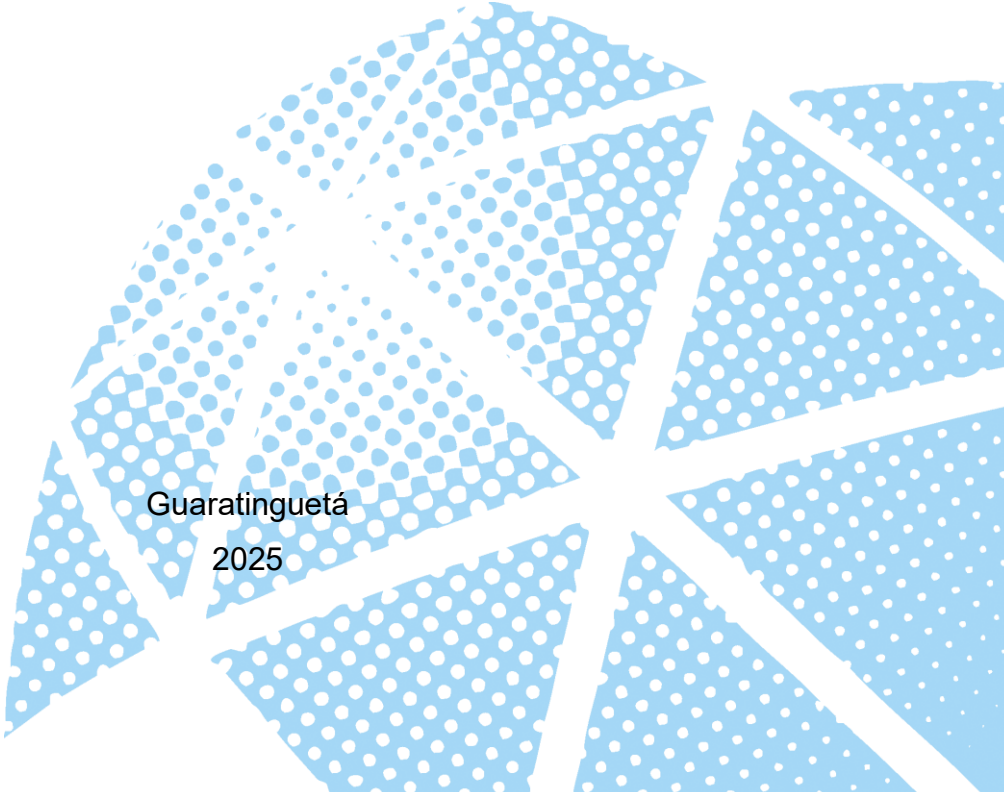


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências- Campus de Guaratinguetá

FAGNER ASBAHR DE OLIVEIRA

**TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA IMPULSIONAR A
EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE UMA ESTAMPARIA AUTOMOTIVA:
UMA PESQUISA-AÇÃO**

Guaratinguetá
2025



FAGNER ASBAHR DE OLIVEIRA

**TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA IMPULSIONAR A
EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE UMA ESTAMPARIA AUTOMOTIVA:
UMA PESQUISA-AÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão e Otimização

Orientador(a): Profa. Dr. Gislaine Cristina Batistela.

Coorientador(a): Profa. Dr. Ana Lucia Figueiredo Facin.

Guaratinguetá

2025

O48t	Oliveira, Fagner Asbahr de Tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 para impulsionar a eficiência operacional de uma estamparia automotiva: uma pesquisa-ação / Carlla Camilly Verneque Cordeiro de Moura Jorge – Guaratinguetá, 2025. 170 : il. Bibliografia: f. 148-157 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Gislaine Cristina Batistela Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ana Lucia Figueiredo Facin 1. Eficiência organizacional 2. Indústria 4.0. 3. Inovações tecnológicas. I. Título. CDU 65.011.8(043)
------	---

