025)

A contribuição do Especialista 2 reforça a coerência conceitual e a aplicabilidade prática do *framework*; evidencia forte alinhamento entre o modelo proposto e as necessidades atuais da manufatura digital avançada. Seus julgamentos, expressos nas quatro matrizes AHP, demonstram sensibilidade à hierarquia entre critérios tecnológicos, organizacionais e contextuais, o que enriquece o processo de validação quantitativa. O comentário qualitativo apresentado oferece insumos relevantes para melhorias futuras, contribui para a clareza operacional do instrumento.

Os resultados que envolvem a avaliação do E2 podem ser divididos também em etapas, e a primeira consiste na soma dos elementos de cada coluna da matriz de comparação paritária, conforme descrito por Saaty (1980). Esse procedimento prepara a matriz para a normalização, permite equalizar escalas e padronizar os julgamentos

antes das demais operações. A Tabela 14 apresenta os valores resultantes dessa soma e constitui a base para o cálculo proporcional das etapas seguintes.

Tabela 14 - Soma dos elementos da coluna - E2

Critério	Col NT	Col I5.0	Col CDs	Col Ctx
NT	1	3	0,143	5
I5.0	0,333	1	0,2	9
CDs	7	5	1	1
Ctx	0,2	0,111	1	1
Soma	8,533	9,111	2,343	16

Fonte: Autor (2025)

A segunda etapa corresponde à normalização coluna a coluna, divide cada elemento pela soma da coluna. Essa transformação assegura comparabilidade entre os critérios e elimina diferenças de escala, conforme indicado em Saaty (2008). Os valores normalizados refletem a participação relativa de cada critério em cada coluna da matriz original. A Tabela 15 apresenta o resultado desse processo.

Tabela 15 - Matriz Normalizada da Etapa 2 - E2

Critério / Coluna	NT (8,533)	I5.0 (9,111)	CDs (2,343)	Ctx (16)
NT	0,117	0,329	0,061	0,313
I5.0	0,039	0,110	0,085	0,563
CDs	0,821	0,548	0,427	0,063
Ctx	0,023	0,012	0,427	0,063

Fonte: Autor (2025)

A terceira etapa calcula os pesos relativos dos critérios por meio da média aritmética das linhas normalizadas, conforme a formulação apresentada na Seção 3.6. Esse cálculo representa a importância relativa atribuída pelo especialista a cada critério do *framework*. A Tabela 16 apresenta os pesos obtidos após a normalização final.

Tabela 16 - Pesos dos Critérios - E2

Critério	Peso
Capacidades Dinâmicas	0,562
Núcleo Tecnológico	0,208
Indústria 5.0	0,161
Contexto	0,069

Fonte: Autor (2025)

A quarta etapa verifica a consistência dos julgamentos emitidos; utiliza o cálculo do vetor $A \cdot w$, do autovalor máximo (λ_{\max}), do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (CR). Conforme Saaty (1980), valores de CR inferiores a 0,10 indicam coerência aceitável. O Quadro 10 apresenta os indicadores calculados para o Especialista 2.

Quadro 10 - Avaliação de consistência da matriz (E2)

Indicador	Valor Obtido (E2)	Valor Ideal	Interpretação
λ_{\max}	4,21	4,00	Dentro do esperado
IC	0,07	$IC \leq 0,10$	Consistência adequada
CR	0,078	$CR < 0,10$	Matriz consistente

Fonte: Autor (2025), com base em Saaty (1980)

A avaliação do Especialista 2 demonstra alinhamento entre os pesos atribuídos e a lógica conceitual do *framework*; evidencia maior relevância para as Capacidades Dinâmicas, seguida do Núcleo Tecnológico. Os resultados reforçam a relação entre mecanismos organizacionais de adaptação e tecnologias habilitadoras para transformação digital. A consistência satisfatória (CR = 0,078) indica julgamentos estruturados e coerentes, contribui para validar a arquitetura do *framework* em cenários industriais digitalizados.

4.6.3 Avaliação do Especialista 3

O Especialista 3 atua como Engenheiro de Processos no setor de Planejamento e Projeto Mecânico de Dispositivos & Simulação, voltado ao desenvolvimento de células automáticas de produção. Entre suas principais atribuições, estão o desenvolvimento de toda a documentação técnica necessária para planejamento, projeto e simulação aplicados à implantação de células automatizada, o que deve contemplar desde a concepção dos dispositivos até a validação virtual dos processos. Possui 20 anos de experiência profissional, 15 deles de contato direto com os pilares da Indústria 4.0/5.0 e 5 anos de atuação com tecnologias de RV e RA aplicadas à validação de projetos e processos.

Nas suas atividades diárias, as RV/RA são utilizadas como ferramenta de validação de planejamento e projeto, com o objetivo de evitar retrabalhos em campo após a confecção dos recursos físicos. Dessa forma, a tecnologia assume um papel preventivo e estratégico, permite antecipar problemas de *layout*, ergonomia, acessibilidade e interferências mecânicas, o que contribui diretamente para a redução de custos, aumento de confiabilidade e melhoria da eficiência operacional.

O especialista foi previamente apresentado à proposta conceitual do *framework*, o que favoreceu a qualidade dos julgamentos emitidos nas matrizes AHP. Após o preenchimento das matrizes, atribuiu a nota “5 – Concordo totalmente” à afirmação de que o *framework* reflete adequadamente os pilares da Indústria 5.0, bem como a questão sobre a capacidade da combinação entre RA, IoT e CDs em favorecer a transformação digital sustentável. Como contribuição qualitativa, sugeriu que o modelo passe a considerar explicitamente aspectos regulatórios e de segurança cibernética como parte do contexto de aplicação, o que amplia a aderência do *framework* às exigências contemporâneas de governança digital e proteção de dados em ambientes industriais conectados.

A seguir, são apresentadas as matrizes AHP preenchidas pelo Especialista 3, utilizadas na etapa quantitativa para cálculo dos pesos relativos. A Tabela 17 reúne a Matriz 1 com a avaliação do especialista E3 para os critérios gerais Núcleo Tecnológico, Indústria 5.0, Capacidades Dinâmicas e Contexto.

Tabela 17 - Matriz 1 elaborada pelo especialista 3 - E3

Crítérios / Níveis	Núcleo Tec.	Indústria 5.0	CDs	Contexto
Núcleo Tecnológico	1	2	1/3	3
Indústria 5.0	1/2	1	1/3	3
CDs	3	3	1	5
Contexto	1/3	1/3	1/5	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 18 apresenta a Matriz 2, que reúne a avaliação do especialista E3 para os critérios da Indústria 5.0 Humanocêntrico, Sustentabilidade e Resiliência.

Tabela 18 - Matriz 2 elaborada pelo especialista 3 - E3

Crítérios	Humanocêntrico	Sustentabilidade	Resiliência
Humanocêntrico	1	3	1/3
Sustentabilidade	1/3	1	1/3
Resiliência	3	3	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 19 apresenta a Matriz 3, com a avaliação do especialista E3 referente aos critérios das Capacidades Dinâmicas *Sense*, *Seize* e *Transform*.

Tabela 19 - Matriz 3 elaborada pelo especialista 3 - E3

Crítérios	<i>Sense</i>	<i>Seize</i>	<i>Transform</i>
Sense	1	1/3	1/3
Seize	3	1	1
Transform	3	1	1

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 20 apresenta a Matriz 4, que contém a avaliação do especialista E3 para os critérios de Ambiente Aberto e Fechado.

Tabela 20 - Matriz 4 elaborada pelo especialista 3 - E3

Critérios	Aberto	Fechado
Aberto	1	5
Fechado	1/5	1

Fonte: Autor (2025)

A avaliação do Especialista 3 (E3) dá-se em etapas. A primeira delas calcula a soma dos elementos de cada coluna da matriz paritária, conforme previsto no método AHP. Essa operação estabelece a base para a normalização proporcional dos dados, assegura a compatibilidade entre os julgamentos atribuídos pelo especialista. Os valores da soma das colunas estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Soma dos elementos da coluna - E3

Critério	Col NT	Col I5.0	Col CDs	Col Ctx
NT	1	2	0,333	3
I5.0	0,5	1	0,333	3
CDs	3	3	1	5
Ctx	0,333	0,333	0,2	1
Soma	4,833	6,333	1,866	12

Fonte: Autor (2025)

A segunda etapa corresponde à normalização, calculada pela divisão de cada elemento pela soma da respectiva coluna. Esse passo garante equivalência proporcional entre os critérios, conforme fundamentado por Saaty (2008). A Tabela 22 apresenta os valores obtidos após esse processamento.,

Tabela 22 - Matriz Normalizada da Etapa 2 - E3

Critério / Coluna	NT (4,833)	I5.0 (6,333)	CDs (1,866)	Ctx (12)
NT	0,207	0,316	0,178	0,250
I5.0	0,103	0,158	0,178	0,250
CDs	0,621	0,474	0,536	0,417
Ctx	0,069	0,053	0,107	0,083

Fonte: Autor (2025)

A terceira etapa consiste no cálculo da média aritmética das linhas da matriz normalizada e determina a importância relativa de cada critério. Os valores representam a percepção do especialista quanto à contribuição de cada dimensão do *framework*. A Tabela 23 apresenta os pesos finais obtidos.

Tabela 23 - Pesos dos Critérios - E3

Critério	Peso
Capacidades Dinâmicas	0,512
Núcleo Tecnológico	0,237
Indústria 5.0	0,172
Contexto	0,078

Fonte: Autor (2025)

A etapa final avalia a coerência interna dos julgamentos por meio dos indicadores $\lambda_{\text{máx}}$, IC e CR. Esses valores demonstram se as comparações seguem uma lógica estruturada, conforme discutido por Saaty (1980). O Quadro 11 apresenta os resultados calculados.

Quadro 11 - Avaliação de consistência da matriz (E3)

Indicador	Valor Obtido (E3)	Valor Ideal	Interpretação
$\lambda_{\text{máx}}$	4,12	4,00	Adequado
IC	0,040	$IC \leq 0,10$	Consistente
CR	0,044	$CR < 0,10$	Atende ao critério

Fonte: Autor (2025)

Os resultados atribuídos pelo Especialista 3 reforçam o papel central das Capacidades Dinâmicas como elemento dominante na avaliação, seguido pelo Núcleo Tecnológico. Essa estrutura valoriza a capacidade organizacional de adaptação, alinhada ao objetivo de integrar RA, IoT e aos mecanismos de transformação digital. A consistência adequada ($CR = 0,044$) confirma a estabilidade dos julgamentos e fortalece a validação estrutural do framework para uso em ambientes controlados e não controlados.

4.6.4 Síntese integrada da validação dos especialistas pelo AHP agregado

Sob a perspectiva do Objetivo Específico 6, esta seção integra os julgamentos dos três especialistas por meio do AHP agregado, consolida a validação do *framework* RA, I5.0 e CDs. A síntese dos pesos, das razões de consistência e das evidências qualitativas permite avaliar, de forma sistemática, a relevância relativa de cada dimensão e a adequação do modelo para apoiar decisões em processos de transformação digital.

A análise integrada dos três especialistas evidencia convergência relevante entre os pesos atribuídos aos critérios gerais do *framework*. Em todas as matrizes, as Capacidades Dinâmicas e o Núcleo Tecnológico ocupam as primeiras posições, indicam percepção compartilhada de que esses elementos estruturam a capacidade organizacional de adaptação e sustentam a integração entre Realidade Aumentada, IoT e processos de transformação digital em contextos industriais distintos.

Os resultados das matrizes apresentaram Razão de Consistência (CR) inferior a 0,10 para todos os especialistas, em todas as hierarquias avaliadas. Esse comportamento indica estabilidade nos julgamentos, ausência de contradições internas relevantes e aderência aos critérios de aceitabilidade do método AHP, reforça a confiabilidade dos pesos obtidos e a robustez matemática da etapa de validação multicritério.

A interpretação conjunta dos pesos mostra que as CDs surgem como eixo central do modelo, com maior peso no agregado e dominância particularmente evidente nas avaliações do E2 e do E3. O Núcleo Tecnológico aparece como suporte instrumental essencial, com peso mais elevado no E1 e moderado nos demais, reforça o papel de RA e infraestrutura digital como habilitadores da atuação efetiva das CDs no *framework*.

No âmbito dos pilares da Indústria 5.0, observam-se variações de peso entre os especialistas, o que reflete especificidades de contexto e trajetória profissional de cada avaliador. Ainda assim, os julgamentos apontam convergência quanto à relevância dos princípios humanocêntricos, sustentáveis e resilientes como dimensões moderadoras do modelo. No critério de Ambiente, destaca-se a preferência de 83,3% para o Ambiente Aberto, em todos os especialistas, fato que valida a vocação do *framework* para cenários não estruturados.

As contribuições qualitativas reforçam esse quadro, ao apontar aderência do *framework* à prática consolidada em manufatura digital, simulação, engenharia de produto e tecnologias imersivas. Os especialistas sugeriram aprimoramentos relacionados aos aspectos regulatórios e de cibersegurança, indicam caminhos para evolução incremental do modelo sem comprometer sua estrutura hierárquica principal.

A integração sistemática dos julgamentos, por meio do AHP agregado, permitiu reduzir vieses individuais e consolidar uma visão multicritério coerente com os fundamentos teóricos da Indústria 5.0 e das Capacidades Dinâmicas. O conjunto das avaliações sustenta a aplicabilidade do framework em ambientes controlados e não controlados, o que confere coerência interna, validade teórica e aderência prática. O Quadro 12 resume de forma integrada a validação dos especialistas (E1, E2, E3) – AHP de forma agregada.

Quadro 12 - Validação do *framework* por meio dos especialistas

Dimensão / Critério		E1	E2	E3	Tendência Integrada (AHP Agregado)
MATRIZ 1 — Critérios Gerais	Núcleo Tecnológico (NT)	0,535	0,208	0,237	Relevância estrutural; varia conforme o especialista, mas permanece essencial
	Indústria 5.0 (I5.0)	0,094	0,161	0,172	Influência secundária, porém estável em E2–E3
	Capacidades Dinâmicas (CDs)	0,245	0,562	0,512	Critério mais relevante no agregado; eixo central do framework
	Contexto (Aberto/Fechado)	0,126	0,069	0,078	Peso moderador e complementar
	CR	0	0,078	0,044	Consistência plena (<0,10)
MATRIZ 2 — Indústria 5.0	Humanocêntrico	0,07	0,671	0,316	Importância variável; peso dominante em E2
	Sustentabilidade	0,694	0,093	0,158	Alta relevância em E1; moderada nos demais
	Resiliência	0,236	0,236	0,526	Elemento mais estável e crescente no agregado
	CR	0,05	0,03	0,02	Consistência adequada
MATRIZ 3 — Capacidades Dinâmicas (<i>Sense</i> – <i>Seize</i> – <i>Transform</i>)	<i>Sense</i>	0,103	0,221	0,272	Contribuição perceptiva moderada
	<i>Seize</i>	0,309	0,152	0,272	Importância intermediária
	<i>Transform</i>	0,588	0,627	0,456	Critério dominante nos três especialistas; alinhamento pleno ao framework
	CR	0,08	0,06	0,04	Consistência aceitável (<0,10)
MATRIZ 4 — Critério de Ambiente	Ambiente Aberto	0,833	0,833	0,833	Convergência total; forte suporte ao uso em ambientes não estruturados
	Ambiente Fechado	0,167	0,167	0,167	Peso residual estável
	CR	0	0	0	Consistência perfeita

Fonte: Autor (2025)

4.7 Discussão Crítica

A análise crítica dos resultados demonstra alinhamento consistente entre o arcabouço teórico e os achados empíricos e evidencia que a RA atua como tecnologia de suporte cognitivo e operacional em ambientes produtivos distintos. A comparação entre CEAGESP e multinacional confirma convergências com pesquisas que destacam ganhos de eficiência, padronização e confiabilidade em tarefas críticas, mesmo sob diferentes graus de controle ambiental e infraestrutura digital (SEELIGER; CHENG; NETLAND, 2023; MORALES MÉNDEZ; DEL CERRO VELÁZQUEZ, 2024).

A interpretação sob a ótica das CDs evidenciou a aderência das dimensões *Sense*, *Seize* e *Transform* aos indicadores coletados. *Sense* emergiu na percepção e clareza operacional, *Seize* manifestou-se na eficiência mensurada por tempos, acurácia e erros e *Transform* ficou evidente na padronização, retomada e segurança. A conexão empírica das CDs reforça consistência metodológica e explica a capacidade adaptativa dos artefatos de RA em contextos heterogêneos (JOUSSEN; KANBACH; KRAUS, 2025; PITELIS; TEECE; YANG, 2024).

A tese avança ao aplicar CDs como lente interpretativa da RA em ambientes abertos e fechados, supre lacunas sobre comparabilidade entre contextos contrastantes. Metodologicamente, consolida a integração entre DSR, métricas quantitativas e qualitativas, além da validação multicritério via AHP. Praticamente, evidencia redução de desperdícios no CEAGESP e ganhos de padronização, segurança e ergonomia na indústria, reforça alinhamento aos pilares humanocêntricos e sustentáveis da Indústria 5.0 (MARINO *et al.*, 2024; CONTINI; GRANDI; PERUZZINI, 2025).

A validação estruturada com três especialistas, por meio do AHP, confirmou coerência interna e robustez do *framework*. As quatro matrizes apresentaram $CR < 0,10$, demonstram julgamentos consistentes. A integração dos pesos revelou predominância das CDs e do Núcleo Tecnológico, reforça que o desempenho da RA depende de bases perceptivas, instrumentais e adaptativas. A convergência total para Ambiente Aberto destaca aplicabilidade ampliada dos artefatos (SAATY, 1980; AL-HARBI, 2001).

As limitações identificadas incluem tamanho amostral reduzido na CEAGESP e no ambiente industrial, além de restrições impostas pelas condições reais de operação,

como conectividade limitada e variações luminosas. A documentação dessas restrições reforça transparência metodológica e permite delimitar o escopo dos resultados. Recomenda-se ampliar amostras e replicar medições em diferentes turnos e configurações operacionais para fortalecer a generalização (JANSSEN; MÜLLER; MANN, 2023; SYED *et al.*, 2023).

A análise intracaso e intercaso mostrou que, na CEAGESP, a RA destacou-se pela resiliência diante de variabilidade ambiental e apoiou a tomada de decisão sob incerteza. No ambiente industrial, a tecnologia apresentou forte capacidade de padronização e redução de falhas humanas. A complementaridade dos resultados confirma a adequação do *framework* RA–CDs–I5.0 como instrumento analítico capaz de explicar adaptação, captura de valor e reconfiguração em diferentes maturidades digitais (TRSTENJAK *et al.*, 2025; FERNANDES *et al.*, 2023).

A convergência dos resultados aponta para a RA como tecnologia estratégica na I5.0, capaz de promover os respectivos pilares. A integração com IoT, IA e a simulação digital constituem caminho promissor para sistemas auto adaptativos e de aprendizado contínuo; sugere-se também ampliar a validação do *framework* em outros ambientes (BIBRI; JAGATHEESAPERUMAL, 2023; LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou a aplicação da RA em dois contextos contrastantes, integrou-as às CDs e aos pilares da I5.0. A metodologia DSR permitiu conceber, testar e comparar os artefatos *ARomaticLens* e *ARTechGuide*, com a garantia de rigor científico, replicabilidade e aderência prática. A análise intercaso evidenciou como a RA se adapta a diferentes graus de controle ambiental, como oferece suporte cognitivo, operacional e organizacional em cenários caracterizados por variabilidade e exigência de padronização.

O objetivo geral foi atendido ao se demonstrar que a RA e a I5.0, integrada às CDs, podem sustentar processos de transformação digital em diferentes ambientes produtivos. O Objetivo Específico 1 foi alcançado com o estabelecimento do *baseline AutoSim* como protocolo de referência em célula robótica simulada. O Objetivo Específico 2 foi atendido com a construção dos artefatos DSR, e o Objetivo Específico 3 com a aplicação e a avaliação do *ARomaticLens* na CEAGESP.

O Objetivo Específico 4 foi cumprido por meio do experimento industrial controlado com o *ARTechGuide* em uma multinacional de autopeças. O Objetivo Específico 5 foi alcançado ao comparar os casos e identificar convergências e divergências estruturantes entre os cenários estudados. Por fim, o Objetivo Específico 6 foi atendido ao se validar o *framework* com três especialistas com utilização do método AHP, o que confirma sua coerência e sua aplicabilidade em ambientes controlados e não controlados.

As contribuições teóricas incluem (i) articulação inédita entre RA e CDs, o que evidencia manifestações empíricas das dimensões *Sense*, *Seize* e *Transform*; (ii) proposição de um *framework* integrador entre RA, I5.0, CDs e Ambientes; (iii) demonstração de que os pilares humanocêntrico, sustentabilidade e a resiliência podem ser operacionalizadas mediante tecnologias imersivas alinhadas às CDs. Essas contribuições ampliam o debate sobre transformação digital baseada em capacidades organizacionais adaptativas.

As contribuições práticas abrangem (i) protocolo *AutoSim* para avaliação comparativa; (ii) diretrizes de implementação para RA em ambientes de baixa infraestrutura; (iii) procedimentos de padronização para *setups* industriais críticos; (iv)

indicadores mensuráveis de desempenho (tempo, acurácia, falhas, UX). A aplicação concreta dos artefatos demonstrou redução de erros na CEAGESP e ganhos de eficiência, segurança e padronização em rotinas industriais complexas, o que reforça a utilidade operacional da RA.

As implicações para gestão incluem competências organizacionais necessárias à adoção da RA, curadoria de conteúdo técnico contextualizado; treinamento contínuo para uso de interfaces imersivas; gestão do conhecimento baseada em análises e registros digitais; cultura orientada ao aprendizado. Do ponto de vista infraestrutural, a pesquisa indica requisitos mínimos como dispositivos móveis adequados, conectividade local estável (quando possível), mecanismos de operação *offline*, governança de dados e integração entre sistemas que envolvam a RA.

As recomendações para políticas públicas envolvem o uso do *framework* em programas de capacitação profissional, digitalização de cadeias agroalimentares e estratégias de transformação produtiva voltadas à I5.0. Para investigações futuras, recomenda-se um estudo longitudinal de aprendizagem, com avaliação de desempenho dos operadores após semanas sem suporte da RA, com exame da retenção de conhecimento, de autonomia e de evolução das rotinas produtivas. A expansão da amostra e a aplicação em outros setores fortalecerão a generalização dos achados.

Os resultados demonstram alinhamento entre RA, I5.0 e CDs e reforça que tecnologias imersivas ampliam percepção humana, melhoram captura de oportunidades operacionais e sustentam reconfigurações organizacionais. A validação AHP com três especialistas confirmou a coerência interna do *framework* e sua aplicabilidade em ambientes controlados e não controlados. Assim, esta tese oferece base conceitual, metodológica e prática para o desenvolvimento de sistemas imersivos responsáveis. Ela se consolida como referência para estudos futuros e iniciativas de transformação digital sustentável.