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto esperado na sociedade envolve diferentes dimensões. Do ponto de vista científico e técnico, a pesquisa contribui para ampliar o conhecimento sobre a aplicação da Indústria 4.0 na manufatura, oferecendo bases práticas para sua adoção. Nos aspectos social e educacional, favorece a qualificação da mão de obra e a formação de profissionais preparados para lidar com tecnologias digitais. Em termos econômicos e inovadores, apoia ganhos de eficiência produtiva e competitividade, além de estimular a adoção de soluções digitais em setores estratégicos. A pesquisa também promove inserção local, regional e nacional, ao fortalecer a indústria automotiva no Brasil, e dialoga com a internacionalização, por alinhar-se a referenciais globais de maturidade digital. Finalmente, contribui para o desenvolvimento sustentável e cultural, ao incentivar práticas produtivas mais eficientes e a difusão de conhecimento em torno das tecnologias habilitadoras da I4.0.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The expected societal impact covers several dimensions. From a scientific and technical perspective, the research expands knowledge on the application of Industry 4.0 in manufacturing, providing practical foundations for its adoption. In social and educational terms, it supports workforce qualification and the training of professionals prepared to deal with digital technologies. Regarding economic and innovative aspects, it fosters efficiency gains and competitiveness while encouraging the adoption of digital solutions in strategic sectors. The study also promotes local, regional, and national insertion, while contributing to internationalization by aligning with global digital maturity frameworks. Finally, it advances sustainable and cultural development by encouraging more efficient production practices and disseminating knowledge related to Industry 4.0 enabling technologies.

FAGNER ASBAHR DE OLIVEIRA

**TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA I4.0 PARA IMPULSIONAR A EFICIÊNCIA
OPERACIONAL EM UMA ESTAMPARIA AUTOMOTIVA: UMA PESQUISA-AÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de
Nome da Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Produção

Área de Concentração: Gestão e Otimização

Data da defesa: 19/11/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



GISLAINE CRISTINA BATISTELA

Data: 04/12/2025 16:21:41-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. GISLAINE CRISTINA BATISTELA
Orientadora - UNESP

Documento assinado digitalmente



OCTAVIANO ROJAS LUIZ

Data: 04/12/2025 19:58:53-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. OCTAVIANO ROJAS LUIZ
UNESP

Documento assinado digitalmente



RODRIGO FRANCO GONCALVES

Data: 18/12/2025 07:19:53-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO FRANCO GONCALVES
UNIP

“Dedico este trabalho aos meus pais pelo amor e suporte incondicional, à minha esposa, pelo incentivo constante e pela compreensão, e às nossas filhas, que são minha maior inspiração”

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. Um agradecimento especial à Hyundai Motor Brasil de Piracicaba, pela oportunidade e recursos disponibilizados, que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao meu líder Marcos Oliveira, por seu apoio e incentivo nesse programa.

Meu reconhecimento à Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela excelente formação e infraestrutura que facilitaram minha jornada acadêmica.

Um agradecimento muito especial à Coordenadora do curso e minha orientadora, a Profa. Dra. Gislaine Batistella, a Co-Orientadora Profa. Dra. Ana Faccin e ao Prof. Dr. Jorge Muniz Junior cuja dedicação, conhecimento e incentivo foram fundamentais para minha formação e conclusão deste mestrado.

Não poderia deixar de agradecer à minha família, pelo amor, suporte e compreensão inestimáveis. Vocês são minha maior fonte de motivação e força.

A todos os amigos e colegas que, de alguma forma, ofereceram palavras de incentivo e contribuíram para este trabalho, meu mais profundo obrigado.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

"Se nós soubéssemos o que estávamos
fazendo, não seria chamado pesquisa,
seria?"

Albert Einstein

RESUMO

O estudo teve como objetivo investigar de que maneira a aplicação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 (I4.0) pode impulsionar a eficiência operacional em uma estamparia automotiva. Para isso, foi conduzida uma pesquisa-ação fundamentada no modelo de maturidade digital proposto por Schuh et al. (2020), estruturada em quatro dimensões: recursos, sistemas de informação, estrutura organizacional e cultura. A estamparia analisada apresentava um cenário inicial marcado por registros manuais, sistemas fragmentados e baixa integração entre áreas, fatores que comprometiam a confiabilidade das informações e dificultavam a gestão de inventário, o planejamento da produção e o controle de qualidade. A pesquisa foi conduzida por meio de três pilares metodológicos: observação participante associada à análise documental, questionário aplicado a 75 respondentes e entrevistas realizadas com 12 profissionais dos grupos estratégico, técnico e operacional. A intervenção resultou na implantação de 11 dashboards operacionais principais, integrando dados em tempo real provenientes de PLCs, sistemas MES e ERP. Essa integração possibilitou maior rastreabilidade, padronização dos registros e redução do tempo de resposta para decisões de produção e qualidade. A nova medição de maturidade digital, realizada após a implementação das ações, evidenciou evolução mensurável em todas as dimensões avaliadas. Conclui-se que a aplicação estruturada de IoT, CPS e MES, alinhada à pesquisa-ação, contribuiu para superar limitações operacionais da estamparia e ampliar sua maturidade digital, reforçando a relação entre a I4.0 e a eficiência na manufatura automotiva.

Palavras-chave: Indústria 4.0; eficiência operacional; estamparia automotiva; maturidade digital; pesquisa-ação.

ABSTRACT

The study aimed to investigate how the application of Industry 4.0 (I4.0) enabling technologies can enhance operational efficiency in an automotive stamping plant. To this end, action research was conducted, grounded in the digital maturity model proposed by Schuh et al. (2020), structured into four dimensions: resources, information systems, organizational structure, and culture. The stamping plant under analysis initially presented a scenario characterized by manual records, fragmented systems, and low integration between areas, factors that compromised information reliability and hindered inventory management, production planning, and quality control. The research was developed through three methodological pillars: participant observation combined with document analysis, a questionnaire applied to 75 respondents, and interviews with 12 professionals from strategic, technical, and operational groups. The intervention resulted in the implementation of 11 key operational dashboards, integrating real-time data from PLCs, MES, and ERP systems. This integration enabled greater traceability, standardization of records, and reduced response time for production and quality decisions. The new measurement of digital maturity, carried out after the implementation of the actions, showed measurable progress across all evaluated dimensions. It is concluded that the structured application of IoT, CPS, and MES, aligned with action research, contributed to overcoming operational limitations of the stamping plant and enhancing its digital maturity, reinforcing the relationship between Industry 4.0 and efficiency in automotive manufacturing.

Keywords: Industry 4.0; digital transformation; operational efficiency; digital maturity; action research.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da revisão teórica da literatura	20
Figura 2 - Estrutura em funil da fundamentação teórica	22
Figura 3. Perspectiva histórica das revoluções industriais	24
Figura 4 - Estágios no caminho de desenvolvimento da I4.0 e valor dos benefícios.27	
Figura 5 - Fase e desdobramento das etapas da pesquisa-ação.....	47
Figura 6 - Organograma da equipe multidisciplinar	48
Figura 7 - Diagrama de análise da maturidade digital com os dados empíricos	56
Figura 8 - Distribuição das menções por eixo e grupo (<i>Sankey diagram</i>)	63
Figura 9 - Relatório de Produção da Prensa	70
Figura 10 - Fluxograma da programação da produção e inventários	73
Figura 11 - Modelo de diagrama proposto.....	82
Figura 12 - Mapa de cobertura atual e análise SNR em 2.4 GHz e 5 GHz	88
Figura 13 - Simulação da nova configuração da rede	90
Figura 14 - Análise de interferência entre canais	91
Figura 15 - Distribuição espacial dos dispositivos digitais no layout da estamperia..	92
Figura 16 - Arquitetura técnica do sistema MES implantado na estamperia	94
Figura 17 - Dashboard com os resultados de OEE da prensa principal	101
Figura 18 - Dashboard: Plano de produção da linha de blanks.....	102
Figura 19 - Dashboard: Lista de não conformidades da qualidade	102
Figura 20 - Coleta de dados do controle da produção	105
Figura 21 - Controle dos eventos da produção: Gestão da qualidade de produtos.107	
Figura 22 - Comparativo do inventário e planejamento da produção	108
Figura 23 - Perfil dos respondentes por função e tempo de casa	111
Figura 24 - Perfil dos respondentes por horário de trabalho	112
Figura 25 - Perfil dos respondentes: nível de experiencia declarado	113
Figura 26 - Percepção da experiencia das tecnologias aplicadas na produção	117
Figura 27 - Benefícios percebidos pela digitalização	118
Figura 28 - Desafios percebidos no processo de implantação das tecnologias	118
Figura 29 - Indicador <i>Net Promoter Score (NPS)</i>	119
Figura 30 - Distribuição das citações por eixo temático e grupo de entrevistados ..	125