REFERÊNCIAS

ALBERT, Bill; TULLIS, Tom. **Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting UX Metrics**. 3. ed. [s.l.]: Morgan Kaufmann, 2022. ISBN 9780128180815.

ALEXIOU, Andreas; SCHIPPERS, Michaéla C. **Digital game elements, user experience and learning: A conceptual framework**. *Education and Information Technologies*, v. 23, n. 6, p. 2545–2567, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-018-9730-6>

ALGERAFI, Mohammed A. M.; ZHOU, Yueliang; OUBIBI, Mohamed; WIJAYA, Tommy Tanu. **Unlocking the Potential: A Comprehensive Evaluation of Augmented Reality and Virtual Reality in Education**. *Electronics*, v. 12, n. 18, p. 3953, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12183953>

AL-HARBI, K. M. A. **Application of the AHP in project management**. *International Journal of Project Management*, v. 19, n. 1, p. 19–27, 2001. DOI: 10.1016/S0263-7863(99)00038-1; ISSN 0263-7863.

ALOMARI, Hakam W.; RAMASAMY, Vijayalakshmi; KIPER, James D.; POTVIN, Geoff. **A User Interface (UI) and User eXperience (UX) evaluation framework for cyberlearning environments in computer science and software engineering education**. *Heliyon*, v. 6, n. 5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03917>

AYRES, Lioness; KAVANAUGH, Karen; KNAFL, Kathleen A. **Within-Case and Across-Case Approaches to Qualitative Data Analysis**. *Qualitative Health Research*, v. 13, n. 6, p. 871–883, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1177/1049732303013006008>

BARI, Nadeem; CHIMHUNDU, Ranga; CHAN, Ka Ching. **Interrelation between Sustainable Dynamic Capabilities, Corporate Sustainability, and Sustained Competitive Advantage**. *Sustainability*, v. 16, n. 7, p. 2864, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072864>

BIBRI, Simon Elias; JAGATHEESAPERUMAL, Senthil Kumar. **Harnessing the Potential of the Metaverse and Artificial Intelligence for the Internet of City Things: Cost-Effective XReality and Synergistic AIoT Technologies**. *Smart Cities*, v. 6, n. 5, p. 2397–2429, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities6050109>

BOUNCKEN, Ricarda B.; CZAKON, Wojciech; SCHMITT, Florian. **Purposeful sampling and saturation in qualitative research methodologies: recommendations and review**. *Review of Managerial Science*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11846-025-00881-2>

BUCHNER, Josef; BUNTINS, Katja; KERRES, Michael. **The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review**. *Journal of*

Computer Assisted Learning, v. 38, n. 1, p. 285–303, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcal.12615>

BUZZAO, Giacomo; RIZZI, Francesco. **On the conceptualization and measurement of dynamic capabilities for sustainability: Building theory through a systematic literature review**. *Business Strategy and the Environment*, v. 30, n. 1, p. 135–175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2614>

CEAGESP. A CEAGESP: institucional. Disponível em: <https://ceagesp.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/a-ceagesp/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

CHAI, Jackey J. K.; O’SULLIVAN, Carol; GOWEN, Aoife A.; ROONEY, Brendan; XU, Jun-Li. **Augmented/mixed reality technologies for food: A review**. *Trends in Food Science & Technology*, v. 124, p. 182–194, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.02>

CHARI, Arpita; NIEDENZU, Denis; DESPEISSE, Mélanie; MACHADO, Carla Gonçalves; AZEVEDO, João Domingues; BOAVIDA-DIAS, Rui; JOHANSSON, Björn. **Dynamic capabilities for circular manufacturing supply chains—Exploring the role of Industry 4.0 and resilience**. *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 5, p. 2500–2517, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.3040>

CHU, Chih-Hsing; WENG, Chen-Yu; CHEN, Yu-Tzu. **Enhancing manual inspection in semiconductor manufacturing with integrated augmented reality solutions**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 77, p. 933–945, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.12.019>

COMISSÃO EUROPEIA. *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Brussels: European Commission, 2021. (Staff Working Document SWD (2021) 24 final). 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. Acesso em: 30 out. 2025.

CONTINI, Giuditta; GRANDI, Fabio; PERUZZINI, Margherita. **Human-Centric Green Design for automatic production lines: Using virtual and augmented reality to integrate industrial data and promote sustainability**. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 44, p. 100801, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100801>

DARGAN, Shaveta; BANSAL, Shally; KUMAR, Munish; MITTAL, Ajay; KUMAR, Krishan. **Augmented Reality: A Comprehensive Review**. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 30, n. 2, p. 1057-1080, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09831-7>

DEJARDIN, Marcus; RAPOSO, Mario L.; FERREIRA, João J.; FERNANDES, Cristina I.; VEIGA, Pedro M.; FARINHA, Luís. **The impact of dynamic capabilities on SME performance during COVID-19**. *Review of Managerial Science*, v. 17, n. 5, p. 1703–1729, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11846-022-00569-x>

DIRIN, Amir; LAINE, Teemu H. **User Experience in Mobile Augmented Reality: Emotions, Challenges, Opportunities and Best Practices.** *Computers*, v. 7, n. 2, p. 33, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers7020033>

EISENHARDT, Kathleen M. **Building theories from case study research.** *Academy of Management Review*, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989. DOI: 10.5465/amr.1989.4308385.

ESHTAIWIA, M.; OSMAN, M. R.; BIN SAID, M. F.; ALI, W. H. **Application of analytic hierarchy process (AHP) for decision making in renewable energy sector.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, p. 292–306, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.057 — ISSN 1364-0321.

FERNANDES, João Carlos Lopes; OKANO, Marcelo Tsuguio; LOPES, William Aparecido Celestino; ANTUNES, Samira Nascimento; FERNANDES, Marcelo Eloy; NÄÄS, Irenilza de Alencar; VENDRAMETTO, Oduvaldo. **An Architecture to Identify Aromatic Herbs using Augmented Reality (AR) and Mobile Application.** *WSEAS Transactions on Environment and Development*, v. 19, p. 1459–1467, 2023. DOI: <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.132>

FLYVBJERG, Bent. **Five misunderstandings about case-study research.** *Qualitative Inquiry*, v. 12, n. 2, p. 219-245, 2006. DOI: 10.1177/1077800405284363

GEHANI, Ray R. **Corporate Brand Value Shifting from Identity to Innovation Capability: from Coca-Cola to Apple.** *Journal of Technology Management & Innovation*, v. 11, n. 3, p. 11–20, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-27242016000300002>

GERRING, John. **Case Study Research: Principles and Practices.** [s.l.]: Cambridge University Press, 2006. ISBN 9781139460385.

GHOBAKHLOO, Morteza. **Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability.** *Journal of Cleaner Production*, v. 252, p. 119869, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>

GOLOVIANKO, Mariia; TERZIYAN, Vagan; BRANYTSKYI, Vladyslav; MALYK, Diana. **Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid.** *Procedia Computer Science*, v. 217, p. 102–113, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.041>

GRABOWSKA, Sandra; SANIUK, Sebastian; GAJDZIK, Bożena. **Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0.** *Scientometrics*, v. 127, n. 6, p. 3117–3144, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-022-04370-1>

HUANG, Sihan; WANG, Baicun; LI, Xingyu; ZHENG, Pai; MOURTZIS, Dimitris; WANG, Lihui. **Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution.** *Journal of Manufacturing Systems*, v. 64, p. 424–428, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.010>

JANSSEN, Tim; MÜLLER, Daniel; MANN, David L. **From Natural Towards Representative Decision Making in Sports: A Framework for Decision Making**

in Virtual and Augmented Environments. *Sports Medicine*, v. 53, n. 10, p. 1851–1864, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01884-3>

JOHANNESSON, Paul; PERJONS, Erik. **An Introduction to Design Science.** Cham: Springer International Publishing, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78132-3>

JOUSSEN, Tim P.; KANBACH, Dominik K.; KRAUS, Sascha. **Enabling Strategic Change Toward Resilience: A Systematic Review From a Dynamic Capabilities Perspective.** *Strategic Change*, v. 34, n. 3, p. 373–405, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsc.2626>

KERO, Chalchissa Amentie; BOGALE, Addisalem Tadesse. **A Systematic Review of Resource-Based View and Dynamic Capabilities of Firms and Future Research Avenues.** *International Journal of Sustainable Development and Planning*, v. 18, n. 10, p. 3137–3154, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.181016>

KHAMAISSI, Riccardo Karim; PRATI, Elisa; PERUZZINI, Margherita; RAFFAELI, Roberto; PELLICCIARI, Marcello. **UX in AR-Supported Industrial Human–Robot Collaborative Tasks: A Systematic Review.** *Applied Sciences*, v. 11, n. 21, p. 10448, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112110448>

KNOPPEN, Desirée; KNIGHT, Louise. **Pursuing sustainability advantage: The dynamic capabilities of born sustainable firms.** *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 4, p. 1789–1813, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2984>

LAMPROPOULOS, Georgios; KERAMOPOULOS, Euclid; DIAMANTARAS, Konstantinos; EVANGELIDIS, Georgios. **Augmented Reality and Gamification in Education: A Systematic Literature Review of Research, Applications, and Empirical Studies.** *Applied Sciences*, v. 12, n. 13, p. 6809, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136809>

LASI, Heiner; FETTKE, Peter; KEMPER, Hans-Georg; FELD, Thomas; HOFFMANN, Michael. **Industry 4.0.** *Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

LAUGWITZ, Bettina; HELD, Theo; SCHREPP, Martin. Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire. In: HOLZINGER, Andreas (Org.). *HCI and Usability for Education and Work*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. p. 63–76. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-89350-9_6

LENG, Jiewu; SHA, Weinan; WANG, Baicun; ZHENG, Pai; ZHUANG, Cunbo; LIU, Qiang; WUEST, Thorsten; MOURTZIS, Dimitris; WANG, Lihui. **Industry 5.0: Prospect and retrospect.** *Journal of Manufacturing Systems*, v. 65, p. 279–295, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>

LEWIS, James R. **The System Usability Scale: Past, Present, and Future.** *International Journal of Human–Computer Interaction*, v. 34, n. 7, p. 577–590, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307>

LI, Xiao; YI, Wen; CHI, Hung-Lin; WANG, Xiangyu; CHAN, Albert P.C. **A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety.** *Automation in Construction*, v. 86, p. 150–162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.003>

LOPES, William Aparecido Celestino; FERNANDES, João Carlos Lopes; ANTUNES, Samira Nascimento; FERNANDES, Marcelo Eloy; NÄÄS, Irenilza de Alencar; VENDRAMETTO, Oduvaldo; OKANO, Marcelo Tsuguio. **Augmented Reality Applied to Identify Aromatic Herbs Using Mobile Devices.** *AgriEngineering*, v. 6, n. 3, p. 2824–2844, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030164>

LOPES, William Aparecido Celestino; RUGGERO, Sergio Miele; VENDRAMETTO, Oduvaldo; OKANO, Marcelo Tsuguio. **Augmented Reality in Industry 5.0: Customizing production to optimize operational processes and technical training of operators.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMMUNICATION AND COMPUTER ENGINEERING (ICECCE), Istanbul. IEEE, 2025.

LOPES, William Aparecido Celestino; RUSTEIKO, Adilson Cunha; MENDES, Cleiton Rodrigues; HONÓRIO, Nicolas Vinicius Cruz; OKANO, Marcelo Tsuguio. **Optimization of New Project Validation Protocols in the Automotive Industry: A Simulated Environment for Efficiency and Effectiveness.** *Journal of Computing and Communication Engineering (JCCE)*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE52024627>

LU, Guoying; QU, Siyuan; CHEN, Yining. **Understanding user experience for mobile applications: a systematic literature review.** *Discover Applied Sciences*, v. 7, n. 6, p. 587, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07170-3>

LUTHER, Laura; TIBERIUS, Victor; BREM, Alexander. **User Experience (UX) in Business, Management, and Psychology: A Bibliometric Mapping of the Current State of Research.** *Multimodal Technologies and Interaction*, v. 4, n. 2, p. 18, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/mti4020018>

MARDANI, Abbas; JUSOH, Ahmad; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; *et al.* Sustainable and Renewable Energy: An Overview of the Application of Multiple Criteria Decision Making Techniques and Approaches. **Sustainability**, v. 7, n. 10, p. 13947–13984, 2015. <https://doi.org/10.3390/su71013947>

MARINO, Emanuele; BARBIERI, Loris; SOLLAZZO, Christian; BRUNO, Fabio. **An augmented reality tool to support Industry 5.0 operators in product assembly activities.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 135, n. 9, p. 4941–4961, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14777-0>

MARTINS, Nuno Cid; MARQUES, Bernardo; ALVES, João; ARAÚJO, Tiago; DIAS, Paulo; SANTOS, Beatriz Sousa. **Augmented reality situated visualization in decision-making.** *Multimedia Tools and Applications*, v. 81, n. 11, p. 14749–14772, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10735-7>

MELE, Gioconda; CAPALDO, Guido; SECUNDO, Giustina; CORVELLO, Vincenzo. **Revisiting the idea of knowledge-based dynamic capabilities for digital transformation.** *Journal of Knowledge Management*, v. 28, n. 2, p. 532–563, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/JKM-02-2023-0121>

MERRIAM, Sharan B. **Qualitative research and case study applications in education: revised and expanded from “Case study research in education.** *San Francisco: Jossey-Bass Publishers*, 1998. ISBN 978-0-7879-1009-9.

MORALES MÉNDEZ, Ginés; DEL CERRO VELÁZQUEZ, Francisco. **Impact of Augmented Reality on Assistance and Training in Industry 4.0: Qualitative Evaluation and Meta-Analysis.** *Applied Sciences*, v. 14, n. 11, p. 4564, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114564>

MORTAZAVI, Ehsan; DOYON-POULIN, Philippe; IMBEAU, Daniel; TARAGHI, Mitra; ROBERT, Jean-Marc. **Exploring the Landscape of UX Subjective Evaluation Tools and UX Dimensions: A Systematic Literature Review (2010–2021).** *Interacting with Computers*, v. 36, n. 4, p. 255–278, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/iwc/iwae017>

MOURTZIS, Dimitris; ANGELOPOULOS, John; PANOPOULOS, Nikos. **Smart Manufacturing and Tactile Internet Based on 5G in Industry 4.0: Challenges, Applications and New Trends.** *Electronics*, v. 10, n. 24, p. 3175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10243175>

MÜLLER, Maïke; STEGELMEYER, Dirk; MISHRA, Rakesh. **Development of an augmented reality remote maintenance adoption model through qualitative analysis of success factors.** *Operations Management Research*, p. 1–30, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00356-1>

NAHAVANDI, Saeid. **Industry 5.0—A Human-Centric Solution.** *Sustainability*, v. 11, n. 16, p. 4371, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11164371>

NTOA, Stavroula; MARGETIS, George; ANTONA, Margherita; STEPHANIDIS, Constantine. **User Experience Evaluation in Intelligent Environments: A Comprehensive Framework.** *Technologies*, v. 9, n. 2, p. 41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9020041>

PATEL, Vishal; CHESMORE, Austin; LEGNER, Christopher M.; PANDEY, Santosh. **Trends in Workplace Wearable Technologies and Connected-Worker Solutions for Next-Generation Occupational Safety, Health, and Productivity.** *Advanced Intelligent Systems*, v. 4, n. 1, p. 2100099, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.202100099>

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus A.; CHATTERJEE, Samir. **A Design Science Research Methodology for Information Systems Research.** *Journal of Management Information Systems*, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

PEGETTI, A. **Apoio multicritério à decisão: teoria, métodos e aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, 2014. ISBN 978-8521623645.

PERRIG, Sebastian A. C.; AESCHBACH, Lena Fanya; SCHAROWSKI, Nicolas; VON FELTEN, Nick; OPWIS, Klaus; BRÜHLMANN, Florian. **Measurement practices in user experience (UX) research: a systematic quantitative literature review**. *Frontiers in Computer Science*, v. 6, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcomp.2024.1368860>

PITELIS, Christos N.; TEECE, David J.; YANG, Hongyi. **Dynamic Capabilities and MNE Global Strategy: A Systematic Literature Review-Based Novel Conceptual Framework**. *Journal of Management Studies*, v. 61, n. 7, p. 3295–3326, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/joms.13021>

RAME, Rame; PURWANTO, Purwanto; SUDARNO, Sudarno. **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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173>

RANI, Sunanda; JINING, Dong; SHOUKAT, Khadija; SHOUKAT, Muhammad Usman; NAWAZ, Saqib Ali. **A Human–Machine Interaction Mechanism: Additive Manufacturing for Industry 5.0—Design and Management**. *Sustainability*, v. 16, n. 10, p. 4158, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104158>

REDDY, Kotapati Srinivasa. **Beating the Odds! Build theory from emerging markets phenomenon and the emergence of case study research—A “Test-Tube” typology**. *Cogent Business & Management*, v. 2, n. 1, p. 1037225, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311975.2015.1037225>

REJEB, Abderahman; KEOGH, John G.; WAMBA, Samuel Fosso; TREIBLMAIER, Horst. **The potentials of augmented reality in supply chain management: a state-of-the-art review**. *Management Review Quarterly*, v. 71, n. 4, p. 819–856, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11301-020-00201-w>

REJEB, Abderahman; REJEB, Karim; KEOGH, John G. **Enablers of Augmented Reality in the Food Supply Chain: A Systematic Literature Review**. *Journal of Foodservice Business Research*, v. 24, n. 4, p. 415–444, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15378020.2020.1859973>

RUSU, Cristian; RUSU, Virginica; RONCAGLIOLO, Silvana; GONZÁLEZ, Carina. **Usability and User Experience: What Should We Care About?** *International Journal of Information Technologies and Systems Approach (IJITSA)*, v. 8, n. 2, p. 1–12, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4018/IJITSA.2015070101>

SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. [s.l.]: McGraw-Hill International Book Company, 1980. ISBN 978-0070543713.

SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

SALVATO, Carlo; VASSOLO, Roberto. **The sources of dynamism in dynamic capabilities**. *Strategic Management Journal*, v. 39, n. 6, p. 1728–1752, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/smj.270>

SEELIGER, Arne; CHENG, Long; NETLAND, Torbjørn. **Augmented reality for industrial quality inspection: An experiment assessing task performance and human factors.** *Computers in Industry*, v. 151, p. 103985, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103985>

SENTHIL, G. A.; PRABHA, R.; SRIDEVI, S.; NITHYASHRI, J.; SUGANYA, A. **A Novel Meta-analysis and Classification of Herbal Medicinal Plant Raw Materials for Food Consumption Prediction Using Hybrid Deep Learning Techniques Based on Augmented Reality in Computer Vision.** In: TRIPATHI, Ashish Kumar; ANAND, Darpan; NAGAR, Atulya K. (orgs.). *Proceedings of World Conference on Artificial Intelligence: Advances and Applications*. Singapore: Springer Nature, 2024. p. 1–24. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4496-1_1

SIEMS, Erik; LAND, Anna; SEURING, Stefan. **Dynamic capabilities in sustainable supply chain management: An inter-temporal comparison of the food and automotive industries.** *International Journal of Production Economics*, v. 236, p. 108128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108128>

SONNENBERG, Christian; VOM BROCKE, Jan. **Evaluation Patterns for Design Science Research Artefacts.** In: HELFERT, Markus; DONNELLAN, Brian (orgs.). *Practical Aspects of Design Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. p. 71–83. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33681-2_7

SORDI, José Osvaldo De. **Design Science Research Methodology: Theory Development from Artifacts.** Cham: Springer Nature, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82156-2>

STAKE, Robert E. **The art of case study research.** 1. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 1995. 192 p. ISBN 978-0803957671.

STEININGER, Dennis M.; MIKALEF, Patrick; PATELI, Adamantia; ORTIZ-DE-GUINEA, Ana. **Dynamic Capabilities in Information Systems Research: A Critical Review, Synthesis of Current Knowledge, and Recommendations for Future Research.** *Journal of the Association for Information Systems*, v. 23, n. 2, p. 447–490, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17705/1jais.00736>

SUN, Peng; ZHAO, Yao; MEN, Jie; MA, Zhe-Ru; JIANG, Hao-Zhuo; LIU, Cheng-Yan; FENG, Wei. **Application of Virtual and Augmented Reality Technology in Hip Surgery: Systematic Review.** *Journal of Medical Internet Research*, v. 25, n. 1, p. e37599, 2023. DOI: <https://doi.org/10.2196/37599>

SURR, Claire A.; SASS, Cara; BURNLEY, Natasha; DRURY, Michelle; SMITH, Sarah J.; PARVEEN, Sahdia. **Components of impactful dementia training for general hospital staff: a collective case study.** *Aging & Mental Health*, v. 24, n. 3, p. 511–521, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/13607863.2018.1531382>

SYED, Toqeer Ali; SIDDIQUI, Muhammad Shoaib; ABDULLAH, Hurria Binte; JAN, Salman; NAMOUN, Abdallah; ALZAHRANI, Ali; NADEEM, Adnan; ALKHODRE, Ahmad B. **In-Depth Review of Augmented Reality: Tracking Technologies, Development Tools, AR Displays, Collaborative AR, and Security Concerns.** *Sensors*, v. 23, n. 1, p. 146, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23010146>

TEECE, D. J. **Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance.** *Strategic Management Journal*, v. 28, n. 13, p. 1319–1350, 2007. DOI: [10.1002/smj.640](https://doi.org/10.1002/smj.640).

TEECE, D. J.; PISANO, G.; SHUEN, A. **Dynamic capabilities and strategic management.** *Strategic Management Journal*, v. 18, n. 7, p. 509–533, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)

TÓTH, Attila; NAGY, László; KENNEDY, Roderick; BELEJ, Bohuš; ABONYI, János; RUPPERT, Tamás. **The human-centric Industry 5.0 collaboration architecture.** *MethodsX*, v. 11, p. 102260, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102260>

TRSTENJAK, Maja; BENEŠOVA, Andrea; OPETUK, Tihomir; CAJNER, Hrvoje. **Human Factors and Ergonomics in Industry 5.0 - A Systematic Literature Review.** *Applied Sciences*, v. 15, n. 4, p. 2123, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15042123>

UNITED NATIONS. *Sustainable Development Goals*. New York: United Nations, 2024. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>. Acesso em: 6 jul. 2025.

VAIDYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh. **Industry 4.0 – A Glimpse.** *Procedia Manufacturing*, v. 20, p. 233–238, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>

VARGAS, Luis G. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 2–8, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-H)

VENABLE, John; PRIES-HEJE, Jan; BASKERVILLE, Richard. **FEDS: a Framework for Evaluation in Design Science Research.** *European Journal of Information Systems*, v. 25, n. 1, p. 77–89, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36>

VIRVOU, Maria. **Artificial Intelligence and User Experience in reciprocity: Contributions and state of the art.** *Intelligent Decision Technologies*, v. 17, n. 1, p. 73–125, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3233/IDT-230092>

VOM BROCKE, Jan; MAEDCHE, Alexander. **The DSR grid: six core dimensions for effectively planning and communicating design science research projects.** *Electronic Markets*, v. 29, n. 3, p. 379–385, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12525-019-00357-1>

WHITE, Robert E.; COOPER, Karyn. **Case study research. Qualitative research in the post-modern era: critical approaches and selected methodologies.** Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 233–285. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85124-8_7.