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Revisão teórica por protocolo Prisma.....	21
Quadro 2 - Estágios da maturidade I4.0 do molde ACATECH	25
Quadro 3 - Tecnologias habilitadoras da indústria 4.0	28
Quadro 4 - IoT aplicada nos processos de manufatura.....	34
Quadro 5 - Aspectos da Qualidade da produção e aplicação dos CPS	37
Quadro 6 - Impactos no gerenciamento de inventário e planejamento da produção	39
Quadro 7 - Desafios de implementação da I4.0 em manufaturas	42
Quadro 8 - Protocolo metodológico sumarizado da pesquisa-ação	58
Quadro 9 - Perfil dos Entrevistados: avaliação antes da implementação	60
Quadro 10 - Eixos temáticos e significados.....	62
Quadro 11 - Frequência de menções por eixo temático e grupos dos entrevistados	63
Quadro 12 - Principais co-ocorrências entre eixos temáticos.....	65
Quadro 13 - Lista de documentos com registros manuais	71
Quadro 14 - Processos observados e principais fragilidades.....	74
Quadro 15 - Resultados das avaliações da maturidade da I4.0	75
Quadro 16 - Cronograma gerencial das iniciativas da I4.0.....	80
Quadro 17 - Planejamento dos dispositivos digitais por área de aplicação.....	83
Quadro 18 - Exemplo de concepção de telas de interface.....	84
Quadro 19 - Especificações dos dispositivos digitais instalados na estamperia	91
Quadro 20 - Tecnologias utilizadas no desenvolvimento do sistema MES	95
Quadro 21 - Arquitetura de coleta e envio de dados entre CLPs e sistema MES	96
Quadro 22 - Cronograma de desenvolvimento técnico por setor da estamperia.....	97
Quadro 23 - Principais Dashboards desenvolvidos no sistema MES e suas finalidades	99
Quadro 24 -Distribuição das respostas ao questionário de avaliação (escala Likert)	114
Quadro 25 - Perfil dos entrevistados	120
Quadro 26 - Eixos temáticos das entrevistas	123
Quadro 27 - Análises quantitativa detalhadas por grupo.....	124
Quadro 28 - Sínteses dos eixos temáticos por grupo de entrevistas	127
Quadro 29 - Matriz de co-ocorrência entre os eixos temáticos das entrevistas	129
Quadro 30 - Sumario dos resultados da nova maturidade I4.0	140

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	QUESTÕES DE PESQUISA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	17
1.4	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	EVOLUÇÃO DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS	23
2.2.	INDUSTRIA 4.0	24
2.2.1	Maturidade da implementação das tecnologias da indústria 4.0	25
2.3	TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDUSTRIA 4.0	28
2.4	TECNOLOGIAS DA I 4.0 E SEUS IMPACTOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DA MANUFATURA	28
2.5	ESTUDOS DE CASO DA APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I 4.0 EM PROCESSOS DE MANUFATURA	33
2.5.1	Aplicação da IoT em controles de processo	33
2.5.2	O papel dos CPS na melhoria da qualidade	35
2.5.3	Coleta de dados em tempo real	37
2.5.4	Integração entre ERP, MES, controle de chão de fábrica: aplicações da Norma ISA-95	40
2.5.5	Desafios da I4.0 e suas tecnologias habilitadoras em manufaturas	40
2.5.6	Estamparia e I4.0: ganhos operacionais e desafios de implementação	43
3	METODOLOGIA	44
3.1	PESQUISA-AÇÃO.....	44
3.2	ORGANIZAÇÃO DAS 3 FASES DA PESQUISA-AÇÃO	45
3.2.1	Fase 1: Diagnóstico.....	49
3.2.2	Fase 2: Implementação.....	51
3.2.3	Fase 3: Avaliação dos resultados de implementação.....	53
3.3	REPRESENTAÇÃO METODOLÓGICA DA AVALIAÇÃO MATURIDADE DIGITAL	56
3.4	PROTOCOLO SUMARIZADO DA PESQUISA	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	DIAGNÓSTICO INICIAL	59
4.1.1	Resultados das entrevistas	60
4.1.1.1	<i>Perfil dos entrevistados.....</i>	60
4.1.1.2	<i>Eixos temáticos e codificação no Atlas TI.....</i>	61
4.1.1.3	<i>Relação dos entrevistados aos eixos temáticos.....</i>	62
4.1.1.4	<i>Concorrência entre eixos.....</i>	64
4.1.1.5	<i>Falas representativas por eixo temático.....</i>	66
4.1.1.6	<i>Síntese dos entrevistados.....</i>	68
4.1.2	Análise documental de registros operacionais	70

4.1.3	Observação direta de processos e procedimentos da estamperia.....	72
4.1.4	avaliação inicial da maturidade digital	75
4.1.5	Análise comparativa entre os achados da pesquisa e a literatura	76
4.1.5.1	<i>Aplicação das tecnologias da i4.0 na eficiência operacional.....</i>	76
4.1.5.2	<i>Impacto da obtenção de dados em tempo real na gestão de inventários e planejamento da produção.....</i>	77
4.1.5.3	<i>Desafios da implementação da i4.0 na estamperia automotiva.....</i>	78
4.1.5.4	<i>Diagnóstico da maturidade digital e lacunas identificadas.....</i>	78
4.2	PLANEJAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL	79
4.2.1	Cronograma gerencial da adoção da i4.0.....	79
4.2.2	Ações iniciais: concepção técnica e integração inicial	80
4.2.2.1	<i>Modelagem do fluxo digital e arquitetura técnica.....</i>	81
4.2.2.2	<i>Definição dos dispositivos e infraestrutura técnica.....</i>	83
4.2.2.3	<i>Concepção das interfaces digitais.....</i>	84
4.2.2.4	<i>Integração inicial MES, PLC.....</i>	85
4.2.3	Ações de implementação: física e desenvolvimento funcional	86
4.2.3.1	<i>Expansão da infraestrutura da rede fabril.....</i>	86
4.2.3.2	<i>Instalações dos dispositivos digitais.....</i>	90
4.2.3.3	<i>Desenvolvimento dos softwares na infraestrutura logística e visual</i>	94
4.2.4	<i>Ações conclusivas: validação técnica e testes em ambiente fabril</i>	103
4.3	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	104
4.3.1	Comparativo entre os métodos anteriores e os processos digitalizados	105
4.3.1.1	<i>Coleta dos dados relacionados ao controle de produção.....</i>	105
4.3.1.2	<i>Controle dos eventos de produção, gestão de qualidade dos Produtos</i>	106
4.3.1.3	<i>Gestão de inventários e planejamento de programação de produção</i>	108
4.3.2	Avaliação dos impactos percebidos pelos usuários após a digitalização	109
4.3.3	Análise dos resultados de entrevistas com os grupos estratégico, técnico e operacional	109
4.3.3.1	<i>Perfil dos respondentes.....</i>	110
4.3.3.2	<i>Avaliação das funcionalidades e impactos percebidos</i>	113
4.3.3.3	<i>Exame analítico dos eixos temáticos das entrevistas</i>	126
4.3.4	Nova medição da maturidade digital	135
4.3.4.1	<i>Avaliação de materialidade digital: observação participante e análise Documental</i>	137
4.3.4.2	<i>Avaliação de materialidade: resultado do questionário aos usuários.</i>	137
4.3.4.3	<i>Avaliação da materialidade: resultados das entrevistas.....</i>	139
4.3.4.4	<i>Consolidação da nova medição de maturidade digital.....</i>	140