XIANG, Wei; YU, Kan; HAN, Fengling; FANG, Le; HE, Dehua; HAN, Qing-Long. **Advanced manufacturing in Industry 5.0: a survey of key enabling technologies and future trends.** *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 20, n. 2, p. 1055–1068, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3274224>

XIONG, Jianghao; HSIANG, En-Lin; HE, Ziqian; ZHAN, Tao; WU, Shin-Tson. **Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives**. *Light: Science & Applications*, v. 10, n. 1, p. 216, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8>

XU, Xun; LU, Yuqian; VOGEL-HEUSER, Birgit; WANG, Lihui. **Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, conception and perception**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 61, p. 530–535, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>

YAZDI, Mohammad. **Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in Maintenance Training**. In: YAZDI, Mohammad (org.). *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 169–183. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-53514-7_10

YIN, Robert K. **Case study research and applications: design and methods**. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2017. ISBN 978-1-5063-3618-3.

APÊNDICE A – Artigo 1 – Baseline AutoSim - Optimization of New Project Validation Protocols in the Automotive Industry: A Simulated Environment for Efficiency and Effectiveness

<https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE52024627>

Received: 24 October 2024 | Revised: 10 December 2024 | Accepted: 9 January 2025 | Published online: 19 February 2025

RESEARCH ARTICLE

Journal of Computational and Cognitive Engineering

2025, Vol. 8(3) 343–354

DOI: 10.47852/bonviewJCCE52024627

Optimization of New Project Validation Protocols in the Automotive Industry: A Simulated Environment for Efficiency and Effectiveness

William Aparecido Cristino Lopes^{1,2}, Adilson Cunha Rustriko³, Cleiton Rodrigues Mendes¹, Nicolas Viciñis Cruz Hinojito¹ and Marcelo Tsaguis Otano^{2,3}

¹The Brazilian National Service for Industrial Training, Brazil

²Department of Graduate Program in Production Engineering, Paulista University, Brazil

³Salvador Arena Foundation Educational Center, Brazil

Abstract: Increasing vehicle manufacturing has led to a considerable rise in the automotive industry's competitiveness. Various research projects are being developed to devise process optimization strategies using virtual simulation. The paper discusses the importance of applying modeling and simulation strategies to optimize automotive manufacturing processes to meet the demands of a constantly evolving market. The aim is to demonstrate a strategy divided into a few stages to optimize the process of validating new projects applied in the automotive industry. The methodology employed was computer modeling and simulation, which enabled identifying and attenuating risks inherent in the validation process, thereby reducing the time required to complete new projects. The results demonstrated that implementing this strategy facilitated an efficient transition of the validation process, maintaining the quality and safety standards required in the call. Consequently, it can be posited that the methodology developed is an efficacious instrument for expediting the implementation of novel processes in automotive manufacturing, thereby contributing to the competitiveness and innovation of the industry in the automotive segment.

Keywords: automotive industry, modeling, new projects, optimization, validation process, virtual simulation

1. Introduction

The necessity for adaptability to serve the universal systems market competitively is a perennial challenge faced by the industry. Considering the rapid technological evolution and the varying customer demands, companies must continuously adapt to remain relevant. This adaptability is not limited to the end products but also encompasses the manufacturing processes. New approaches and strategies are consistently sought to ensure efficiency and agility in production. This pursuit of adaptability is essential to keep pace with the market changes and ensure that companies remain competitive [1].

Software applications are pivotal in evaluating potential scenarios resulting from implementing new projects. Using simulation and modeling tools enables companies to anticipate the consequences of alterations to manufacturing processes, thereby minimizing risks and optimizing resources. This software enables the analysis of diverse scenarios, facilitating decision-making and strategic planning. Consequently, investment in simulation

technologies is crucial for the efficiency and competitiveness of industrial operations [2].

The assessment of physical and procedural risks during the production of new products through the interaction of industrial robots represents a critical stage in the development of automated processes. Integrating robots into the production line brings a series of challenges related to safety and operational efficiency. It is therefore necessary to carefully assess the possible risks associated with the tasks performed by the robots, as well as the possible process failures that could occur. It is of the utmost importance to identify these risks early, as this allows prevention and mitigation measures to be implemented, thus ensuring the safety of workers and the integrity of the equipment [3].

The necessity to reduce the validation time for new projects involving robotic systems is a common objective among companies in the automotive sector. The validation process is pivotal in developing new products and technologies, ensuring they meet the established quality and performance requirements. However, the time needed to validate a new project fully can be considerable, which may impact on the time to market and the company's competitiveness [4].

The article presents the following problem: how can virtual modeling and simulation optimize the validation process

^{*}Corresponding author: Marcelo Tsaguis Otano, Department of Graduate Program in Production Engineering, Paulista University, Brazil. Email: marcelo.otano@unipa.br

of new processes applied in automobile manufacturing, reducing implementation time and, consequently, the associated costs? The research questions that guide this study are:

- 1) What are the specific benefits of simulation in optimizing validation time?
- 2) How does the implementation of robotics techniques contribute to reducing the development time of new processes?

This article contributes by exploring the application of virtual modeling and simulation to optimize the validation process of new robotic systems in automotive production, with a focus on reducing implementation time and eliminating operational bottlenecks. The research seeks to show how these techniques can improve the efficiency and competitiveness of the industry.

2. Literature Review

2.1. Modeling and simulation of industrial robots using software

The modeling and simulation of industrial robots using software plays a fundamental role in developing and optimizing automation processes [5]. The need to perform modeling and simulation is crucial to ensure the effectiveness and efficiency of robot operations in various industrial sectors [6]. Through virtual simulation, it is possible to evaluate and validate different robot control and motion strategies before implementation, significantly reducing the time and cost of developing new robotic systems [7].

Deep learning applications, such as convolutional neural networks (CNNs), and augmented reality (AR) technologies have shown great potential in optimizing industrial processes. The implementation of these technologies improves accuracy in object identification and classification, minimizes failures, and speeds up decision-making. In the automotive context, AR can be used to overlay visual instructions on the physical environment, reducing errors during product verification. Models based on CNNs, such as YOLO v8, offer high accuracy in real time, increasing the efficiency of production lines and reinforcing quality control in critical processes [8, 9].

This approach also makes it possible to identify potential problems and optimize robot performance in complex and dynamic environments [10].

When modeling and simulating industrial robots using software, it is essential to consider several specific elements and characteristics. These include the robot's geometry and kinematics, such as dimensions, joints, and motion constraints [11]. In addition, it is essential to accurately model the robot's sensors and actuators, as well as the characteristics of the working environment, such as obstacles, surfaces, and lighting conditions [12]. Proper modeling of these elements is essential to ensure the simulations' accuracy and reliability and provide realistic and valuable results for the design and development of robotic systems [13].

Some programs stand out when it comes to modeling and simulating industrial robots, such as Simulink, part of MATLAB from MathWorks [14], RobotStudio developed by ABB [15], Webots developed by Cyberbotics [16], and CoppeliaSim from Coppelia Robotics [17]. CoppeliaSim is a versatile and powerful platform for accurately modeling robots, environments, and automation processes. With its intuitive interface and wide range of features, CoppeliaSim is widely used in industrial robotics and automation research, development, and education [18].

Software to model and simulate industrial robots covers various fields and industries. These include automotive manufacturing, where CoppeliaSim simulates assembly, welding, painting, and parts handling processes [19]. In addition, robot simulation is used in

logistics, healthcare, agriculture, and services sectors, where robots play an increasingly significant role in automating tasks [20]. The application of industrial robot modeling and simulation is diverse and broad, demonstrating its potential in different contexts and industries [21].

Software modeling and simulation of industrial robots have a variety of practical applications. For example, in automotive manufacturing, virtual simulation is used to optimize production line layout, define robot motion paths, and validate new assembly processes [22]. In logistics environments, robot simulation is used to plan transportation routes, optimize material flow, and maximize operational efficiency [23]. Robot simulation is also used in healthcare scenarios, where surgical robots are simulated to train surgeons and plan procedures [24]. These examples illustrate the versatility and usefulness of modeling and simulating industrial robots in various contexts and practical applications.

Despite the benefits of software-based modeling and simulation of industrial robots, significant challenges are associated with its implementation. These include the complexity of modeling and simulating robotic systems, which require specialized engineering and programming skills [25]. In addition, the validation of simulation models against real systems can be complex due to variations in the dynamics of the environment and operating conditions [26]. Integrating different software and hardware systems can also be challenging, requiring platform interoperability and compatibility [27].

Current and future market requirements reflect the growing need for software-based modeling and simulation of industrial robots. With the rapid evolution of robot technology, the demand for simulation and optimization tools is expected to grow [28]. This includes the need for more realistic and accurate simulations that consider physical interactions, material dynamics, and the behavior of complex systems [29]. In addition, integrating artificial intelligence and machine learning techniques is expected to improve the ability to predict and optimize the performance of robotic systems through simulation [30]. These trends highlight the continued importance of modeling and simulation of industrial robots as an essential tool for innovation and advancement of automation in various sectors and industries.

2.2. Robotic cells applied to automotive manufacturing processes

The use of robotic cells in automotive manufacturing is vital for increasing industrial operations' efficiency, quality, and productivity [31]. The need for robotic cells is driven by the increasing complexity of automotive manufacturing processes, which require precision, repeatability, and flexibility [32]. Robotic cells allow for the automation of repetitive and hazardous tasks, freeing workers for more skilled activities and reducing the risk of workplace accidents [33]. Integrating robotics into automotive manufacturing processes allows faster response to market demands, mass production of customized vehicles, and adaptation to changing consumer preferences [34].

The application of augmented reality (AR) in industrial environments offers an efficient means of overlaying virtual information on the physical environment in real time. In the automotive context, this technology allows rapid identification of components, improves interaction between operators and systems, and reduces operational errors during product verification. Implementing AR also makes it easier to visualize assembly steps and safety standards, optimizing processes and minimizing training time. Thus, AR can be integrated into new product validation protocols to ensure compliance and efficiency, promoting a more dynamic and safe work environment [35].

Several elements and characteristics must be considered when designing a robotic cell applied to automotive manufacturing processes to ensure its effectiveness and efficiency. Among the most critical elements to consider are industrial robots, the fixturing and transport devices, the vision and sensor systems, and the control and monitoring systems [36]. Each component of the robotic cell must be designed and sized to meet the specific requirements of the manufacturing process, ensuring integration and interoperability between the different elements [37]. Operator safety and compliance with occupational health and safety regulations must be considered at all stages of the design and implementation of the robotic cell [38].

There are numerous practical applications for robotic cells in automotive manufacturing, ranging from component assembly to quality inspection [39]. Industrial robots are used on assembly lines to precisely manipulate and position parts to ensure fast and accurate assembly [40]. Another scenario is collaborative robots, which are increasingly used in welding, painting, and inspection processes, where they work side by side with human operators to increase efficiency and quality [41]. Other applications include automated material handling, surface polishing, and the application of adhesives and sealants to automotive components [42].

It should also be noted that implementing robotic cells in automotive manufacturing also faces significant challenges. One of the main challenges is the integration of different technologies and systems, which may have different origins and interfaces, making communication and coordination between the components of the cell complex [43]. Another difficulty is that programming and optimizing the robots to meet the specific requirements of the manufacturing process can be complex and time-consuming, requiring specialized knowledge of control and automation engineering [44]. Ensuring operator safety and preventing collisions between robots and equipment are also significant challenges, requiring the implementation of advanced collision detection and prevention systems [45].

Current and future market demands highlight the continuous need to develop and improve robotic cells used in automotive manufacturing processes. As technology advances, robotic cells are expected to become even more sophisticated and intelligent, incorporating features such as computer vision, machine learning, and IoT connectivity [46]. These technologies enable closer integration between production and IT systems, allowing data to be

collected and analyzed in real time to optimize cell performance and meet dynamic market demands [47]. Robotic cells are expected to be increasingly flexible and adaptable, automatically reconfiguring themselves to meet changes in product demand and production requirements [48]. The literature on process simulation and optimization in the automotive industry prioritizes reducing cycle time and increasing productivity. Studies such as that by Dias et al. [49] explore tools such as line balancing and 5S to optimize assembly lines. Mayr et al. [50] use a multidimensional approach based on historical data to identify performance scenarios and optimize process planning in the automotive sector.

The layout of workstations is also essential for efficiency and sustainability. Bag et al. [51] highlights its relevance in Industry 4.0 to promote sustainable production and the circular economy. Ebrahimi et al. [52] analyze mixed assembly line configurations and show how different layouts impact operational efficiency.

Although relevant, few studies deal with the validation of new processes, especially in optimizing trajectories to reduce implementation time and eliminate bottlenecks.

Advanced techniques such as the attention mechanism can be adapted to improve the efficiency of automated industrial systems. The application of process simulation, as demonstrated in Chen et al. [53] as well as Liao and He [54], allows the optimization of dynamic interruptions and the anticipation of failures in real time, ensuring that adjustments can be made without operational risks. The simulation offers a controlled environment to test different scenarios, which results in better resource allocation and optimization of robot trajectories, directly impacting failure management and task scheduling. In actual development, this approach reduces costs and improves time, improving security and efficiency. The combination of simulation with reinforcement learning, as proposed in Yang et al. [55], allows continuous improvement, being crucial to guarantee increasingly efficient and adaptable processes in the production environment.

The integration of modeling and simulation concepts with technologies such as machine learning and robotics allows the validation of industrial processes, optimizing trajectories and eliminating operational bottlenecks. To deepen the analysis, a synthesis of studies is presented that highlights the benefits of using these approaches in the context of robotic cells and automotive processes, which can be seen in Table 1.

Table 1
Comparative analysis of SOTA techniques in robotic process validation

Aspect	Venigandla et al. [1]	Soori et al. [2]	Murino et al. [3]	Andronas et al. [4]	Zhang et al. [5]
Focus	Robotic process automation in retail pricing	Virtual manufacturing systems	Risk assessment in cobots	Human-robot collaboration in automotive	Simulation in intelligent manufacturing
Main Methodology	AI-enhanced robotic automation	Literature review	FMEA and PRAT risk assessment	Case studies in automotive workstations	Modeling and simulation
Key Findings	AI optimization improves efficiency	Virtual systems enhance production efficiency	Cobot risk is minimized through combined methodologies	Effective human-robot collaboration in automotive	Simulation optimizes manufacturing processes
Applications	Retail pricing optimization	Industrial manufacturing	Collaborative robotics in industrial tasks	Automotive industry workstations	Intelligent manufacturing environments
Limitations	Focused on retail sector	General manufacturing focus	Limited to risk assessment in cobots	Limited automotive case studies	Focused on manufacturing
Future Work Suggestions	Explore AI in other sectors	Extend virtual systems to new industries	Further study on collaborative robot safety	Explore further human-robot integration	Apply simulation to broader industries

3. Research Methodology

The methodology used in preparing the paper was computer modeling and simulation, which focuses on detailed modeling of the robotic cell and assembly operations in both the virtual simulation and the real cell [56]. The models are validated using real data collected during the operation of the robotic cell. The models are then used to simulate different production scenarios and evaluate the impact of proposed improvements [57].

The simulation was conducted using the CoppeliaSim software, version 4.0.0, with the Lua dynamics and programming modules enabled. The layout of the robotic cell was modeled based on measurements of the physical environment, replicating the dimensions and positioning of the supports. The trajectory modeling included reference points defined as Home, P1, P2, P3, and P4, used to define the robot's trajectory. Operating times were collected through manual timing at eight cycles per movement, with data validated using mean and standard deviation to ensure consistency.

To minimize the impact of validating new projects in the robotic cell and to comply with automotive manufacturing processes, ten steps have been developed to standardize the procedure in an industrial environment:

- 1) Verification that the current parameters correspond to the proposed modifications, such as the robot's work area and reach, the load to be managed, the type of fixture for handling, the trajectory, and the collision analysis.
- 2) Select the robot manufacturer and model in the CoppeliaSim software environment.
- 3) Positioning of the robot in the virtual manufacturing cell.
- 4) Declaration and assignment of the variables involved, such as the robot's work area and reach, the load to be managed, the type of attachment for handling, trajectory, and collision analysis.
- 5) Simulation of the movements excluded by the new process.
- 6) Verification of possible collisions.
- 7) Creation of the program to check the trajectory followed by the robot in the virtual environment.
- 8) Post-processing of the program created in the virtual environment for the language of the selected manufacturing cell.
- 9) Controlled simulation of the new program in the actual environment.
- 10) Validation of the new process in the robotic cell to achieve automotive manufacturing.

3.1. 3D model of robotic cell

The initial stage involved utilizing CoppeliaSim software in version 4.0.0 to delineate the operational region, thereby enabling the newly derived process values to be implemented. The robot was configured with linear values of 3000 mm in each of the three axes,

Figure 1
Real cell x virtual cell

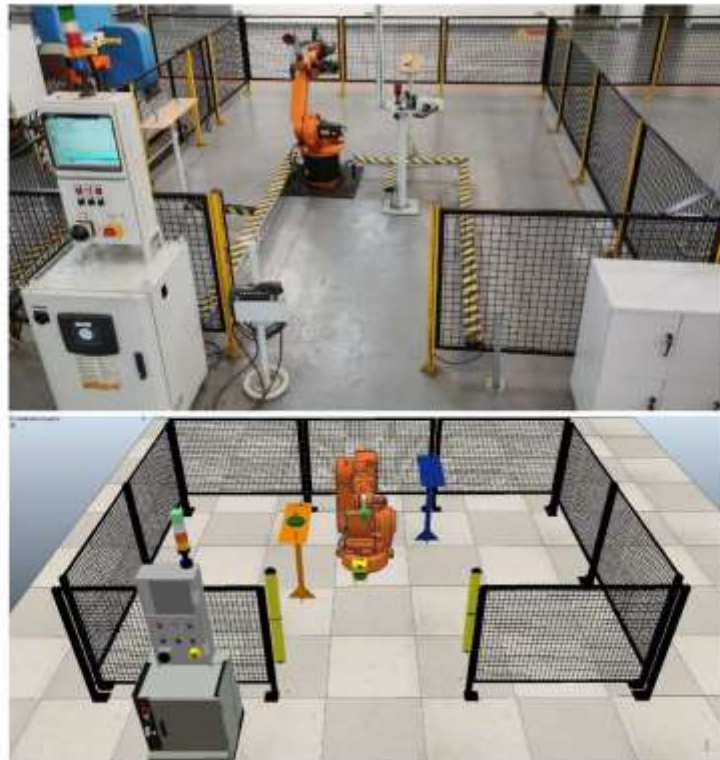


Figure 2
Cell programming

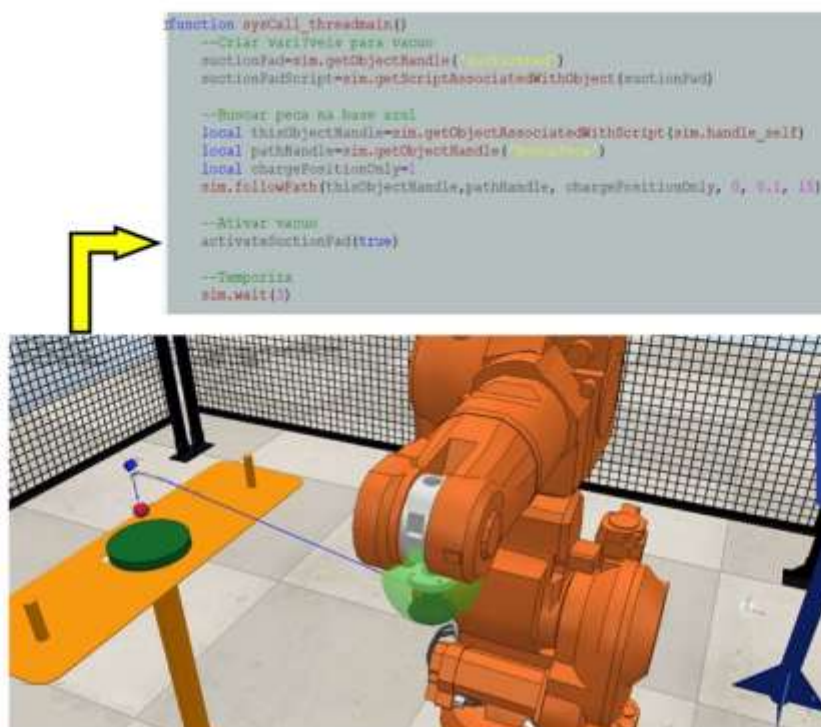


Figure 3
Real programming of the robot after validation of the virtual system

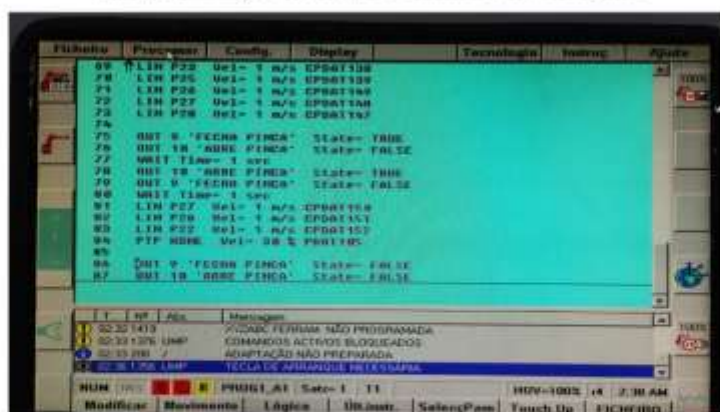
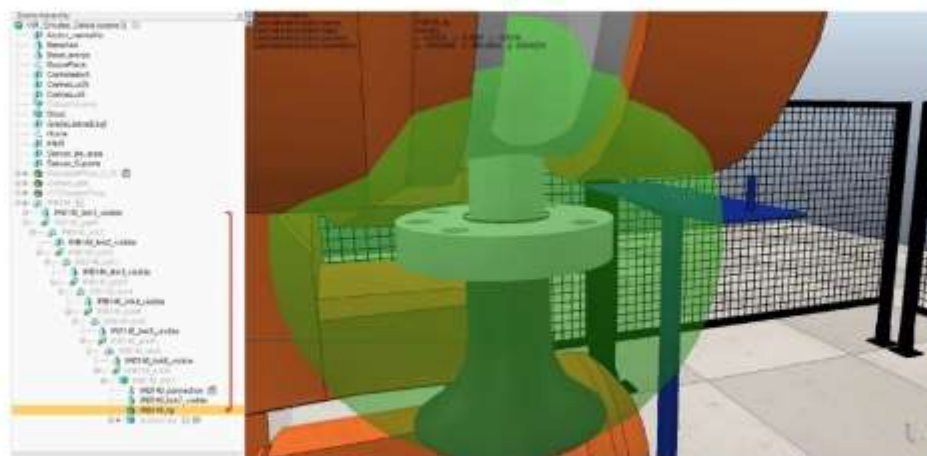


Figure 4
Tool center point



The next stage involved the creation of a program to define the trajectory traced by the robot. In the eighth stage, the coordinates generated by the program were post-processed to insert the values obtained into the cell. This transformation of the coordinates into ISO language commands for the actual environment enabled the robot to begin operating.

The final stage of the process involves using the actual environment in conjunction with the programming generated and validated by the virtual environment. At this point, the cell has already received all the parameters needed to start the new process, including those relating to the reference, the end-of-travel check, the program directory, and the reduction in axis speed to increase safety during the initial test. The result of this activity can be seen in Figure 2.

Once the simulated programs had been validated in the virtual environment, post-processed, and installed in the robot's directories, they were all validated individually in the cell, respecting the safety procedure. Given the success of the robot's trajectory, characterized by the absence of a collision, the cell was released to conduct the new activity, as shown in Figure 3.

3.2. Cell kinematics

The most crucial aspect of the kinematics of the cell is the study of the robot's movements. To achieve this, it is essential to define the devices' positions, references, trajectories, velocities, and accelerations.

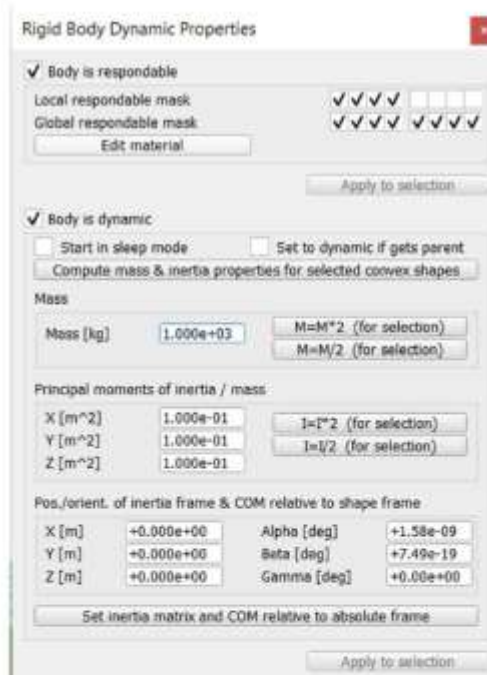
A fundamental procedure for ensuring the accuracy of the positions is the setting of the "TCP" (Tool Center Point), defined as the distance between the center of the flange of the robot's sixth axis and the tip of the tool.

In CoppeliaSim, the TCP is defined by parameterizing the Dummy, which, once inserted, is considered an integral part of the robot in its movements, see in Figure 4.

Another crucial configuration is the definition of the robot's mass in kg, its moment of inertia, and its orientation concerning the angle of the moment of inertia, as illustrated in Figure 5.

For the virtual simulation to correspond to the real process, it is necessary to configure the object's properties by the following

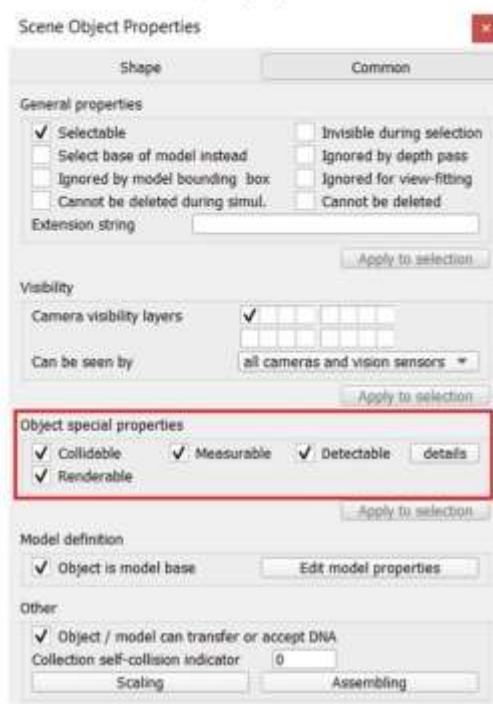
Figure 5
Moment of inertia



specifications: collidable, measurable, detectable, and renderable, as seen in Figure 6.

Once the requisite settings have been established, an interface screen will be displayed upon simulation execution. This screen

Figure 6
Object's properties



allows the user to control the x, y, and z axes following inverse kinematics. The alpha, beta, and gamma axes may also be oriented according to the user's specifications. Furthermore, spatial speed and workspace velocity may be adjusted. Finally, each axis may be individually configured for movement. The result of this activity can be observed in Figure 7.

4. Conclusion

The results found during the project's development were divided into three stages: layout of the actual environment, chrono analysis of the steps of the new process based on the actual environment, and simulation in a virtual environment to obtain the best scenario before validating the new process. The first step involved adapting the cell's previous process to a new trajectory model established in the project. To allow a precise analysis of each movement conducted by the robot, timing was created to identify each step within the cell. The positioning process was then segmented into three parts: updating and efficient movement adjustments. The first stage of the movements involved defining the trajectory, which included leaving the initial position (Home Position) toward support 1, passing through the Home, P1, and P2 marking points. Then, from support 1, it was moved to support 2, passing through points P2 and P3, and finally, support 2 was returned to the initial position, passing through points P4, P3, and Home. These initial movements are represented in Figure 8.

In the second stage, chrono analysis was conducted, recording the eight movements of each phase of the process for visual validation and data insertion in the virtual environment. This ensured that the data provided was concrete and allowed partial analysis of the system's performance before implementation. Detailed records enabled an in-depth understanding of operations, identifying areas for improvement and refinement of the project. This procedure contributed to the precision and reliability of the results, strengthening the validity of the proposed model. This step helped verify bottlenecks and provided a solid basis for decision-making in the development of the validation process, as seen in Table 2.

The third stage began with table data insertion into the CoppeliaSim software to declare the variables, replicating the actual environment. Next, the parameters, including positioning, speeds, and collision analysis, were checked to ensure compliance with the established technical specifications. A new analysis was conducted to optimize the trajectories to achieve the ideal scenario for the new process. This refinement resulted in significant gains in efficiency and performance, adding value to the project.

After generating the favorable scenario, post-processing was conducted on the program developed in the virtual environment by the CoppeliaSim software, using the Lua language

Figure 7
Robot interface

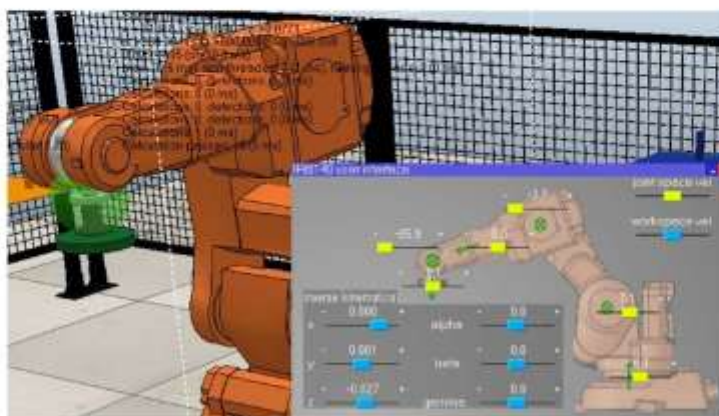


Figure 8
Robot interface



Table 2
Chrono analysis of trajectories

Position of activities	1	2	3
Description	Home Position to Support 1	Support 1 to Support 2	Support 2 to Home Position
1st timing	3.06	5.85	2.53
2nd timing	2.97	5.85	2.47
3rd timing	3.09	5.88	2.56
4th timing	2.91	5.56	2.40
5th timing	3.15	6.20	2.62
6th timing	2.97	5.67	2.45
7th timing	3.03	5.82	2.50
8th timing	3.10	6.12	2.50
Meantime (s)	3.03	5.87	2.50
Accumulated time (s)	3.03	8.09	11.4

for the KUKA Robot Language (KRL) to prepare it for insertion into the cell robot for actual manufacturing. This process involved converting code coordinates to ensure proper compatibility and functionality in the physical environment. Finally, the post-processed program was successfully inserted into the real cell, as shown in Figure 9.

Eliminating the risk of robot collisions within the manufacturing cell was one of the main advances achieved, ensuring the safety of the equipment and the integrity of the work environment. The simulation of different scenarios in the virtual environment allowed the search for the best positions, optimizing trajectories, and directly reflecting on the robot's manipulation speed.

One of the points analyzed in the study was the possibility of validating new processes derived from existing activities, which provided continuous development and improvement of industrial practices. Reducing the time and total costs involved in developing new projects was another benefit achieved, resulting in savings in financial resources and time for companies in the automotive sector. Table 3 compares the scenarios before and after the optimization,

based on the times presented in Table 1 to present the impact of the improvement.

In Table 2, it is possible to visualize the result by comparing the times before and after optimizing the trajectories, highlighting the reduction obtained in each activity and the impact on the total cycle execution time.

Although the results are promising, the study has limitations. The generalization of the results is restricted, as the simulation used specific parameters and configurations, not reflecting the diversity of layouts and equipment in different factories. The complexity of optimization algorithms and the need for constant adjustments can represent challenges in the practical context of the automotive industry, especially in relation to operational demands and delivery times. Unforeseen factors, such as sensor failures and environmental variations (temperature, humidity), were not considered and may affect the applicability of the results in real scenarios.

The study demonstrated the effectiveness of trajectory optimization in validating automotive processes, reducing implementation time and eliminating operational bottlenecks.

Figure 9
Validation of the new process in the virtual environment



Table 3
Comparing the times before and after optimizing

Activity	Initial time (s)	Optimized time (s)	Reduction (s)	Reduction (%)
Home position to Support 1	3.03	2.80	0.23	7.59
Support 1 to Support 2	5.06	4.74	0.32	6.32
Support 2 to Home position	3.31	2.98	0.33	9.97
Total	11.40	10.52	0.88	7.72

Recommendations

The steps conducted in this study provided advances in validating new projects in the automotive industry. Eliminating the risk of robot collisions within the manufacturing cell was one of the main results obtained, ensuring the safety of the equipment and the integrity of the work environment. Furthermore, the simulation of different scenarios in the virtual environment allowed the search for the best positions and the optimization of trajectories, directly reflecting on the robot's manipulation speed.

Also noteworthy is the possibility of validating new processes derived from existing activities, which provided industrial practices' development and continuous improvement. Another positive point observed was the reduction in time and total costs involved in developing new projects, resulting in savings in financial resources and time for companies in the automotive sector.

Future research can explore the application of trajectory optimization in different factory layouts, such as in-line arrangements, production cells, or modular layouts. For example, simulations can be used to test how rearranging workstations impacts robot delivery speed and material flow. Variations in machine configurations, such as the inclusion of collaborative robots or adjustments to storage areas, can be demonstrated. Simulated data can be compared to actual cycle time and cost specifications, offering actionable insights for real-time adjustments and measurable improvements in the production environment.

Ethical Statement

This study does not contain any studies with human or animal subjects performed by any of the authors.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest to this work.

Data Availability Statement

Data are available on request from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contribution Statement

William Aparecido Celestino Lopes: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **Adilson Cunha Rusteiko:** Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **Cleiton Rodrigues Mendes:** Conceptualization, Methodology, Software, Investigation, Resources, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **Nicolas Vinicius Cruz Honório:** Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **Marcelo Tsuguio Okano:** Validation, Formal analysis, Data curation, Supervision, Project administration.

References

- [1] Venigandla, K., Vemuri, N., Thaneeru, N., & Tatikonda, V. M. (2023). Leveraging AI-enhanced robotic process automation for retail pricing optimization: A comprehensive analysis. *Journal*

- of Knowledge Learning and Science Technology, 2(2), 361–370. <https://doi.org/10.60087/jklist.vol2.n2.p370>
- [2] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Advanced virtual manufacturing systems: A review. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 3(3), 2023009. <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2023009>
 - [3] Murino, T., Nardo, M. D., Pollastro, D., Berx, N., Francia, A. D., Decré, W., ..., & Pintelon, L. (2023). Exploring a cobot risk assessment approach combining FMEA and PRAT. *Quality and Reliability Engineering International*, 39(3), 706–731. <https://doi.org/10.1002/qre.3252>
 - [4] Andronas, D., Argyrou, A., Fourtakas, K., Paraskevopoulos, P., & Makris, S. (2020). Design of human robot collaboration workstations — Two automotive case studies. *Procedia Manufacturing*, 52, 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.047>
 - [5] Zhang, L., Zhou, L., Ren, L., & Lai, Y. (2019). Modeling and simulation in intelligent manufacturing. *Computers in Industry*, 112, 3131–3140. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.08.004>
 - [6] Toshev, R., Bengs, D., Helo, P., & Zamora, M. (2024). Advancing free-form fabrication: Industrial robots' role in additive manufacturing of thermoplastics. *Procedia Computer Science*, 232, 3131–3140. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.129>
 - [7] Pereira da Silva, N., Eloy, S., & Resende, R. (2022). Robotic construction analysis: Simulation with virtual reality. *Heliyon*, 8(10), e11039. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11039>
 - [8] Lopes, W. A. C., Fernandes, J. C. L., Antunes, S. N., Fernandes, M. E., Nääs, I. A., Vendrametto, O., & Okano, M. T. (2024). Augmented reality applied to identify aromatic herbs using mobile devices. *AgriEngineering*, 6(3), 2824–2844. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030164>
 - [9] Antunes, S. N., Okano, M. T., Nääs, I. A., Lopes, W. A. C., Aguiar, F. P. L., Vendrametto, O., ..., & Fernandes, M. E. (2024). Model development for identifying aromatic herbs using object detection algorithm. *AgriEngineering*, 6(3), 1924–1936. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030112>
 - [10] Schäffer, E., Metzner, M., Pawlowski, D., & Franke, J. (2021). Seven levels of detail to structure use cases and interaction mechanism for the development of industrial virtual reality applications within the context of planning and configuration of robot-based automation solutions. *Procedia CIRP*, 96, 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.088>
 - [11] Zafar, M. H., Langás, E. F., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769>
 - [12] Anglerud, A., Ekeklä, A., Samarawickrama, K., Sharma, G., & Pieters, R. (2024). Sensor-based human-robot collaboration for industrial tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 86, 102663. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102663>
 - [13] Azamfiri, V., & Psarommatis, F. (2023). Science and technology roadmap towards robotic in-line quality inspection for implementing zero-defect manufacturing. *Procedia CIRP*, 120, 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.018>
 - [14] Bărsan, A., Rac, S.-G., Breaz, R., & Crenganiș, M. (2022). Dynamic analysis of a robot-based incremental sheet forming using Matlab-Simulink Simscape™ environment. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2538–2542. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.134>
 - [15] Chemweno, P., & Arastehfar, S. (2023). Quantifying injury risks of collaborative robots in a manufacturing cell using a simulation approach. *Procedia CIRP*, 120, 607–612. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.046>
 - [16] Vikas, & Parhi, D. R. (2023). Chaos-based optimal path planning of humanoid robot using hybridized regression-gravity search algorithm in static and dynamic terrains. *Applied Soft Computing*, 140, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110236>
 - [17] Rajendran, R., & Arockia Dhanraj, J. (2023). Measurement of payload under variable adhesive force through coppeliasim and validating the design of a wall climbing robot. *Measurement: Sensors*, 29, 100872. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100872>
 - [18] Bogaerts, B., Sels, S., Vanlanduit, S., & Penne, R. (2020). Connecting the CoppeliaSim robotics simulator to virtual reality. *SoftwareX*, 11, 100426. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100426>
 - [19] Montenegro, G., Chacón, R., Fabregas, E., García, G., Schröder, K., Marroquin, A., ..., & Farias, G. (2022). Modeling and control of a spherical robot in the CoppeliaSim simulator. *Sensors*, 22(16), 6020. <https://doi.org/10.3390/s22166020>
 - [20] Lee, I. (2021). Service robots: A systematic literature review. *Electronics*, 10(21), 2658. <https://doi.org/10.3390/electronics10212658>
 - [21] Sharma, S., Kataria, A., & Sandhu, J. K. (2022). Applications, tools and technologies of robotic process automation in various industries. In *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications*, 1067–1072. <https://doi.org/10.1109/DASA54658.2022.9765027>
 - [22] Cao, X., Yao, M., Zhang, Y., Hu, X., & Wu, C. (2024). Digital twin modeling and simulation optimization of transmission front and middle case assembly line. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 139(3), 3233–3253. <https://dx.doi.org/10.32604/cmescs.2023.030773>
 - [23] Li, X., Yang, X., Zhang, C., & Qi, M. (2021). A simulation study on the robotic mobile fulfillment system in high-density storage warehouses. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 112, 102366. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102366>
 - [24] Schmidt, M. W., Köpinger, K. F., Fan, C., Kowalewski, K.-F., Schmidt, L. P., Vey, J., ..., & Nickel, F. (2021). Virtual reality simulation in robot-assisted surgery: Meta-analysis of skill transfer and predictability of skill. *BJS Open*, 5(2), zraa066. <https://doi.org/10.1093/bjsopen/zraa066>
 - [25] Liu, Z., Liu, Q., Xu, W., Wang, L., & Zhou, Z. (2022). Robot learning towards smart robotic manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77, 102360. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102360>
 - [26] Choi, H. S., Crump, C., Duriez, C., Elmquist, A., Hager, G., Han, D., ..., & Trinkle, J. (2021). On the use of simulation in robotics: Opportunities, challenges, and suggestions for moving forward. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(1), e1907856118. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907856118>
 - [27] Wang, Z., Qi, D., Mei, J., Li, Z., Wan, K., & Zhang, J. (2021). Real-time controller hardware-in-the-loop co-simulation testbed for cooperative control strategy for cyber-physical power system. *Global Energy Interconnection*, 4(2), 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2021.05.004>
 - [28] Dziedzickis, A., Subačiūtė-Zemaitienė, J., Šutinys, E., Samukaitė-Bubnienė, U., & Bučinskas, V. (2022). Advanced applications of industrial robotics: New trends and possibilities.

- Applied Sciences*, 12(1), 135. <https://doi.org/10.3390/app12010135>
- [29] Billard, A., & Kragic, D. (2019). Trends and challenges in robot manipulation. *Science*, 364(6446), eaat8414. <https://doi.org/10.1126/science.aat8414>
- [30] Phuyal, S., Bista, D., & Bista, R. (2020). Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: A state of art review. *Sustainable Futures*, 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.sfsr.2020.100023>
- [31] Bartoš, M., Bulej, V., Bohušik, M., Stanček, J., Ivanov, V., & Macek, P. (2021). An overview of robot applications in automotive industry. *Transportation Research Procedia*, 55, 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.052>
- [32] Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic process automation and artificial intelligence in Industry 4.0 — A literature review. *Procedia Computer Science*, 181, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>
- [33] Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M., & Owolabi, H. (2019). Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26, 100868. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100868>
- [34] Axmann, B., & Harmoko, H. (2020). Robotic process automation: An overview and comparison to other technology in Industry 4.0. In *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies*, 559–562. <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9208907>
- [35] Fernandes, J. C. L., Okano, M. T., Lopes, W. A. C., Antunes, S. N., & Vendrametto, O. (2023). An architecture to identify aromatic herbs using augmented reality (AR) and mobile application. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 19, 1459–1467. <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.132>
- [36] Zhang, J., & Fang, X. (2017). Challenges and key technologies in robotic cell layout design and optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(15), 2912–2924. <https://doi.org/10.1177/0954406216642473>
- [37] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Optimization of energy consumption in industrial robots, a review. *Cognitive Robotics*, 3, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.05.003>
- [38] Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>
- [39] Guo, Q., & Su, Z. (2023). The application of industrial robot and the high-quality development of manufacturing industry: From a sustainability perspective. *Sustainability*, 15(16), 12621. <https://doi.org/10.3390/su151612621>
- [40] Licardo, J. T., Domjan, M., & Orehovački, T. (2024). Intelligent robotics — A systematic review of emerging technologies and trends. *Electronics*, 13(3), 542. <https://doi.org/10.3390/electronics13030542>
- [41] Benotsmane, R., Dudás, L., & Kovács, G. (2021). Survey on new trends of robotic tools in the automotive industry. In *Vehicle and Automotive Engineering 3: Proceedings of the 3rd VAE2020*, 443–457. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_38
- [42] Chen, H., Sheng, W., Xi, N., Song, M., & Chen, Y. (2002). Automated robot trajectory planning for spray painting of free-form surfaces in automotive manufacturing. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1, 450–455. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013401>
- [43] Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human-robot collaboration in manufacturing applications: A review. *Robotics*, 8(4), 100. <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>
- [44] Lee, C.-C., Qin, S., & Li, Y. (2022). Does industrial robot application promote green technology innovation in the manufacturing industry? *Technological Forecasting and Social Change*, 183, 121893. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121893>
- [45] Yaacoub, J.-P. A., Noura, H. N., Salman, O., & Chehab, A. (2022). Robotics cyber security: Vulnerabilities, attacks, countermeasures, and recommendations. *International Journal of Information Security*, 21(1), 115–158. <https://doi.org/10.1007/s10207-021-00545-8>
- [46] Arents, J., & Greitans, M. (2022). Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing. *Applied Sciences*, 12(2), 937. <https://doi.org/10.3390/app12020937>
- [47] Batth, R. S., Nayyar, A., & Nagpal, A. (2018). Internet of robotic things: Driving intelligent robotics of future — Concept, architecture, applications, and technologies. In *2018 4th International Conference on Computing Sciences*, 151–160. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2018.00033>
- [48] Grau, A., Indri, M., lo Bello, L., & Sauter, T. (2021). Robots in industry: The past, present, and future of a growing collaboration with humans. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(1), 50–61. <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3008136>
- [49] Dias, P., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Ferreira, L. P., & Santos, T. (2019). Analysis and improvement of an assembly line in the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 38, 1444–1452. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.143>
- [50] Mayr, T., Huber, M. F., Hensel, R., & Keil, M. (2024). Process optimization in process planning using a multidimensional approach in the automotive assembly. *Procedia CIRP*, 126, 751–756. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.303>
- [51] Bag, S., Yadav, G., Dhamija, P., & Kataria, K. K. (2021). Key resources for Industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125233>
- [52] Ebrahimi, M., Mahmoodjanloo, M., Einabadi, B., Baboli, A., & Rother, E. (2023). A mixed-model assembly line sequencing problem with parallel stations and walking workers: A case study in the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 61(3), 993–1012. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2022801>
- [53] Chen, R., Li, W., & Yang, H. (2023). A deep reinforcement learning framework based on an attention mechanism and disjunctive graph embedding for the job-shop scheduling problem. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(2), 1322–1331. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3167380>

- [54] Liao, P., & He, S. (2023). Manufacturing status prediction model based on LSTM with attention mechanism. In *2023 4th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence*, 232–236. <https://doi.org/10.1109/ICECA158670.2023.10176930>
- [55] Yang, Y., Du, H., Xiong, Z., Niyato, D., Jamalipour, A., & Han, Z. (2024). Enhancing wireless networks with attention mechanisms: Insights from mobile crowdsensing. *arXiv Preprint: 2407.15483*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15483>
- [56] Langley, P., & Jones, R. (1988). A computational model of scientific insight. In R. J. Sternberg (Ed.), *The nature of creativity: Contemporary psychological perspectives* (pp. 177–201). Cambridge University Press.
- [57] Summers, R. L. (1998). Computer simulation studies and the scientific method. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 1(2), 119–131.