5	CONCLUSÕES	144
5.1	ALCANCE DOS OBJETIVOS	144
5.2	RESPOSTAS AS QUESTÕES DE PESQUISAS	145
5.3	VERIFICAÇÃO DAS HIPÓTESES	146
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	147
	REFERENCIAS.....	148
	APENDICE A: ENTREVISTA FASE DIAGNOSTICO	157
	APENDICE B: QUESTIONÁRIO AOS USUÁRIOS	159
	APENDICE C: ENTREVISTA POS IMPLEMENTAÇÃO	162
	DADOS CURRICULARES	168

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores Anfavea (2024), a indústria automotiva brasileira enfrenta um período de transformações estruturais, impulsionado pela adoção de novas tecnologias, como veículos elétricos e sistemas avançados de segurança, maior demanda por eficiência energética, uso de combustíveis alternativos e metas de redução da pegada de carbono.

No entanto, a busca por maior eficiência operacional continua sendo um desafio central, especialmente em áreas como automação e conectividade, consideradas estratégicas para elevar a produtividade e reduzir custos (Anfavea, 2024).

A baixa eficiência impacta diretamente a flexibilidade da produção, os custos operacionais e a produtividade. Também gera gargalos na qualificação da mão de obra e limita a transição para modelos industriais mais sustentáveis e integrados (Anfavea, 2024).

Como resposta a esses desafios, a digitalização tem se consolidado como estratégia para ampliar a eficiência e a agilidade nas operações industriais. Tecnologias digitais possibilitam práticas como a manutenção preditiva, que usa dados em tempo real para prevenir falhas e aumentar a disponibilidade dos equipamentos (Colangelo *et al.*, 2022).

A Indústria 4.0 (I4.0) representa a integração entre sistemas físicos e tecnologias digitais, sucedendo a mecanização, a produção em massa e a automação das revoluções industriais anteriores. Seu diferencial está na elevação dos níveis de conectividade, personalização e controle dos processos produtivos (Singh; Goyat; Panwar, 2024).

Segundo Oztemel e Gursev (2020), as tecnologias habilitadoras da I4.0 são instrumentos fundamentais para a digitalização e integração dos sistemas produtivos industriais. Entre essas ferramentas, destacam-se os Sistemas Ciberfísicos (CPS) e a Internet das Coisas (IoT), capazes de monitorar variáveis em tempo real e realizar ajustes automáticos nas operações fabris (Oztemel; Gursev, 2020).

A adoção dessas tecnologias proporciona maior controle dos processos, redução de falhas e agilidade na resposta operacional. Além disso, permite a criação

de valor para o cliente por meio de serviços mais eficientes, personalizados e confiáveis (Llopis-Albert; Rubio; Valero, 2021).

Nesse cenário, a eficiência operacional torna-se um vetor determinante para a sustentabilidade empresarial. A IoT, em especial, tem modificado profundamente os padrões de gestão da produção, ao oferecer dados contínuos sobre desempenho e condições operacionais (Khan *et al.*, 2020).