How to Cite: Lopes, W. A. C., Ruseika, A. C., Mendes, C. R., Honório, N. V. C., & Okano, M. T. (2025). Optimization of New Project Validation Protocols in the Automotive Industry: A Simulated Environment for Efficiency and Effectiveness. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 4(3), 343–354. <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCCE52024627>

APÊNDICE B – Artigo 2 – ARomaticLens - Augmented Reality Applied to Identify Aromatic Herbs Using

<https://doi.org/10.3390/agriengineering6030164>



AgriEngineering



Article

Augmented Reality Applied to Identify Aromatic Herbs Using Mobile Devices

William Aparecido Celestino Lopes ^{1,*} , João Carlos Lopes Fernandes ¹, Samira Nascimento Antunes ¹, Marcelo Eloy Fernandes ², Irenilza de Alencar Nääs ¹ , Oduvaldo Vendrametto ¹ and Marcelo Tsuguio Okano ¹

¹ Graduate Program in Production Engineering, Paulista University, R. Dr. Bacelar 1212, São Paulo 04026-002, Brazil; joao.fernandes1@docente.unip.br (J.C.L.F.); samira.antunes@aluno.unip.br (S.N.A.); irenilza.naas@docente.unip.br (I.d.A.N.); oduvaldo.vendrametto@docente.unip.br (O.V.); marcelo.okano1@docente.unip.br (M.T.O.)

² Faculdade de Tecnologia de Barueri, CEETPS, Barueri 06401-136, Brazil; marceloeloyfernandes@gmail.com

* Correspondence: william.lopes12@aluno.unip.br; Tel.: +55-11-973599558

Abstract: Correctly identifying and classifying food is decisive in food safety. The food sector is constantly evolving, and one of the technologies that stands out is augmented reality (AR). During practical studies at Companhia de Entrepósito e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), responsible for the largest food storage in South America, difficulties were identified in classifying aromatic herbs due to the large number of species. The project aimed to create an innovative AR application called ARomaticLens to solve the challenges associated with identifying and classifying aromatic herbs using the design science research (DSR) methodology. The research was divided into five stages according to the DSR methodology, from surveying the problem situation at CEAGESP to validating the application through practical tests and an experience questionnaire carried out by CEAGESP specialists. The result of the study presented 100% accuracy in identifying the 18 types of aromatic herbs studied when associated with the application's local database without the use of an Internet connection, in addition to a score of 8 on a scale of 0 to 10 in terms of the usability of the interface as rated by users. The advantage of the applied method is that the app can be used offline.

Keywords: augmented reality; aromatic herbs; computer vision; mobile devices



Citation: Lopes, W.A.C.; Fernandes, J.C.L.; Antunes, S.N.; Fernandes, M.E.; Nääs, I.d.A.; Vendrametto, O.; Okano, M.T. Augmented Reality Applied to Identify Aromatic Herbs Using Mobile Devices. *AgriEngineering* **2024**, *6*, 2824–2844. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030164>

Academic Editor: Mariano Crimaldi

Received: 1 May 2024

Revised: 19 July 2024

Accepted: 8 August 2024

Published: 13 August 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Food security is a central concern in the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). Ensuring that the population has access to safe and healthy food is one of the fundamental pillars for achieving these goals [1]. Accurate identification of aromatic herbs is a challenge in combating food waste [2,3].

The convergence of the pillars of Industry 4.0 with food security outlined by the SDGs establishes a strategic point of convergence in the search for efficient solutions to contemporary food challenges [4]. Industry 4.0, represented by technological pillars, such as the Internet of Things (IoT), augmented reality (AR), big data, and artificial intelligence, offers technological opportunities to optimize the processes involved in the food supply chain in addition to increasing operational efficiency, essential for achieving the SDG objectives [5]. Due to the constant evolution of the food sector, innovation plays a crucial role in the technologies present in Industry 4.0. AR plays a prominent role in this scenario due to its versatility [6]. Overlaying food information with the help of AR is increasingly adopted in the food sector due to the ability to merge virtual data with objects in the physical world [7].

Computer vision (CV) is leading the way in automating and improving food identification processes. By employing algorithms obtained through targeted programming and testing, CV becomes capable of discerning the intrinsic characteristics of food, enabling the accurate and rapid classification of food products in different environments, from

production to consumption [8]. Associated with AR, computer vision allows algorithms and machine learning techniques to extract meaningful information from images and videos [9,10].

During technical visits and practical studies carried out at Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), responsible for the largest storage and intermediation of fruits, vegetables, flowers and fish in South America, difficulties experienced by users in classifying aromatic herbs were observed due to the number of species available and the geometric proximity between the types of herbs studied [11].

The study addresses several challenges and gaps in the current methods of identifying aromatic herbs, which it aims to solve with the development of an augmented reality application called ARomaticLens. Below, we highlight five challenges and gaps.

1. **Morphological similarity:** Many aromatic herbs have similar visual characteristics, such as leaf shape, color, and texture, which can lead to misidentification. This similarity is problematic as it compromises food safety and generates economic losses due to incorrect classification. Augmented reality performs better in problems involving morphological similarities, consuming fewer computational resources and data networks [12].
2. **Lack of technical knowledge:** Consumers and even some professionals in the food sector may lack the technical knowledge needed to distinguish between different species of aromatic herbs. This lack of knowledge leads to errors in identification and classification, impacting food safety and quality and becoming an opportunity to use mobile devices with augmented reality [13].
3. **Economic impact:** Incorrect identification of herbs can lead to economic losses, such as withdrawal of products from specific locations, waste, and damage to the companies' reputation. Accurate identification is essential to prevent these economic consequences [14].
4. **Technological limitations:** Current herb identification methods are often limited and require online environments, which may not be feasible in all settings. The proximity of CEAGESP to a provisional detention center limits Internet connectivity due to electromagnetic interference and security restrictions. This restriction prevents the use of cloud-based systems commonly used in augmented reality applications [15].
5. **Efficiency and user experience:** Without advanced technological solutions, the current methods of identifying aromatic herbs are inefficient and do not provide a satisfactory user experience. The traditional printed leaflet method is prone to error and cannot offer detailed, real-time information about the herbs [16].

The ARomaticLens application integrates augmented reality and computer vision to provide an innovative solution, allowing users to identify and classify aromatic herbs offline accurately. It was developed to address these pointed challenges. This application ensures high accuracy, efficiency, and a user-friendly experience, thus improving the overall herb identification and classification [17].

This study aimed to create an AR application called ARomaticLens to solve the challenges associated with identifying and classifying aromatic herbs using the design science research (DSR) methodology [18]. This method will prioritize accuracy, user-friendliness, and efficiency in accessing and retrieving relevant information, allowing users to use the app offline.

2. Background

2.1. Food Security Challenges Involving Aromatic Herbs

The growing demand for fresh, healthy, and safe food requires innovative solutions to guarantee the traceability and quality of products throughout the production chain [19]. The globalization of the food chain and consumers' growing concern about food safety and quality drive the need for efficient traceability systems [20]. Accurate food identification is essential to ensure the traceability and quality of products throughout the production chain, from production to consumption, as the consumption of inadequately identified or classi-

fied foods can result in health risks, including allergic reactions and food poisoning [21]. To meet the growing demand for safe and healthy foods, it is essential that consumers and professionals in the food industry fully recognize and distinguish the foods they use [22].

Aromatic herbs come in various species, many of which have similar visual characteristics. This similarity can lead to errors in identification, compromising food safety and generating losses for the sector [23]. Some factors are problematic when identifying aromatic herbs due to morphological similarities when the species have similar visual characteristics, such as leaf shape, color, and texture [24].

Intraspecific variability refers to the morphological characteristics of aromatic herbs, which can vary within the same species due to climatic conditions, soil, and management [25]. Another demand observed in identifying aromatic herbs is the lack of technical knowledge on the part of consumers, which compromises the result involving the different species available [26]. Furthermore, incorrect food identification can lead to economic losses for the food sector, such as the withdrawal of products from specific locations, waste, and damage to the companies' image [27]. The presence of allergens or unwanted substances mistaken for aromatic herbs can pose additional health risks, especially for those with food allergies. Therefore, food identification and classification challenges are critical for safety [28].

Herb recognition using mobile devices leverages various technologies, including image processing techniques and neural network algorithms, to accurately identify herb species based on their leaves and other characteristics. Various mobile applications have been previously created that utilize deep learning and image processing algorithms to recognize medicinal herbs, with systems achieving high accuracy in classifying different plant species [29,30]. Advanced techniques have been employed, achieving a recognition accuracy close to 98% for distinguishing similar herbs using smartphones [31]. However, most of them require an online environment.

2.2. *Augmented Reality and Its Applications in the Food Chain*

Augmented reality (AR) offers an innovative solution to address challenges in food identification. This technology allows virtual information to be superimposed on the physical world, offering users an interactive and immersive way to identify foods with different possibilities [32]. Some areas of gastronomy and food services are highlighted by associating AR with their activities, such as food traceability, monitoring storage conditions, and preventing adulteration by providing real-time information about food origin and quality [33].

Optimizing logistics processes with the help of AR minimizes risks. It ensures compliance with food safety standards, improving the quality and integrity of products supplied from packaging to consumers [34]. Consumers can easily access information, as the food industry has adopted AR in product labeling. They can point their smartphones at a product in the supermarket and, through AR information, obtain data on the ingredients, nutritional values, and even recipe suggestions using that product. This application of AR promotes transparency in food labeling and helps consumers make more informed decisions about their food choices [35].

The versatility of AR is also reflected in its ability to be associated with training for professionals in the food sector. Its contribution includes including safety practices in training programs aimed at raising professionals' awareness of food safety standards [36].

The use of AR technology associated with mobile devices offers versatility; however, it presents limitations when using complex architectures in the food sector. Mobile devices are limited by processing power, memory capacity, and battery life, significantly impacting the performance and feasibility of deploying sophisticated models [37].

Mobile devices typically have less processing power than desktop computers or dedicated servers. This limitation requires lightweight models that work efficiently without taxing the device's CPU or GPU. Complex architectures, such as deep convolutional neural networks (CNNs) with numerous layers and parameters, can be computationally intensive,

leading to slower inference times and reduced responsiveness. Therefore, optimizing the model for mobile deployment frequently involves reducing the parameters and layers, using techniques, such as model pruning, quantization, and knowledge distillation, to create more compact and efficient models [38].

Template size is also essential when deployed to mobile devices. Large models consume more memory, which can be a critical bottleneck given the limited RAM available on most mobile devices. This can lead to issues, like application crashes or slow performance, especially when dealing with high-resolution images or when processing multiple tasks simultaneously. Models must be optimized for size without sacrificing accuracy to mitigate this issue. Certain techniques, such as weight sharing and parameter reduction, can compress the model, making it more suitable for mobile environments [39].

Complex, compute-intensive models can also drain the battery quickly, a critical consideration for mobile applications that must be used throughout the day without frequent charging. The model's efficient design balances the computational load to ensure that the application remains usable without significantly impacting the device's battery life [40].

2.3. Computer Vision Associated with Augmented Reality

Computer vision is an area of computer science that aims to develop systems and codes to decipher and understand visual elements of pictures or videos, allowing computers and machines to process, analyze, and extract meaning from visual data. CV systems can be categorized into types, such as 2D image analysis and pattern recognition [41].

CV applications are vast and constantly expanding and can be applied in several areas, such as augmented reality, by superimposing virtual information on the real world. This way, it is possible to improve the user experience and provide real-time interactive data based on images captured by devices, such as smartphones and tablets [42].

Image tracking is a method for creating AR experiences combined with CV by tracking real-world objects in real time. One of the reference software in the AR area is Vuforia, which is currently in version 10.18 and which was developed by the manufacturer PTC. The dynamics created by the program are the comparison of images from a tablet or smartphone camera with a database of known images. When the camera finds a known image, Vuforia places virtual objects on it [43].

Unity is another software that stands out in the AR scene, currently in version 2022.1.16. It allows scripts developed in the C# programming language to associate Vuforia with mobile development for AR applications. By combining the two programs and developing applications involving CV, it is possible to employ three image-tracking techniques: patterns, characteristics, and depth [44].

In pattern recognition, Vuforia uses pattern recognition algorithms to identify known images in the camera image. In feature tracking, Vuforia uses feature tracking algorithms to identify characteristic points in known images and the camera image. In depth tracking, Vuforia uses depth tracking algorithms to measure the distance between the camera and real-world objects. By combining these technologies, Vuforia can track images with high accuracy and reliability, enabling developers to create interactive AR experiences [45].

CV can be employed in several areas of the food sector, such as monitoring plantations by identifying plant diseases and pests, analyzing crop development, and predicting productivity. Soil analysis is another example of CV associated with managing food quality by measuring soil fertility, identifying deficient nutrients, and determining the need for irrigation [46].

Food safety concerns may result in the use of essential applications in several countries associated with CV. Some examples are assessing food quality by detecting fresh or spoiled products, identifying food adulteration, and verifying the origin of products [45]. To assist in choosing healthy foods, nutritional information can be provided by identifying images of foods and their respective packaging through the CV and comparing the captured image with a database of foods and their respective data [47].

2.4. Related Works

Research on the identification of aromatic herbs has advanced considerably in recent years, exploring various approaches and methodologies, such as augmented reality (AR) and artificial intelligence (AI) [48]. This section presents and discusses the major research works in this field.

Antunes et al. [48] proposed and developed a program to identify three aromatic herbs using an object detection algorithm through the YOLO v8 architecture with a convolutional neural network. Mustafa [49] developed a system for species identification and early detection of herbaceous diseases using computer vision and an electronic nose. This system focuses on extracting the smell, shape, color, and texture of herb leaves, as well as intelligent mixing involving systematic inference systems, naive Bayes classifiers (NB), a probabilistic neural network (PNN), and a support vector machine (SVM).

Convolutional neural networks have been successful in solving object identification problems. This study contributes a new approach suitable for herb identification using convolutional neural network models, such as InceptionV3, MobileNetV2, ResNet50V2, VGG16, Xception, and RMSprop and Adam optimizers [50].

In the previous literature [51], a new CNN model was presented for herb identification, utilizing the partial information perception module (PPM) and the species classification module (SCM). Additionally, a new attention mechanism, called the part priority attention mechanism (PPAM), has been proposed, which independently trains the PPM using herb part labels. Another article [52] aimed to implement a system to analyze Ayurvedic leaves using convolutional neural networks (CNNs) based on transfer learning. The recognition of Ayurvedic herbs was performed based on their images. The experiment used 1,835 images of herbs from 30 species of healthy medicinal plants. The success rates for herb identification reached 98.97% accuracy in DenseNet121 Convolutional Neural Network tests. The VGG16, MobileNetV2, and InceptionV3 models reported test accuracies of 93.79%, 96.21%, and 97.59%, respectively.

A previous study [53] proposed the UTHM Herbs Garden Application Using Augmented Reality. This AR technology can facilitate community access to information about five types of herbs. Thus, based on the information provided, users can quickly memorize all the data about the plants through their mobile devices, making the process much more attractive compared to the conventional method of using labeling cards.

The Augmented Reality Portal Application for Medicinal Phytotherapy Plants aims to allow the visualization of medicinal plants and to serve as a source of knowledge and insights for the general public. This is made possible through the advanced technology of the Augmented Reality Portal, which can be accessed via Android smartphones [54].

Augmented reality is gradually becoming popular in education, providing a contextual and adaptive learning experience. In this context, [55] developed a Chinese herbal medicine platform based on AR using 3dsMax and Unity, allowing users to visualize and interact with herb models and learn related information. Users use their mobile cameras to scan a 2D image of the herb, triggering the display of the 3D AR model and corresponding text information on the screen in real time.

The present study describes a mobile application that uses augmented reality to provide information about herbaceous plants commonly found in the Philippines. The application was developed using Unity software and the Vuforia SDK, due to its various features, such as its image converter, camera, tracker, video background renderer, application code, user-defined targets, and device databases. Additionally, the Vuforia QCAR algorithm was used, which identifies the tracking points of the image target from the database, and which was employed to enhance 3D movements [56].

We confirmed that the technologies used for herb identification and mobile devices are centered around artificial intelligence through convolutional neural networks and augmented reality, with more research focusing on AI. The choice of AR technology was due to its capability to work with 3D images, providing a more user-friendly application, consum-

ing fewer computational resources on mobile devices, allowing execution on older devices, and functioning offline, making it suitable for environments without Internet access.

3. Materials and Methods

The design science research (DSR) methodology is a framework for creating technological artifacts, such as innovative technological systems, applications, and models, addressing complex problems and challenges in technology and information systems [18]. DSR is an applied research method that aims to create practical, innovative solutions to real-world problems by employing design principles and scientific approaches. This methodology is widely recognized for producing tangible and relevant results in the academic community and industry [57].

The design science research (DSR) methodology originated in computer science, systems engineering, and information systems management. The design science research (DSR) methodology comprises five well-defined stages that guide the creation of technological artifacts. These stages provide a systematic framework for designing, developing, evaluating, and validating innovative technological solutions [57]. The framework can be seen in Figure 1 [58].

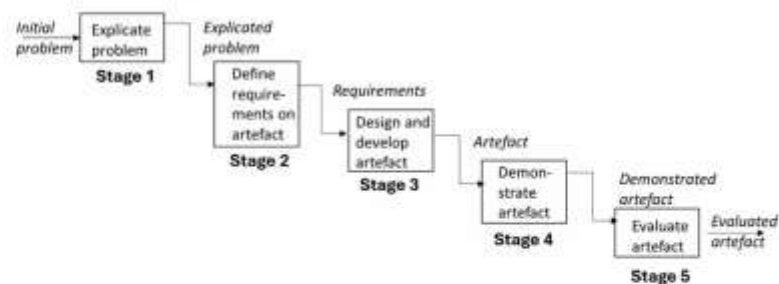


Figure 1. The 5 stages of the DSR methodology [58].

The DSR methodology is structured into five stages for creating and evaluating artifacts. In the first stage, the problem is explained, and the issue is identified and understood to be resolved. In the second stage, the artifact's requirements are defined, establishing its characteristics and functionalities. The third stage involves designing and developing the artifact based on the defined requirements. In the fourth stage, the artifact is demonstrated, testing its functionality and applicability in practical scenarios. The artifact is evaluated in the fifth and final stage, analyzing its effectiveness and relevance [18].

3.1. Problem Description

The research occurred at the CEAGESP vegetable fair, where different aromatic herbs were presented. Some difficulties were highlighted after meetings with specialists from the institution's management and field research carried out with professionals who sell the food.

The first activity raised by the group of professionals in the segment was the difficulty in identifying the types of aromatic herbs sold locally due to the high number of plants that pass through the warehouse daily. Currently, technical information is provided through a printed version of a CEAGESP technical publication containing the 18 main aromatic herbs sold locally, namely rosemary, garlic, chives, coriander, dill, fennel, tarragon, mint, bay leaves, basil, marjoram, nira, oregano, parsley, celery, sage, and thyme. The printed version used at CEAGESP can be seen in Figure 2.



Figure 2. Technical publication regarding the use of aromatic herbs.

The images used in the printed publication were obtained by experts who created a group with 300 images in the JPG format relating to the study sector. During the meetings and technical views, specialists agreed to make the figures available to develop projects to improve local infrastructure.

The second activity indicated the difficulty in accurately classifying the types of aromatic herbs sold in the institution, even using the printed version. As some aromatic herbs have similar physical characteristics, such as shape, color, and texture, the customer's choice of product in the warehouse becomes difficult.

The location of CEAGESP close to a provisional detention center presents a problem with regular access to the Wi-Fi network, which is essential for implementing modern technologies for identifying and classifying aromatic herbs. Electromagnetic interference and security restrictions associated with the proximity of the detention center limit the availability and stability of Internet connectivity via Wi-Fi. This limitation prevents using systems based on cloud computing daily in augmented reality applications and requires network support for real-time data updating, information synchronization, and access to remote databases. The dependence on mobile data connections, which are often unstable and insufficient to support high-demand applications, further exacerbates the problem. This results in operational difficulties and technological limitations that directly impact the efficiency and accuracy of identifying aromatic herbs essential for local commerce.

Given the understanding of the scenario, the first stage of the DSR methodology was completed after identifying the main problems faced by customers when purchasing aromatic herbs at the warehouse.

3.2. Define Requirements for Artifacts

The definition of the requirements that guided the development of the proposed article, in this case, the application, emerged after meetings with experts and professionals from CEAGESP, who developed them to transform the complexities previously presented into demands for the project.

The study's first step consisted of creating an image bank to support the identification of the 18 main aromatic herbs sold at the fair inside the warehouse. To this end, another 300 images were added in the JPG format captured during technical visits to the site, totaling 600 images for the preparation of the project.

The second step was the creation of a CV application associated with AR to overlay virtual information on aromatic herbs recorded in the real world, thus facilitating accurate identification. The leading information indicated by the application is an image blocked by the cell phone camera associated with the type of aromatic herb that appears on the device's display. Due to the difficulty of accessing the Internet locally via cell phone, the information collected will be processed locally; therefore, the database must be inserted into the application.

The third stage of the research was presenting technical information in the application. The identified aromatic herb must indicate one of the six following aromatic groups to which it belongs:

1. Cineol, linalool, camphor, and 4-Terpinenol
2. Diallyl organosulfurs
3. α -Pinene, carvone, limonene, linalool, and myristicin
4. Caryophyllene, thymol, and terpinene
5. Estragol and anethole
6. Menthyl acetate

The fourth stage is the association of the aromatic herb identified with the botanical family it belongs to, namely Amaryllidaceae, Apiaceae, Asteraceae, Lamiaceae, or Lauraceae.

The fifth stage of the study indicated the application of transforming aromatic herbs into seasoning, considering two variables: time and temperature. Each of the 18 types of aromatic herbs has different values for dehydrating and obtaining the seasoning. Concerning the ideal drying time, celery has the shortest time of 25 min due to its less dense structure, and leek has the longest of 89 min due to its thicker structure. In terms of temperature, thyme, which is more delicate, suffers from dehydration with the lowest temperature of all herbs at 78 °C. At the same time, rosemary, with a more robust composition, needs a higher temperature of 150 °C for effective drying, resulting in the highest value among all herbs. The values were obtained through the current printed publication of CEAGESP, which provides guidelines and variations of 64 min and 72 °C according to the structures and characteristics of the specific aromatic herbs.

The presentation on the application screen will include suggestions for culinary uses according to the aromatic herb identified. Seventeen types of use were classified with possible applications for each herb identified, namely poultry, goat, meat, teas, mushrooms, stews, sauces, breads, pates, fish, pizzas, typical dishes, cheeses, salads, soups, beef pork, and pies.

The technical information included in the project was extracted from the CEAGESP technical publication containing the 18 main aromatic herbs sold in the warehouse. The architecture used to obtain the solution can be seen in Figure 3.

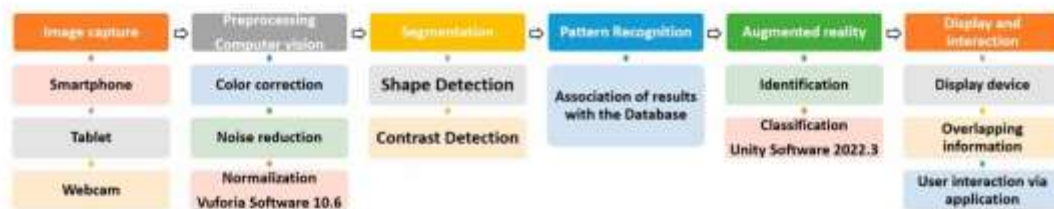


Figure 3. Project architecture for creating the application by integrating technologies.

3.3. Design and Development of the Artifact

3.3.1. Design

The project to obtain the application was segmented, detailing the steps involved, from capturing the image to displaying and interacting with the overlaid digital content. The process begins with capturing an image of the real world using an electronic device, such as a smartphone, tablet, or webcam. The images of the captured aromatic herbs serve as a basis for superimposing virtual elements. The captured image then goes through a pre-processing process to improve its quality and facilitate subsequent analysis. This step includes color correction, adjusting the image's hue, saturation, and contrast to improve visual fidelity and normalization, and adjusting the image size and resolution to a suitable standard.

Image segmentation aims to identify and separate objects of interest from the background. This step can be performed through certain techniques, such as shape detection,

identifying objects based on their geometric shapes, such as corners, lines, and curves, and contrast detection, i.e., identifying objects based on their contrast differences with the background. Then, the segmented objects are compared with a database of known patterns to identify and classify them.

Based on the identification of objects, the information is associated with the database and superimposed on the original image, creating augmented reality. Two reference software in augmented reality were used to develop the proposed solution: Vuforia 10.6 and Unity 2022.3, which allow the insertion of the SDK file and the generation of the application in the APK extension.

Unity is a multiplatform software known for its versatility in developing solutions involving AR and VR technologies. It supports various platforms, including Android and iOS, making it an ideal choice for mobile AR development. Unity's cross-platform capabilities allow developers to create applications running on multiple devices and operating systems with minimal adjustments. This ensures a wider reach and accessibility of the developed AR applications. Additionally, Unity offers an intuitive interface, an extensive library, and a well-documented API for developers, including 3D models, scripts, and plug-ins, significantly speeding up the development process in AR projects. Unity's real-time rendering engine ensures high-quality graphics and smooth performance, which is essential for creating immersive AR experiences. Its optimization tools help maintain device performance regardless of operating system versions [44].

Vuforia is an AR platform that integrates with Unity, providing advanced AR functionality. It supports image recognition, object tracking, and 3D target detection, making it a versatile tool for AR development. Some features stand out in the market, such as its tracking capabilities, including image targets, 3D objects, and ground plane detection, allowing the creation of highly interactive AR experiences. The ability to recognize and track multiple targets simultaneously improves the interactivity of the application. Furthermore, Vuforia features a scalable architecture, allowing the creation of applications that handle various types of targets and environments, making it suitable for diverse AR applications [43].

The combination of Unity and Vuforia provides a versatile framework that makes it easy to use Unity's interface rendering capabilities along with Vuforia's tracking and integration capabilities when creating AR application projects.

3.3.2. Artifact Development

A local database of aromatic herb images and information has been integrated into the ARomaticLens application, allowing the computer vision algorithm to compare and classify captured images accurately. This database comprises captured reference images and detailed information about each aromatic herb, ensuring a reliable herb identification and classification source.

C# scripts were developed in the application's backend to manage image processing, data retrieval, and user interactions. These scripts are responsible for controlling image capture, applying pre-processing techniques to improve image quality, and running the computer vision algorithm that analyzes and classifies herbs. Additionally, these scripts facilitate integrating augmented reality (AR) functionalities and computer vision technologies within the application. One of the scripts used in the project can be seen in Figure 4.

Augmented reality (AR) allowed information about herbs to be overlaid directly onto the captured image, providing an interactive and informative visualization. This process was managed in real time, ensuring that users received instant feedback on herb identification, which was crucial for practical applications in certain environments, like CEAGESP.

```

1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.UI;
3 using System.IO;
4
5 public class ImageRecognition : MonoBehaviour
6 {
7     public RawImage previewImage;
8     public Text resultText;
9     public string imagesFolderPath; // Caminho para a pasta com as imagens
10
11     private WebCamTexture webcamTexture;
12     private Texture2D targetTexture;
13
14     void Start()
15     {
16         // Inicia a câmera
17         webcamTexture = new WebCamTexture();
18         webcamTexture.Play();
19
20         // Carrega a imagem para a câmera
21         Texture2D imageTexture = LoadImageFromFile
22             ("caminho_da_imagem.png"); // Substitua "caminho_da_imagem.png"
23         // pelo caminho da imagem que será mostrada para a câmera
24         previewImage.texture = imageTexture;
25
26         // Configura a textura alvo
27         string[] imageFiles = Directory.GetFiles(imagesFolderPath,
28             "*.png"); // Carrega todas as imagens da pasta com extensão .png,
29         // você pode alterar a extensão se necessário
30         foreach (string filePath in imageFiles)
31         {
32             byte[] imageData = File.ReadAllBytes(filePath);
33             Texture2D texture = new Texture2D(2, 2);
34             texture.LoadImage(imageData);
35
36             if (CompareTextures(imageTexture, texture, 0.6f)) // Altere o
37                 // valor 0.6f para ajustar a precisão (de 0 a 1)
38             {
39                 resultText.text = "Imagem encontrada!";
40                 break;
41             }
42             else
43             {
44                 resultText.text = "Imagem não encontrada";
45             }
46         }
47     }
48
49     Texture2D LoadImageFromFile(string filePath)
50     {
51         byte[] imageData = File.ReadAllBytes(filePath);
52         Texture2D texture = new Texture2D(2, 2);
53         texture.LoadImage(imageData);
54     }
55 }

```

Figure 4. C# Script for image identification.

The Vuforia 10.6 software stores and classifies these images based on shapes and contrasts. Vuforia, through its image tracking and recognition capabilities, allowed the precise mapping of herb images, facilitating real-time recognition using the following techniques:

1. Image tracking: The application uses Vuforia 10.6 software to track images in real time. Such use involves capturing images using the mobile device's camera and comparing them with a local database of images of known herbs. When a match is found, virtual objects and information are overlaid onto the real-world image.
2. Pattern recognition: Vuforia uses pattern recognition algorithms to identify known images in the camera feed. Such movement involves analyzing herbs' shapes, contrasts, and geometries to facilitate precise identification.
3. Feature tracking: The application uses feature tracking to identify characteristic points in images, allowing the precise overlay of virtual information on physical images of the herb.
4. Depth tracking: Depth tracking algorithms measure the distance between the camera and the herbs, ensuring accurate positioning of augmented reality elements.

The application was built on the Unity 2022.3 platform, which offered cross-platform support and tools for creating the user interface interactively. Vuforia's integration with Unity allowed Unity's real-time rendering capabilities to ensure correct project performance. C# scripts were created to manage image processing and display of relevant information. The step-by-step application development process can be seen in Figure 5.



Figure 5. The artifact process flowchart.

3.4. Demonstrate Artifact

The demonstration of the functioning of the technological artifact developed begins with the application installation on mobile devices containing the Android operating system version 8 with API level 26 and enough free space for the installation of 232 MB. Once installed, the app runs, activating the device's camera and allowing the user to scan different aromatic herb samples. The application processes captured images in real time by using image recognition algorithms, which overlay AR information directly on the device's screen.

During the demonstration, the user positions the device's camera over an aromatic herb, and the application automatically identifies the plant. Detailed information about the herb, including scientific name, visual characteristics, and culinary and medicinal uses, is displayed and overlaid over the actual image of the plant.

The demo also illustrates the application's intuitive interface, highlighting its simple user-directed visual language, designed to be accessible to both experts and laypeople, ensuring a positive user experience.

3.5. Validation

Initially, to validate the application, a system presentation meeting was held, where four experts who work at CEAGESP in the aromatic herbs sector were invited to complete a demonstration of the application. The user interface, image recognition algorithms, and augmented reality functionalities were highlighted during this session. Experts were able to interact with the application, providing immediate feedback on its usability and accuracy in identifying aromatic herbs.

Subsequently, a detailed verification of the application's functioning was conducted, focusing on the features requested by experts during the requirements stages. Each function was tested individually to ensure that all technical and operational specifications were met. This verification process included performance, stability, and accuracy testing, ensuring the application operates as expected under different usage conditions.

In addition, an evaluation questionnaire was administered to participants in the presentation meeting. This questionnaire was structured to collect qualitative and quantitative

data about users' experience with the application, covering key aspects, such as ease of use, the clarity of the information presented, and general satisfaction. The responses obtained provide valuable insights for possible improvements and adjustments to the application.

Finally, the application was used realistically during the aromatic herb trade fair at CEAGESP. This scenario allowed us to observe the application's performance in a practical context, evaluating its effectiveness in identifying aromatic herbs in real time and its acceptance by end users. The data collected at this stage complement the evaluation and validation of the artifact, ensuring its applicability.

4. Results and Discussions

Based on the selection of the 18 species of aromatic herbs most sold in the warehouse, 600 images were classified to be inserted into the database. The photographs were captured in different scenarios to associate CV with what is closest to reality. The images were captured in open-air markets, supermarkets, and CEAGESP distribution points. The main images obtained can be viewed in Figure 6.



Figure 6. Aromatic herbs selected at the research site.

The database containing images was inserted into the Vuforia 10.6 software for storage, classification, and targeting associated with AR. The software, through CV, classifies and categorizes the captured images, considering the variables and apparent geometry of the aromatic herbs. All 600 images were added to the database to be categorized according to their shapes and contrast from the original images. Figure 7 shows the transition process for CV recognition.

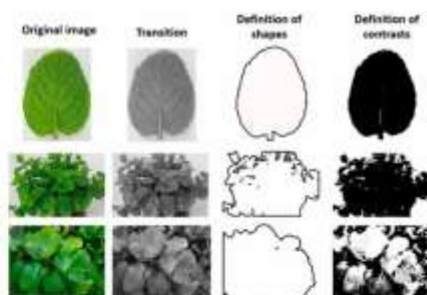


Figure 7. Example of aromatic herbs with thapplication of CV.

The identification capacity of the captured image is categorized by assigning grades from 0 to 5 stars, with a value of 0 for images that could not be processed by the CV, grades from 1 to 4 for images that could be identified by the CV, varying in terms of the recognition time and processing, and with a score 5 for recognition that was considered instantaneous. To highlight the results obtained by the CV classification applied to aromatic herbs, a

database was created containing the star ratings attributed to each image, which can be seen in Figure 8.



















Target name	Type	Evaluation	Status
 Sage_2	Image	*****	Active
 Bay leaf_1	Image	*****	Active
 Leek_1	Image	*****	Active
 Onion_4	Image	*****	Active
 Oregano_8	Image	*****	Active
 Basil_3	Image	*****	Active
 Oregano_3	Image	*****	Active
 Sage_3	Image	*****	Active
 Scallion_5	Image	*****	Active
 Coriander_2	Image	*****	Active
 Onion_2	Image	*****	Active
 Leek_6	Image	*****	Active
 Parsley_5	Image	*****	Active
 Sage_8	Image	*****	Active
 Sage_4	Image	*****	Active
 Sage_7	Image	*****	Active
 Marjoram_5	Image	*****	Active
 Thyme_4	Image	*****	Active

Figure 8. Images classified using computer vision.

Some variables interfere with image processing when applying CV, such as the number of aromatic herbs in the same figure, the lighting where the photo was taken, the proximity between the capture lens and the object to be detailed, and the focus and definition of the result. Table 1 presents the results obtained when submitting the bank of 600 images to CV analysis using the Vuforia 10.6 software.

Table 1. Results of CV analysis using the software.

Number of Stars	Number of Images
5	192
4	138
3	54
2	39
1	25
0	133






























Images with one star had an average processing time of 30 s. For those rated two stars, recognition took about 20 s. Images with a score of three stars required 8 s to process. Images with four stars were processed in approximately 3 s. Finally, images recognized instantly, in less than 2 s, received the maximum rating of five stars. This attitude provided some benefits, such as the following:

1. Increased identification accuracy: By selecting high-quality and accurate images rated five stars, the new database ensures that the recognition system in Unity has a robust reference base, increasing its accuracy in identifying aromatic herbs.

2. Improvement in system efficiency: With an optimized database containing only high-quality images, the processing of images by the system becomes more efficient, resulting in a shorter response time and greater agility in the user's interaction with the application.
3. Reduction in errors: Including well-classified images reduces the incidence of errors in recognizing herbs, as the selected images clearly and distinctly represent the characteristics of each species, facilitating correct classification by the system.
4. Quality of user experience: With a well-structured and accurate database, the user experience is significantly improved. The augmented reality application offers fast and reliable responses, increasing user satisfaction and the system's overall usability.

To complement the results and facilitate the understanding of the data collected during development, a table was created detailing the processing of images of aromatic herbs using CV. Table 2 presents information about the original image, the transition, the definition of shapes and contrasts, the number of stars assigned to each image, and the processing time in seconds. This structure allows a comparative analysis of the results found through the CV algorithm used by the Vuforia 10.6 software, highlighting the effectiveness of the previous analysis before using the database. Furthermore, Table 2 helps to identify patterns and trends in the processing of different aromatic herbs, enabling specific adjustments to the algorithm for future optimization.

Table 2. Details of image processing using CV.

Name	Original Image	Transition	Definition of Shapes	Definition of Contrasts	Number of Stars	Processing Time (s)
Mint						2
Parsley						3
Oregano						8
Anise						20
Nira						30
Leek					0	There was no processing.

The folders containing the 18 species of aromatic herbs were inserted into the “Assets” environment of the Unity 2022.3 software so that the data could be referenced in augmented reality. A script was created in C# programming language to direct the folders containing the images. This script manages the access and use of images in the context of the application.

Another C# script was developed to reference and retrieve information obtained from an image, such as the title, link, and reference to the associated image. The programming allows integration between the captured image and image processing via CV, selecting the contrasts and geometries obtained and, consequently, the result on the cell phone screen. The development architecture of these stages can be seen in Figure 9.

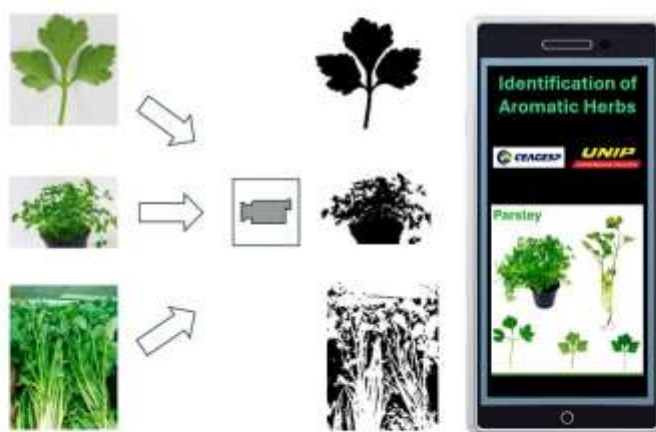


Figure 9. Architecture involving CV and AR.

At the launch of the ARomaticLens application, a presentation screen containing information about the partners involved in the project's development was incorporated. This addition is intended to acknowledge the collaboration and support received and provide users with an initial understanding of the scope of the application. A close button was strategically positioned in the top left corner of the interface, close to the position of the mobile device's front camera, to improve the app's usability. This positioning facilitates the user experience, allowing the user to close the presentation screen quickly and intuitively.

To assist users in using the application, a message was inserted in the center of the screen with the text “Point to the aromatic herb you want to identify!”. This message is essential to guide users on the correct procedure for effectively identifying aromatic herbs, ensuring they use the application intuitively. A link to the CEAGESP website was also inserted when a subject used the application in a location with access to a Wi-Fi network. This link allows one to download the PDF version of the printed technical reference made available by CEAGESP, providing an additional source of information detailed information about aromatic herbs.

The application was built to work on the Android operating system, starting from Android version 8 with API Level 26. With a size of 232 MB, the application guarantees the inclusion of all essential functionalities without compromising the performance or usability of the device. This comprehensive version ensures that users can access a robust and efficient tool for aromatic herb identification.

The result of the application's operation, including its intuitive interface and built-in functionalities, can be seen in Figure 10. The image shows how the application facilitates the identification of aromatic herbs, highlighting the effectiveness of ARomaticLens in meeting users' needs. The well-designed interface, clear instructions, and access to additional

features make ARomaticLens a valuable tool for identifying and classifying aromatic herbs, offering an innovative and efficient solution for the food sector.



Figure 10. Complete operation of the application.

The implementation involved carrying out the first test of ARomaticLens with the developed features. The application's interactions with users were simulated, not limited to functionality, but also considering the usability and performance of the application. This ensured that ARomaticLens worked as expected in meeting the established requirements and providing an efficient user experience. The validation was carried out by four experts testing the application at the CEAGESP fair and verifying its operation.

Specialist A is an operational technician with 20 years of experience in the company, and Specialist B is a food engineer with 5 years of experience; Specialist C is an agricultural engineer with 26 years of experience and is the director of the area. Specialist D is an operational technician with 25 years of experience. A demonstration of the application was carried out by asking them to install it on their cell phones and to check its usability and accuracy in identifying the 18 types of aromatic herbs.

The experts reported that the application worked according to the objective of identifying aromatic herbs on mobile devices, with low processing power and without an Internet connection, with 100% accuracy.

After use, a questionnaire was used as a research instrument, containing four open questions and one closed question with a scale between 0 and 10 to evaluate usability. The first question asked whether the application was intuitive or not for use regarding identification. Everyone unanimously reported that the application was intuitive for identifying aromatic herbs. The second question was whether the application was efficient in collecting data. The experts responded that the application was efficient without an Internet connection. One of the experts had an older cell phone with Android version 8 with API Level 26, and the application worked satisfactorily. Question 3 was about the application providing results in real time. The results presented on the experts' screens were obtained with a processing time of less than 2 s, showing the efficiency of the application in real time, while question 4 referred to how the application worked without an Internet connection. The four cell phones could use the application without needing to use the Internet.

Next, the group of experts was asked to give a grade on the application's user interface (UI). Specialist A gave a score of 9, specialists B and C gave a score of 8, and specialist D gave a score of 7 for the application's usability, showing that the application satisfactorily met the usability target proposed in the project.

The implementation phase represents a significant milestone in transforming the concept into a functional technological solution. Figure 11 shows the exact moment the request was validated at CEAGESP.



Figure 11. Experts validate the application at CEAGESP in the field.

The current study presents a mobile application leveraging smartphone camera capabilities to achieve high-accuracy recognition of common aromatic herbs. The proposed innovation is related to the possibility of its use offline. While the application offers a valuable tool for identifying common aromatic herbs, its usefulness is geographically restricted due to its limited database. Like in previous studies [35,59], the application's reliance on augmented reality (AR) technology introduces potential limitations. Factors, like lighting and the herb's physical state, can affect the accuracy of the AR identification. Finally, user experience may be hindered by the need for technical proficiency with smartphones, potentially excluding those less familiar with modern mobile technology.

A previous study [30] features herb recognition accuracy. However, some limitations remain. As in the present study, the system could misidentify plants, particularly in cluttered natural settings. Additionally, as in the present study, the effectiveness of the augmented reality (AR) features hinged on the user's mobile device. Performance and accuracy can fluctuate depending on hardware specifications. Lastly, expanding the application's plant library would necessitate significant resources for data collection and model retraining.

The real-time performance is a critical aspect, often constrained by the processing capabilities of the mobile device used. Older or less powerful devices may experience reduced functionality, affecting the fluidity and responsiveness of the AR application, which is essential for maintaining user engagement effectiveness [60]. Additionally, the quality of user interaction with the system plays a pivotal role. Our validation showed that the application is user-friendly; however, this interaction quality largely depends on the user's prior experience with AR technologies and the design's intuitiveness.

Furthermore, object recognition accuracy within the AR system is susceptible to environmental variables [36,59]. Conditions, such as inadequate lighting or obstructions in the camera's visual field, can severely impair the system's ability to recognize and display information about objects accurately, in this case, herbs. Such challenges highlight the need for robust design considerations in AR applications to ensure they are accessible and effective across varying technical specifications and user experiences. In most agricultural

sites and massive warehouses, Internet access is sometimes limited; therefore, the present solution offers the possibility to use it offline.

Many advanced models rely on cloud computing to handle complex processing tasks, which can offload computing from the mobile device. However, this approach requires a stable Internet connection, which is not always available, especially in environments, like CEAGESP, where connectivity is limited due to electromagnetic interference and security restrictions. Therefore, the ARomaticLens application must work offline, requiring all processing to be carried out locally on the device. This requirement further emphasizes the need for lightweight and efficient models to deliver high accuracy while operating completely offline [15].

Model speed is another crucial factor. Users expect real-time performance where the app can quickly identify and classify herbs without noticeable delays. Slow inference times can degrade the user experience and make the application impractical for real-world use. Therefore, optimizing the model for faster inference times is vital. This can be achieved by simplifying the model architecture, using efficient algorithms, and taking advantage of hardware acceleration features available in modern mobile devices. When developing the ARomaticLens app, we considered the limitations associated with mobile devices [13]. By optimizing the model for size, speed, and efficiency, we ensure that the application remains responsive and practical for users in environments with limited connectivity and varying hardware resources. These considerations are fundamental to providing a robust, easy-to-use solution for identifying and classifying aromatic herbs [54].

5. Conclusions

This research achieved the objective of creating an application for identifying and classifying aromatic herbs in an environment with great diversity and similarity between the 18 species studied.

Users unanimously validated the use of the application in a natural environment and proved its functionality in the field. The processing of the images to be identified via computer vision guaranteed the accuracy of the results on the application screen. The processing of results within the application allowed its use without using the Internet, thus guaranteeing usability in the intended environment. The integration between the software allowed the generation of an augmented reality application integrated with computer vision technology.

Author Contributions: All authors contributed equally to the development of the paper. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Finance Code 001.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. UNDP. United Nations Development Programme. A Goal 2: Zero Hunger-Sustainable Development Goals. Available online: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/zero-hunger> (accessed on 12 December 2023).
2. Chauhan, C.; Dhir, A.; Akram, M.U.; Salo, J. Food loss and waste in food supply chains: A systematic literature review and framework development approach. *J. Clean. Prod.* **2021**, *295*, e126438. [CrossRef]
3. Pages-Rebull, J.; Pérez-Ráfols, C.; Serrano, N.; del Valle, M.; Diaz-Cruz, J.M. Classification and authentication of spices and aromatic herbs using HPLC-UV and chemometrics. *Food Biosci.* **2023**, *52*, e102401. [CrossRef]
4. Galanakis, C.M.; Rizou, M.; Aldawoud, T.M.S.; Ucak, I.; Rowan, N.J. Innovations and technology disruptions in the food sector within the COVID-19 pandemic and post-lockdown era. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *110*, 193–200. [CrossRef] [PubMed]
5. Kayikci, Y.; Subramanian, N.; Dora, M.; Bhatia, M.S. Food supply chain in the era of Industry 4.0: Blockchain technology implementation opportunities and impediments from the perspective of people, process, performance, and technology. *Prod. Plan. Control.* **2022**, *33*, 301–321. [CrossRef]

6. Ghobakhloo, M.; Fathi, M.; Iranmanesh, M.; Maroufkhani, P.; Morales, M.E. Industry 4.0 ten years on A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. *J. Clean. Prod.* **2021**, *302*, 127052. [CrossRef]
7. Dubey, S.R.; Jalal, A.S. Application of Image Processing in Fruit and Vegetable Analysis: A Review. *J. Intell. Syst.* **2015**, *24*, 405–424. [CrossRef]
8. Mohanty, S.P.; Hughes, D.P.; Salathé, M. Using deep learning for image-based plant disease detection. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, e215232. [CrossRef] [PubMed]
9. Jatnika, R.D.A.; Medyawati, I.; Hustinawaty, H. Augmented Reality Design of Indonesia Fruit Recognition. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* **2018**, *8*, 4654–4662.
10. Kalinaki, K.; Shafik, W.; Gutu, T.J.L.; Malik, O.A. Computer Vision and Machine Learning for Smart Farming and Agriculture Practices. In *Artificial Intelligence Tools and Technologies for Smart Farming and Agriculture Practices*; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2023; pp. 79–100. [CrossRef]
11. Department of Economic and Social Affairs. Food Security, Nutrition, and Sustainable Agriculture. Available online: <https://sdgs.un.org/topics/food-security-and-nutrition-and-sustainable-agriculture> (accessed on 12 December 2023).
12. Cheok, A.D.; Karunanayaka, K. *Virtual Taste and Smell Technologies for Multisensory Internet and Virtual Reality*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018. [CrossRef]
13. Liberty, T.J.; Sun, S.; Kucha, C.; Adediji, A.A.; Agidi, G.; Ngadi, M.O. Augmented reality for food quality assessment: Bridging the physical and digital worlds. *J. Food Eng.* **2024**, *367*, 111893.
14. Velázquez, R.; Rodríguez, A.; Hernández, A.; Casquete, R.; Benito, M.J.; Martín, A. Spice and Herb Frauds: Types, Incidence, and Detection: The State of the Art. *Foods* **2023**, *12*, 3373. [CrossRef]
15. Hossain, M.F.; Jamalipour, A.; Munasinghe, K. A Survey on Virtual Reality over Wireless Networks: Fundamentals, QoE, Enabling Technologies, Research Trends and Open Issues. *TechRxiv* **2023**. [CrossRef]
16. Ding, H.; Tian, J.; Yu, W.; Wilson, D.I.; Young, B.R.; Cui, X.; Xin, X.; Wang, Z.; Li, W. The Application of Artificial Intelligence and Big Data in the Food Industry. *Foods* **2023**, *12*, 4511. [CrossRef]
17. Feng, Y.; Wang, Y.; Beykal, B.; Qiao, M.; Xiao, Z.; Luo, Y. A mechanistic review on machine learning-supported detection and analysis of volatile organic compounds for food quality and safety. *Trends Food Sci. Technol.* **2024**, *143*, 104297. [CrossRef]
18. Johannesson, P.; Perjons, E. Systems Development and the Method Framework for Design Science Research. In *An Introduction to Design Science*; Johannesson, P., Perjons, E., Eds.; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 157–165. [CrossRef]
19. Moradkhani, H.; Ahmadalipour, A.; Moftakhari, H.; Abbaszadeh, P.; Alipour, A. A review of the 21st century challenges in the food-energy-water security in the Middle East. *Water* **2019**, *11*, 682. [CrossRef]
20. Naylor, R.L.; Hardy, R.W.; Buschmann, A.H.; Bush, S.R.; Cao, L.; Klinger, D.H.; Little, D.C.; Lubchenco, J.; Shumway, S.E.; Troell, M. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature* **2021**, *591*, 551–563. [CrossRef]
21. Chapman, J.A.; Bernstein, L.L.; Lee, R.E.; Oppenheimer, J.; Nicklas, R.A.; Portnoy, J.M.; Sicherer, S.H.; Schuller, D.E.; Spector, S.L.; Khan, D.; et al. Food allergy: A practice parameter. *Ann. Allergy Asthma Immunol.* **2006**, *96*, S1–S68. [CrossRef]
22. Gremillion, T.M. Food Safety and Consumer Expectations. In *Encyclopedia of Food Safety*, 2nd ed.; Smithers, G.W., Ed.; Academic Press: Oxford, UK, 2024; pp. 547–550.
23. Salgueiro, L.; Martins, A.P.; Correia, H. Raw materials: The importance of quality and safety. A review. *Flavour Fragr. J.* **2010**, *25*, 253–271. [CrossRef]
24. Guiné, R.P.F.; Gonçalves, F.J. Bioactive compounds in some culinary aromatic herbs and their effects on human health. *Mini-Rev. Med. Chem.* **2016**, *16*, 855–866. [CrossRef]
25. Kindlovits, S.; Gonçalves, F.J. Effect of weather conditions on the morphology, production and chemical composition of two cultivated medicinal and aromatic species. *Eur. J. Hort. Sci.* **2014**, *79*, 76–83.
26. Raffi, J.; Yordanov, N.D.; Chabane, S.; Douifi, L.; Gancheva, V.; Ivanova, S. Identification of irradiation treatment of aromatic herbs, spices and fruits by electron paramagnetic resonance and thermoluminescence. *Spectrochim. Acta-Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2000**, *56*, 409–416. [CrossRef]
27. Rocha, R.P.; Melo, E.C.; Radünz, L.L. Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *J. Med. Plant Res.* **2011**, *5*, 7076–7084. [CrossRef]
28. Laci-Lee, J.; Brooke-Taylor, S.; Clark, L. Allergens as a Food Safety Hazard: Identifying and Communicating the Risk. In *Encyclopedia of Food Safety*, 2nd ed.; Smithers, G.W., Ed.; Academic Press: Oxford, UK, 2024; pp. 700–710.
29. Husin, Z.; Shakaff, A.; Aziz, A.; Farook RS, M.; Jaafar, M.N.; Hashim, U.; Harun, A. Embedded portable device for herb leaves recognition using image processing techniques and neural network algorithm. *Comput. Electron. Agric.* **2012**, *89*, 18–29. [CrossRef]
30. Senevirathne, L.; Shakaff, A.; Aziz, A.; Farook, R.; Jaafar, M.; Hashim, U.; Harun, A. Mobile-based Assistive Tool to Identify & Learn Medicinal Herbs. In Proceedings of the 2nd International Conference on Advancements in Computing (ICAC), Colombo, Sri Lanka, 10–11 December 2020; Volume 1, pp. 97–102. [CrossRef]
31. Lan, K.; Tsai, T.; Hu, M.; Weng, J.-C.; Zhang, J.-X.; Chang, Y.-S. Toward Recognition of Easily Confused TCM Herbs on the Smartphone Using Hierarchical Clustering Convolutional Neural Network. *Evid.-Based Complement. Altern. Med.* **2023**, *2023*, e9095488. [CrossRef]
32. Weerasinghe, N.C.; AVGHS, A.; Fernando, W.W.R.S.; Rajapaksha, P.R.K.N.; Siriwardana, S.E.; Nadeeshani, M. HABARALA—A Comprehensive Solution for Food Security and Sustainable Agriculture through Alternative Food Resources and Technology. In

- Proceedings of the 2023 IEEE 17th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, Sri Lanka, 25–26 August 2023; pp. 175–180.
33. How augmented reality (AR) is transforming the restaurant sector: Investigating the impact of “Le Petit Chef” on customers’ dining experiences. *Technol. Forecast. Soc. Change* **2021**, *172*, 121013. [CrossRef]
 34. Reif, R.; Walch, D. Augmented & Virtual Reality applications in the field of logistics. *Vis. Comput.* **2008**, *24*, 987–994.
 35. Chai, J.J.K.; O’Sullivan, C.; Gowen, A.A.; Rooney, B.; Xu, J.-L. Augmented/mixed reality technologies for food: A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2022**, *124*, 182–194. [CrossRef]
 36. Domhardt, M.; Tiefengrabner, M.; Dinic, R.; Fötschl, U.; Oostingh, G.J.; Stütz, T.; Stechemesser, L.; Weitgasser, R.; Ginzinger, S.W. Training of Carbohydrate Estimation for People with Diabetes Using Mobile Augmented Reality. *J. Diabetes Sci. Technol.* **2015**, *9*, 516–524. [CrossRef] [PubMed]
 37. Musa, H.S.; Krichen, M.; Altun, A.A.; Ammi, M. Survey on Blockchain-Based Data Storage Security for Android Mobile Applications. *Sensors* **2023**, *23*, 8749. [CrossRef]
 38. Graney-Ward, C.; Issac, B.; KETSBAIA, L.; Jacob, S.M. Detection of Cyberbullying Through BERT and Weighted Ensemble of Classifiers. *TechRxiv* **2022**. [CrossRef]
 39. Dunkel, E.R.; Swope, J.; Candela, A.; West, L.; Chien, S.A.; Towfic, Z.; Buckley, L.; Romero-Cañas, J.; Espinosa-Aranda, J.L.; Hervás-Martin, E.; et al. Benchmarking Deep Learning Models on Myriad and Snapdragon Processors for Space Applications. *J. Aerosp. Inf. Syst.* **2023**, *20*, 660–674. [CrossRef]
 40. Arroba, P.; Buyya, R.; Cárdenas, R.; Risco-Martín, J.L.; Moya, J.M. Sustainable edge computing: Challenges and future directions. *Softw. Pract. Exp.* **2024**, 1–25. [CrossRef]
 41. Velesaca, H.O.; Suárez, P.L.; Mira, R.; Sappa, A.D. Computer vision based food grain classification: A comprehensive survey. *Comput. Electron. Agric.* **2021**, *187*, e106287. [CrossRef]
 42. Poonja, H.A.; Shirazi, M.A.; Khan, M.J.; Javed, K. Engagement detection and enhancement for STEM education through computer vision, augmented reality, and haptics. *Image Vis. Comput.* **2023**, *136*, 104720. [CrossRef]
 43. Engine Developer Portal. SDK Download. 2022. Available online: <https://developer.vuforia.com/downloads/SDK> (accessed on 23 November 2023).
 44. Unity Technologies. *Unity 2020.3.33*, Unity: Beijing, China, 2022. Available online: <https://unity.com/releases/editor/whats-new/2020.3.33> (accessed on 20 November 2023).
 45. Sladojevic, S.; Arsenovic, M.; Anderla, A.; Culibrk, D.; Stefanovic, D. Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification. *Comput. Intell. Neurosci.* **2016**, *2016*, e3289801. [CrossRef] [PubMed]
 46. Wang, G.; Sun, Y.; Wang, J. Automatic Image-Based Plant Disease Severity Estimation Using Deep Learning. *Comput. Intell. Neurosci.* **2017**, *2017*, e2917536. [CrossRef] [PubMed]
 47. Patricio, D.I.; Rieder, R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Comput. Electron. Agric.* **2018**, *153*, 69–81. [CrossRef]
 48. Antunes, S.N.; Okano, M.T.; Nääs, I.D.A.; Lopes, W.A.C.; Aguiar, E.P.L.; Vendrametto, O.; Fernandes, M.E. Model Development for Identifying Aromatic Herbs Using Object Detection Algorithm. *AgriEngineering* **2024**, *6*, 1924–1936. [CrossRef]
 49. Mustafa, M.S.; Husin, Z.; Tan, W.K.; Mavi, M.F.; Farook, R.S.M. Development of automated hybrid intelligent system for herbs plant classification and early herbs plant disease detection. *Neural Comput. Appl.* **2020**, *32*, 11419–11441. [CrossRef]
 50. Chaivivatrakul, S.; Moonrinta, J.; Chaivivatrakul, S. Convolutional neural networks for herb identification: Plain background and natural environment. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* **2022**, *12*, 1244–1252. [CrossRef]
 51. Zhao, Y.; Sun, Z.; Tian, E.; Hu, C.; Zong, H.; Yang, F. A CNN Model for Herb Identification Based on Part Priority Attention Mechanism. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Toronto, ON, Canada, 11–14 October 2020; pp. 2565–2571.
 52. Sinha, J.; Chachra, P.; Biswas, S.; Jayswal, A.K. Ayurvedic Herb Classification using Transfer Learning based CNNs. In Proceedings of the 2024 IEEE 2nd International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT), Punjab, India, 2–3 May 2024; pp. 628–634.
 53. Senan, N.; Najib, N.A.M. UTHM Herbs Garden Application Using Augmented Reality. *Appl. Inf. Technol. Comput. Sci.* **2020**, *1*, 181–191.
 54. Permana, R.; Tosida, E.T.; Suriansyah, M.I. Development of augmented reality portal for medicinal plants introduction. *Int. J. Glob. Oper. Res.* **2022**, *3*, 52–63. [CrossRef]
 55. Zhu, Q.; Xie, Y.; Ye, F.; Gao, Z.; Che, B.; Chen, Z.; Yu, D. Chinese herb medicine in augmented reality. *arXiv* **2023**, arXiv:2309.13909.
 56. Angeles, J.M.; Calanda, F.B.; Bayon-on, T.V.V.; Morco, R.C.; Avestro, J.; Corpuz, M.J.S. Ar plants: Herbal plant mobile application utilizing augmented reality. In Proceedings of the 2017 International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence, Jakarta, Indonesia, 5–7 December 2017; pp. 43–48.
 57. Gerber, A.; Baskerville, R. (Eds.) *Design Science Research for a New Society: Society 5.0: 18th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology, DESRIST 2023, Pretoria, South Africa, May 31–June 2 2023, Proceedings*; Springer: Cham, Switzerland, 2023.
 58. Peffers, K.; Tuunanen, T.; Rothenberger, M.A.; Chatterjee, S. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *J. Manag. Inf. Syst.* **2007**, *24*, 45–77. [CrossRef]

59. Sadeghi-Niaraki, A.; Choi, S.-M. A Survey of Marker-Less Tracking and Registration Techniques for Health & Environmental Applications to Augmented Reality and Ubiquitous Geospatial Information Systems. *Sensors* **2020**, *20*, 2997. [[CrossRef](#)]
60. Arena, F.; Collotta, M.; Pau, G.; Termine, F. An Overview of Augmented Reality. *Computers* **2022**, *11*, 28. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

APÊNDICE C – Registro do artefato ARomaticLens



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512024001370-9**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 01/09/2023, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: ARomaticLens

Data de publicação: 01/09/2023

Data de criação: 01/09/2023

Titular(es): MARCELO TSUGUIO OKANO

Autor(es): MARCELO TSUGUIO OKANO; WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

Linguagem: C#

Campo de aplicação: AG-01; AG-04

Tipo de programa: AP-01

Algoritmo hash: SHA-256

Resumo digital hash: 7c4cf84189cf50dc6e991e21ebaec04a9b64e4d10ec97399e39957dbd769f8

Expedido em: 07/05/2024



15 de Novembro
REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
de 1889

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO

APÊNDICE D – Artigo 3 – ARTechGuide - Augmented Reality in Industry 5.0: Customizing production to optimize operational processes and technical training of operators

*Proc. of the 6th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCCE)
27-28 August 2025, Istanbul, Türkiye*

Augmented Reality in Industry 5.0: Customizing production to optimize operational processes and technical training of operators

William Aparecido Celestino Lopes
Graduate Program in Production
Engineering
Universidade Paulista UNIP
Sao Paulo, Brazil
0009-0009-4437-776X

Sergio Miele Ruggero
Graduate Program in Production
Engineering
Universidade Paulista UNIP
Sao Paulo, Brazil
0000-0002-2370-2238

Oduvaldo Vendrametto
Graduate Program in Production
Engineering
Universidade Paulista UNIP
Sao Paulo, Brazil
0000-0003-2430-6138

Marcelo Tsuguio Okano
Graduate Program in Production
Engineering
Universidade Paulista UNIP
Sao Paulo, Brazil
0000-0003-1680-7821

Abstract— This study presents the development and evaluation of ARTechGuide, an Augmented Reality (AR)-based application designed for technical training of operators in an automotive industrial environment. The research was conducted using the Design Science Research (DSR) methodology, with application and validation in a real factory setting. The system uses mobile devices and visual recognition to provide audiovisual instructions in five critical operational scenarios. Compared to traditional methods, a 57% reduction in setup time, a 25% increase in execution accuracy, and a 75% decrease in requests for help were observed. The system achieved an average of 9.25 on the User Experience (UX) scale and 4.5 on nine technical indicators evaluated by experts. Unlike commercial AR platforms, the solution adopts a local architecture, independent of constant connectivity, facilitating its adoption in environments with operational constraints. These benefits are aligned with the Industry 5.0 proposal, which values customization according to human needs.

Keywords— Industry 5.0, Augmented Reality, Personalized Manufacturing, Mobile Application, User Experience Design.

I. INTRODUCTION

Industry 5.0 represents an evolution of Industry 4.0, promoting collaboration between humans and machines with a focus on personalized, human-centric solutions [1]. In addition to optimizing processes, this approach seeks more sustainable and accessible operations [2]. Digitalization has transformed manufacturing and increased productivity but still poses challenges for operator training and process standardization [3]. In this scenario, Augmented Reality (AR) emerges as a technology that facilitates interaction between operators and digital systems [4].

The growing demand for solutions that combine digital efficiency, and environmental commitment makes Industry 5.0 an important area for innovations such as AR applied to

industrial training and optimization [5]. However, most studies focus on technical aspects, without fully integrating sustainability and usability [6]. There is also a gap in the customization of instructions according to the operator's profile [7][8], and the replacement of physical documents with sustainable digital means [9].

This article aims to evaluate the impacts of the application of ARTechGuide, an AR application for operators in an auto parts production line, with a focus on personalization, sustainability, and training. The questions that guide this study are:

- 1) Does AR contribute to increase operational efficiency and operator autonomy in manufacturing environments?
- 2) Does the use of AR interfaces improve accessibility and resilience in critical situations in the operation of industrial machines?

The Design Science Research (DSR) methodology [10] is adopted, applied in a real environment, with data collection and analysis before and after the implementation of ARTechGuide [11].

II. LITERATURE REVIEW

A. Human-centric technologies in industry: Augmented reality as a strategic tool

The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 involves repositioning humans as central agents in production processes, reinforcing the collaboration between artificial intelligence and human cognitive capabilities [12]. In this scenario, AR stands out for its role beyond visual support, configuring itself as a resource that transforms the human-machine relationship through the interactive digitalization of procedures [13]. By replacing printed instructions with responsive systems, AR

promotes real-time access to operational data, optimizing response time and increasing task-execution accuracy [14].

AR's ability to integrate sensor data directly into the operator's field of vision enables faster and more assertive decisions. This integration avoids operational discontinuity caused by interface changes and consultation of multiple sources, favoring the fluidity of activities and coordination between production areas. Such practices are close to the concept of "information in the workflow", essential for industrial transparency [15].

The applicability of AR is expanded in highly technically demanding tasks, such as visual inspections and fine adjustments [16]. The reduction of operational ambiguity and the standardization of communication between employees result in greater efficiency and reliability in processes [17].

Regarding occupational safety, AR introduces new risk mitigation strategies, with proactive visual alerts that reconfigure operator behavior [18]. This preventive approach redefines safety management, while interactive training promotes knowledge retention and minimizes variations in performance [19][20]. Despite economic and cultural restrictions on its adoption, AR represents a strategic vector for Industry 5.0, by aligning technical performance and human capital appreciation [21][22].

B. Augmented Reality in operational technology: Transforming the factory floor

AR has been reconfiguring operational practices in the manufacturing environment, especially by mediating the interface between operators and automated systems. Its central contribution lies in the integration of data and visual commands in real time, which reduces the occurrence of human errors and enhances the adaptability of processes to the dynamic conditions of the production environment [23]. Such adaptation, supported by smart manufacturing strategies, reinforces the resilience and efficiency of operations [24].

With the evolution of the Internet of Things (IoT), connected sensors expand the spectrum of AR, offering continuous diagnostics on the status of machines. This convergence favors contextual decisions and eliminates the use of static systems, promoting predictive maintenance and mitigating unplanned downtime [25]. However, the effectiveness of these solutions depends on the organization's ability to manage interoperability between devices and systems [26].

The association of AR with virtual simulations has strengthened project validation and process optimization, especially in highly regulated sectors, such as the automotive industry [27]. This approach allows adjustments before physical implementation, reducing rework and accelerating innovation cycles. However, it requires digital maturity and precise mapping of human-machine interactions [28].

By eliminating redundant steps, AR improves orchestration between production sectors. In critical operations, such as assisted assembly, its application reduces nonconformities and rework, increasing traceability and final quality [29]. In safety, the overlapping of contextual alerts makes AR an active prevention tool. Empirical evidence demonstrates its

effectiveness in increasing situational awareness and accelerating practical learning [30].

As highlighted in [31] [32], AR tools such as Microsoft HoloLens, ARKit and ARCore require prior knowledge in programming and 3D design, in addition to specific configuration steps for different devices, which can limit their applicability in industrial environments with heterogeneous infrastructure and the need for rapid deployment.

III. METHODOLOGY

This research was conducted in a Brazilian automotive company specializing in the development and assembly of fluid piping systems, using the Design Science Research (DSR) methodology, complemented by a review of scientific literature. DSR guides the development and validation of technological solutions in the industrial environment, focusing on the creation of artifacts aimed at practical demands [33]. The literature highlights its suitability due to its iterative structure, which favors continuous improvements based on empirical evidence and expert feedback [34].

The choice of DSR is aligned with the objective of developing, implementing, and evaluating an AR-based artifact for personalizing operational instructions and promoting industrial sustainability [35]. The method integrates scientific rigor into the construction of applicable solutions, being relevant in contexts of digital transformation and manufacturing innovation [36]. Within the scope of Industry 5.0, which values the integration of digitalization, sustainability, and operator focus, DSR provides a consistent methodological basis for validating interventions with relevant operational impact [37].

The study follows the principles of Design Science Research (DSR), structured in five phases that integrate diagnosis, development and validation of a digital artifact applied to the industrial environment. The first phase consists of identifying the problem through technical visits and interviews with operators, process leaders, quality teams and manufacturing managers, aiming to map operational challenges. Then, the technical and functional requirements are defined based on the identified needs. The third phase involves the development of the artifact, guided by the principles of Industry 5.0 and focused on digitalization and interactive support through AR. In the fourth phase, the artifact is demonstrated in a real environment, allowing its practical applicability to be assessed. Finally, validation takes place by experts, who use a structured questionnaire to verify the alignment of the solution with the established requirements, evaluating its contribution to improving operational processes.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. DSR Framework Step 1 – Problem Identification

Based on meetings and technical visits with operators, process leaders, the quality team, and the manufacturing manager, operational challenges were identified in the fluid piping systems assembly cell, focusing on the pneumatic insertion machine (MTU) used in the production of these assemblies for the automotive sector. The absence of digital means for communicating visual instructions, such as images and videos, was found, making it difficult to standardize and

access the documentation of work instructions by multiple operators. The limitations in the systematization of operational knowledge resulted in a heterogeneous execution of critical activities, which could affect the efficiency and safety of the process. The main problems identified refer to the lack of standardization in the following procedures: (1) turning the machine on and off safely; (2) setup for tooling change; (3) execution with indication of tooling handling points; (4) safe actions in case of abnormality during the operation of inserting the connectors into the piping; and (5) safe procedures for assembling and aligning the components during the operation of inserting the parts.

These problems highlighted the need for improvements in the availability of documentation, to establish standardization and dissemination of operational information, which directly affects operator safety and the efficiency of the production process. Figure 1 shows the workstation adjacent to the analyzed machine.

Fig. 1. MTU machine and workstation analyzed



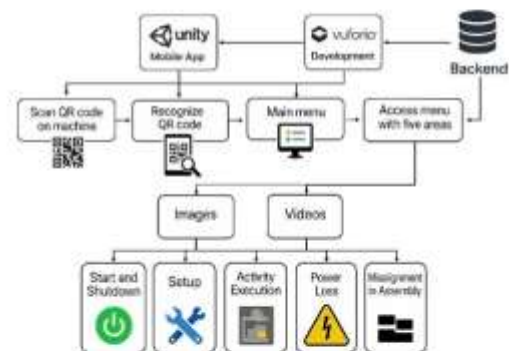
B. DSR Framework Step 2 – Project Prerequisites

Based on the analysis of the operational issues identified in Stage 1, the main requirement was to develop an AR-based application. The tool was designed to recognize the pneumatic insertion machine (MTU) model via QR Code and provide standardized technical instructions to operators in real time.

The solution structure integrates visual and textual content, including images and instructional videos, to support the execution of critical tasks. The instructions cover the process of initialization, setup, operation and response to failures, such as unexpected shutdowns or mechanical misalignments. The objective in this stage was to ensure fast and standardized access to information, promoting safety, technical compliance and reducing variability in the production process.

Figure 2 presents the functional architecture of the developed application, highlighting its operational flow from reading the QR Code installed on the pneumatic insertion machine (MTU) to access the technical procedures. The system automatically recognizes the equipment and directs the user to a menu with five operational environments, corresponding to the main demands identified in the diagnostic stage. Each environment contains visual and textual instructions related to the critical steps of the process, including safe machine startup and shutdown, setup procedures for changing tools and parts, guidance on component handling, safety actions in case of power failure and conduct in the event of mechanical misalignments.

Fig. 2. Custom project architecture



C. DSR Framework Step 3 – Project Development

The development phase focused on building the ARTechGuide application, designed for use in an automotive industrial environment, with direct application on the pneumatic insertion machine (MTU). The solution was implemented with Vuforia 11.0.4 software for image pattern recognition and Unity 2022.3.13f1 for modeling the AR-based interactive interface.

Initially, the QR Code was created and inserted into a database within Vuforia, establishing them as targets for activating the application interface. The application was then developed in Unity, structuring five distinct environments, each corresponding to a critical situation previously identified in the operational process. These environments were fed with a bank of images and technical videos, organized into visual and audiovisual instructions.

The integration between the application and the machine was consolidated by physically attaching the QR Code to the body of the equipment. After recognition by the system, the operator is directed to an interactive menu containing five categories of procedures: (1) safe machine startup and shutdown, (2) tool change and operational setup, (3) execution of the activity focusing on critical handling points, (4) conduct in situations of electrical failure and automatic shutdown, and (5) corrective actions for misalignment between the cradle and the central base during assembly.

Each category provides access to instructional videos and explanatory illustrations that guide the operator in real time. The content was designed to optimize the understanding and standardization of procedures, eliminating dependence on physical documentation and increasing accessibility to technical information in the manufacturing environment itself, as can be seen in Figure 3.

Fig. 3. Customization of activities for virtualization



D. DSR Framework Step 4 – Solution Demonstration

The demonstration stage consisted of the practical application of the ARTechGuide system on the pneumatic insertion machine (MTU), validating its integration with the manufacturing environment. The content was accessed by reading a QR Code, using a mobile device with the application installed. During the demonstration, operators tested the system in five different operational scenarios.

The interface presented instructions in AR, with options between detailed images and videos. The navigation flow included QR Code recognition, loading of the virtual environment and display of technical content. The guidelines covered setup practices, connector insertion, ergonomics, use of pneumatic force and operational safety.

The solution worked consistently and responded immediately. Replacing physical manuals with a single digital channel demonstrated technical feasibility, promoting standardization and alignment with the functional and ergonomic requirements of the automotive sector, as shown in Figure 4.

Fig. 4. Application of the ARTechGuide application in the company



E. DSR Framework Phase 5 – Project Assessment and Validation DSR

The fifth phase of the DSR, Evaluation and Validation, aimed to measure the effectiveness, usability and applicability of the ARTechGuide application in a manufacturing environment, with real users and different operational conditions. Technical and operational criteria aligned with the principles of Industry 5.0 were considered.

To compare ARTechGuide with traditional methods, an experiment was conducted with four operators of equivalent experience. In the first approach, they used physical manuals with supervision. In the second, they performed the same tasks using the ARTechGuide app, without in-person support. The activities occurred over a 15-day period. Data were collected through timekeeping and compliance checklists completed by supervisors, allowing for analysis of time, accuracy, and standardization, as shown in Table 1.

Table 1. Operational Performance Comparison: Traditional Manual vs. ARTechGuide App

Metric	Traditional Manual	ARTechGuide
Average setup time (minutes)	8,9	3,8
Assembly success rate (%)	73%	98%
Average number of help requests	4	1
Time to identify failure after power outage (minutes)	3,5	1

The data reveals a 57% reduction in setup time, a 25 percent increase in the accuracy rate, a 75% decrease in help restrictions, and a 71% reduction in the time to identify failures, indicating that the AR application improved autonomy, accuracy, and operational response.

The evaluation involved four experts — operator, production leader, quality analyst and manufacturing manager — with between 10 and 30 years of experience. Two rounds were held: the first identified points for improvement; the second validated the adjustments. The modifications included clearer operational texts, images highlighting critical areas, videos with practical instructions and reorganization of QR Codes in interactive menus. The final evaluation used a questionnaire with ten questions: nine on a Likert scale (5 points) and one on a UX scale (0 to 10), addressing usability, accessibility, learning, safety and innovation. Each item was linked to technical indicators, allowing integrated analysis between user perception and functional performance, as indicated in Table 2.

Table 2. Evaluation result – data consolidation - Likert scale (1 to 5):

Nº	Technical Indicator	Questions	Overall Average
1	AR Activation	The activation of AR presented menus, videos and images clearly.	4,75
2	Interface Ergonomics	The side menu was accessible even with gloves or hand restraints.	4,5
3	Visual Clarity	The images and videos made it easier to understand the procedures.	4,75
4	Operational Effectiveness	The setup/tool change content increased safety and autonomy.	4,5
5	Execution Accuracy	The application contributed to optimizing the execution of operations.	4,25
6	Resilience	The instructions were clear in the event of a power failure.	4,25
7	Technical Response Efficiency	The application helped to resolve misalignments without external support.	4
8	Innovation Usefulness	The use of AR was more effective than traditional methods.	4,75
9	Overall App Rating (Likert)	The application was considered useful, clear and functional in the manufacturing environment.	4,5

The User Experience (UX) Scale applied to the tenth question of the questionnaire, assessed the clarity, usability, usefulness, time-savings and operational support of ARTechGuide. The average of 9.25 indicates high functional approval by experts, demonstrating its practical effectiveness in the industrial environment. The triangulation of data, with experts of different levels, reinforced the validity of the evaluation. ARTechGuide meets the principles of Industry 5.0, integrating technology, personalization and cognitive support.

The results obtained in the ARTechGuide evaluation confirm the evidence discussed in the literature on the strategic role of AR in Industry 5.0.

The data reveals a 57% reduction in setup time, a 25 percent increase in the accuracy rate, a 75% decrease in requests for help, and a 71% reduction in the time to identify failures, indicating that the AR application improves autonomy, accuracy, and operational response. ARTechGuide differentiates itself from platforms such as Microsoft Guides and ARKit/ARCore by utilizing physical QR Codes, a local Vuforia database, and common mobile devices, enabling personalized operational flows. This architecture reduces costs, eliminates cloud dependency, and addresses industrial constraints, as evidenced by [31] and [32].

The average of 4.75 obtained in the indicators “AR Activation”, “Visual Clarity” and “Useful Innovation” demonstrate the effectiveness of the tool in delivering contextualized and accessible information during critical activities, such as tool setup and changeover. These results are consistent with the findings of [13] and [15], which highlight the importance of AR in the interactive digitization of procedures and in the integration of information directly into the workflow,

providing imprecision and response time. The average of 4.5 for “Operational Effectiveness” and “Interface Ergonomics” confirms the system’s ability to promote autonomy and accessibility, even in environments with physical restrictions, as suggested by [16] and [17]. The UX evaluation (average 9.25) reinforces the experts’ positive perception regarding usability, clarity and operational support, empirically validating the hypothesis that AR can be applied as a human-centered technology. Thus, the data obtained support the proposal that solutions such as ARTechGuide not only complement automation, but also qualify human-technology interaction, as recommended by [12], [21] and [22].

V. CONCLUSION

The evaluation of ARTechGuide demonstrated its viability as a tool for autonomous machine maintenance in the industrial environment. The methodology adopted, based on Design Science Research, allowed the validation of the artifact in an iterative manner and guided by experts with different functional profiles. The integration of Augmented Reality with visual instructions, operational commands and safety protocols was effective in meeting the practical demands of the factory floor, especially in context of setup and resumption of production.

The results indicate that the application contributes to operator autonomy and safety, to the standardization of assembly instructions and to the improvement of operational efficiency. Data collection from multiple perspectives ensured the robustness of the evaluation and alignment with the principles of Industry 5.0, considering personalization and human-technology interaction. We recommend continuing development to expand functionalities and integrate with maintenance-management systems. Future research should explore the application of the tool in different types of machines and sectors, as well as its adaptation to technical training and professional qualification environments.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the Coordination of Superior Studies—CAPES for the scholarship.

REFERENCES

- [1] N. Rane, “Transformers in Industry 4.0, Industry 5.0, and Society 5.0: Roles and Challenges,” Oct. 01, 2023, Social Science Research Network, Rochester, NY: 4609915. doi: 10.2139/ssrn.4609915.
- [2] J. C. L. Fernandes, M. T. Okano, W. A. C. Lopes, S. N. Antunes, and O. Vendrametto, “An Architecture to Identify Aromatic Herbs using Augmented Reality (AR) and Mobile Application,” WSEAS Transactions on Environment and Development, vol. 19, pp. 1459–1467, 2023, doi: 10.37394/232015.2023.19.132.
- [3] A. Agote-Garrido, A. M. Martín-Gómez, and J. R. Lama-Ruiz, “Manufacturing System Design in Industry 5.0: Incorporating Sociotechnical Systems and Social Metabolism for Human-Centered, Sustainable, and Resilient Production,” Systems, vol. 11, no. 11, 2023, doi: 10.3390/systems11110537.
- [4] M. H. Zafar, E. F. Langis, and F. Sanfilippo, “Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 89, p. 102769, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769.
- [5] A. Adel, “Unlocking the Future: Fostering Human-Machine Collaboration and Driving Intelligent Automation through Industry 5.0 in

- Smart Cities," *Smart Cities*, vol. 6, no. 5, pp. 2742–2782, 2023, doi: 10.3390/smartcities6050124.
- [6] B. Alojaiman, "Technological Modernizations in the Industry 5.0 Era: A Descriptive Analysis and Future Research Directions," *Processes*, vol. 11, no. 5, 2023, doi: 10.3390/pr11051318.
 - [7] R. Tallat et al., "Navigating Industry 5.0: A Survey of Key Enabling Technologies, Trends, Challenges, and Opportunities," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 2, pp. 1080–1126, 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3329472.
 - [8] M. Golovianko, V. Terziyan, V. Bratyskiy, and D. Malyk, "Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid," *Procedia Computer Science*, vol. 217, pp. 102–113, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206>.
 - [9] W. A. C. Lopes et al., "Augmented Reality Applied to Identify Aromatic Herbs Using Mobile Devices," *AgriEngineering*, vol. 6, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2024, doi: 10.3390/agriengineering6030164.
 - [10] J. vom Brocke and A. Maedche, "The DSR grid: six core dimensions for effectively planning and communicating design science research projects," *Electronic Markets*, vol. 29, no. 3, pp. 379–385, Sep. 2019, doi: 10.1007/s12525-019-00358-7.
 - [11] R. Amaral, H. Castro, F. Pereira, J. Bastos, and P. Ávila, "Development of a Learning Factory for Industry 5.0 Based on Open Design," *Procedia Computer Science*, vol. 256, pp. 681–684, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.167>.
 - [12] B. Wang et al., "Human Digital Twin in the context of Industry 5.0," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, p. 102626, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626>.
 - [13] R. K. Pallasena, M. Sharma, and V. Krishnaswamy, "A Study of Interaction, Visual Canvas, and Immersion in AR Design: A DSR Approach," *AIS Trans. Hum.-Comput. Interact.*, vol. 14, no. 3, pp. 390–425, 2022, doi: 10.17705/1thci.00173.
 - [14] W. A. C. Lopes, M. T. Okano, J. C. L. Fernandes, S. N. Antunes, and O. Vendrametto, "ARomaticLens: Augmented Reality Applied to the Identification and Classification of Aromatic Herbs Through Computer Vision and Mobile Devices," in *Human-Centred Technology Management for a Sustainable Future*, R. Zimmermann, J. C. Rodrigues, A. Simoes, and G. Dalmarco, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 79–87, doi: 10.1007/978-3-031-72494-7_9.
 - [15] J. Alves, T. M. Lima, and P. D. Gaspar, "Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review," *Processes*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.3390/pr11010193.
 - [16] D. S. Manikandan, D. E. Elakiya, D. C. P. Devi, and P. D. S. Khasim, *Industrial Revolution and Metaverse: Industry 5.0*. Qing Publications, 2023.
 - [17] U. Haider et al., "Applications of Augmented Reality in Industrial Manufacturing in the Era of Industry 5.0," *International Journal of Engineering and Applied Physics*, vol. 5, no. 1, pp. 1127–1135, Jan. 2025.
 - [18] A. C. Pereira, A. C. Alves, and P. Arezes, "Augmented Reality in a Lean Workplace at Smart Factories: A Case Study," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 16, 2023, doi: 10.3390/app13169120.
 - [19] A. A. Tubis and J. Rohman, "Intelligent Warehouse in Industry 4.0—Systematic Literature Review," *Sensors*, vol. 23, no. 8, 2023, doi: 10.3390/s23084105.
 - [20] L. Varela, G. Putnik, and F. R. and, "The concept of collaborative engineering: a systematic literature review," *Production & Manufacturing Research*, vol. 10, no. 1, pp. 784–839, 2022, doi: 10.1080/21693277.2022.2133856.
 - [21] Y. Yang, *Digital Economy And The Sustainable Development Of Asian And China*. World Scientific, 2022.
 - [22] K. Bakon, T. Holzinger, Z. Süle, S. Jaskó, and J. Abonyi, "Scheduling Under Uncertainty for Industry 4.0 and 5.0," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 74977–75017, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3191426.
 - [23] J. Angelopoulos and D. Mourtzis, "An Intelligent Product Service System for Adaptive Maintenance of Engineered-to-Order Manufacturing Equipment Assisted by Augmented Reality," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12115349.
 - [24] W. Fang, L. Chen, T. Zhang, C. Chen, Z. Teng, and L. Wang, "Head-mounted display augmented reality in manufacturing: A systematic review," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 83, p. 102567, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102567>.
 - [25] J. Simon, L. Gogolik, J. Sárosi, and I. Fürstner, "Augmented Reality Based Distant Maintenance Approach," *Actuators*, vol. 12, no. 7, 2023, doi: 10.3390/act12070302.
 - [26] A. Uçar, M. Karaköse, and N. Kırınça, "Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 2, 2024, doi: 10.3390/app14020898.
 - [27] W. A. C. Lopes, A. C. Rasteiro, C. R. Mendes, N. V. C. Honório, and M. T. Okano, "Optimization of New Project Validation Protocols in the Automotive Industry: A Simulated Environment for Efficiency and Effectiveness," *JCEE*, Feb. 2025, doi: 10.47852/bonview/JCEE52024627.
 - [28] W. Wang et al., "BIM Information Integration Based VR Modeling in Digital Twins in Industry 5.0," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, p. 100351, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>.
 - [29] S. Yoo, S. Reza, H. Tarashlyoun, A. Ajikumar, and M. Moghaddam, "AI-Integrated AR as an Intelligent Companion for Industrial Workers: A Systematic Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 191808–191827, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3516536.
 - [30] G. Morales Méndez and F. del Cerro Velázquez, "Impact of Augmented Reality on Assistance and Training in Industry 4.0: Qualitative Evaluation and Meta-Analysis," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, 2024, doi: 10.3390/app14114564.
 - [31] T. Feigl, A. Porada, S. Steiner, C. Löffler, C. Mutschler, and M. Philippsen, "Localization Limitations of ARCore, ARKit, and Hololens in Dynamic Large-scale Industry Environments," in *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2020) – Volume I: GRAPP*, SciTePress, 2020, pp. 307–318, doi: 10.5220/0008989903070318.
 - [32] J. Linowes and K. Babilinski, *Augmented Reality for Developers: Build practical augmented reality applications with Unity, ARCore, ARKit, and Vuforia*. Birmingham: Packt Publishing, 2017.
 - [33] K. Fahd, S. J. Miah, K. Ahmed, S. Venkatraman, and Y. Miao, "Integrating design science research and design based research frameworks for developing education support systems," *Education and Information Technologies*, vol. 26, no. 4, pp. 4027–4048, Jul. 2021, doi: 10.1007/s10639-021-10442-1.
 - [34] M. Majdalawieh and S. Khan, "Building an Integrated Digital Transformation System Framework: A Design Science Research, the Case of FedUni," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, 2022, doi: 10.3390/su14106121.
 - [35] J. Friedrich, A. Brückner, J. Mayan, S. Schumann, A. Kirschenbaum, and C. Zinke-Wehlmann, "Human-centered AI development in practice—insights from a multidisciplinary approach," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, vol. 78, no. 3, pp. 359–376, Sep. 2024, doi: 10.1007/s41449-024-00434-5.
 - [36] Y. Jarah-Nezhad, L. A. Paipa-Galeano, C. A. Bernal-Torres, W. Garzón-Alfonso, Y. Delghans-Jacome, and A. Felipe Páez-Calcado, "Virtual Reality Critical Thinking Training of Engineers in the Vertical Transportation Industry," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 193165–193183, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3457885.
 - [37] C. Daase and K. Turowski, "Conducting Design Science Research in Society 5.0 – Proposal of an Explainable Artificial Intelligence Research Methodology," in *Design Science Research for a New Society: Society 5.0*, A. Gerber and R. Baskerville, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 250–265, doi: 10.1007/978-3-031-32808-4_16.

APÊNDICE E – Registro do artefato ARTechGuide



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512025002594-7**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 01/03/2025, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: ARTechGuide

Data de publicação: 01/03/2025

Data de criação: 31/12/2024

Titular(es): MARCELO TSUGUIO OKANO; WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

Autor(es): MARCELO TSUGUIO OKANO; WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES; SÉRGIO MIELE RUGGERO

Linguagem: C#

Campo de aplicação: IN-01

Tipo de programa: AP-01

Algoritmo hash: OUTROS

Resumo digital hash: d7840ee71421e24f02b2125a77f090e9

Expedido em: 24/06/2025



15 de Novembro
REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
de 1889

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO

APÊNDICE F - Formulário de Validação do Framework – Método AHP

Finalidade: Avaliar o grau de relevância e coerência das variáveis teóricas e aplicadas do framework proposto, por meio do Método de Análise Hierárquica (AHP), com base na percepção de especialistas da área.

Termo de Consentimento e LGPD - Este questionário faz parte de uma pesquisa acadêmica de doutorado e tem como objetivo validar um modelo teórico-aplicado na área de Indústria 5.0 e Realidade Aumentada. As informações aqui coletadas serão utilizadas exclusivamente para fins científicos, em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018). Nenhum dado pessoal será divulgado, e a participação é voluntária. Ao prosseguir, o participante declara estar ciente e de acordo com o uso anônimo das informações fornecidas.

Q1 - Questão 1 - Insira seu nome completo.

Q2 - Questão 2 - Função ou cargo atual.

Q3 - Questão 3 - Setor da empresa em que atua.

Q4 - Questão 4 - Principais atividades desempenhadas na empresa.

Q5 - Questão 5 - Tempo de experiência profissional (em anos).

Q6 - Questão 6 - Tempo de contato com os pilares da Indústria 4.0 e/ou 5.0 (em anos).

Q7 - Questão 7 - Tempo de contato com Realidade Virtual e/ou Aumentada (RV/RA) (em anos).

Q8 - Questão 8 - Qual a importância da RV/RA nas suas atividades profissionais?

Q9 - Questão 9 - Você foi previamente apresentado à proposta conceitual do framework em análise?

() SIM

() NÃO

Q10 - Questão 10 - Selecione o link e baixe a planilha contendo a matriz a ser preenchida - link: <https://encurtador.com.br/oHll>

Q11 - Questão 11 - (RESPONDER APÓS PREENCHIMENTO DAS MATRIZES) - Na sua opinião, o framework reflete adequadamente os pilares da Indústria 5.0?

5 = Concordo totalmente

4 = Concordo parcialmente

3 = Neutro

2 = Discordo parcialmente

1 = Discordo totalmente

Q12 - Questão 12 - (RESPONDER APÓS PREENCHIMENTO DAS MATRIZES) - Você acredita que a combinação entre Realidade Aumentada, IoT e Capacidades Dinâmicas favorece a transformação digital sustentável?

5 = Concordo totalmente

4 = Concordo parcialmente

3 = Neutro

2 = Discordo parcialmente

1 = Discordo totalmente

Q13 - Questão 13 - (RESPONDER APÓS PREENCHIMENTO DAS MATRIZES)
- Comentários ou sugestões para aprimoramento do framework.