Para que esses benefícios se consolidem, é necessário elevar o nível de maturidade digital das organizações. Isso envolve a aquisição de tecnologias, a integração de sistemas, a revisão de processos e o alinhamento entre estratégia, operação e cultura (Schuh *et al.*, 2020).

No âmbito desta pesquisa, o objeto de estudo é a estamparia automotiva de uma montadora localizada no interior de São Paulo. Trata-se de uma área responsável pela conformação de chapas metálicas em componentes estruturais como portas, capôs e colunas, que exige alto controle dimensional e gestão coordenada de equipamentos e ferramentas (Kott *et al.*, 2022).

Apesar de sua relevância técnica, a estamparia analisada apresenta baixa maturidade digital. A produção ainda depende de registros manuais, formulários em papel e sistemas não integrados, o que compromete a confiabilidade das informações e a eficiência na tomada de decisão (Diego; Cruz, Moraes, 2015).

Essas limitações se refletem em atrasos na apuração de inventários, falhas na programação e dificuldades na gestão da qualidade. A modernização dos fluxos de informação e controle torna-se, portanto, uma necessidade operacional concreta (Basri *et al.*, 2021 ; Veile *et al.*, 2020).

A transição para um ambiente digital integrado é fundamental para melhorar o planejamento da produção, a gestão de estoques e o desempenho global da estamparia (Oludapo *et al.*, 2024). O fortalecimento da maturidade digital requer um diagnóstico estruturado e ações coordenadas, orientadas por modelos de referência consolidados (Schuh *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, o objetivo desta pesquisa é investigar como tecnologias da I4.0, em especial IoT, CPS e sistemas MES, podem ser aplicadas para revitalizar a eficiência operacional da estamparia automotiva. Para isso, adota-se uma metodologia de pesquisa-ação, por permitir o acompanhamento contínuo, a intervenção prática e a avaliação sistemática em ambiente real. O modelo *Industrie*

4.0 Maturity Index é utilizado como base para analisar o estágio atual da planta e orientar as propostas de evolução rumo à I4.0 (Schuh *et al.*, 2020).

A motivação da pesquisa decorre de desafios concretos enfrentados pela empresa, relacionados à baixa confiabilidade dos dados, à ausência de integração entre sistemas e à lentidão nos fluxos de informação. A adoção planejada de soluções digitais busca reduzir o tempo de resposta, ampliar a rastreabilidade e apoiar a tomada de decisão baseada em dados consistentes.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa contribui para a literatura sobre transição da I4.0 na manufatura, ao apresentar uma análise aplicada em ambiente fabril real. O estudo oferece evidências empíricas sobre os efeitos da digitalização em operações com baixa maturidade tecnológica.

Além de preencher lacunas identificadas na literatura, este trabalho propõe um modelo técnico-organizacional para a adoção estruturada das tecnologias da I4.0, contribuindo com empresas que enfrentam desafios semelhantes no processo de modernização digital.

Com base no problema diagnosticado, na literatura revisada e nas observações iniciais em campo, foram formuladas as seguintes hipóteses analíticas que nortearam o desenvolvimento desta pesquisa:

- 1) A baixa maturidade digital da estamperia automotiva está associada à ausência de integração entre sistemas de gestão e processos operacionais.
- 2) A adoção coordenada de tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, CPS e MES, contribui para a melhoria da confiabilidade dos dados e da rastreabilidade dos processos.
- 3) A disponibilidade de dados em tempo real favorece decisões operacionais mais ágeis e precisas, reduzindo atrasos e retrabalho.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Com base no problema identificado e nos fundamentos teóricos abordados, esta pesquisa foi guiada pelas seguintes questões:

- 1) Como as tecnologias habilitadoras da I4.0, como IoT e sistemas ciber-físicos, podem ser aplicadas para resolver problemas específicos de eficiência operacional na estamperia automotiva?

2) De que maneira a obtenção de dados em tempo real pode melhorar a gestão de inventário e planejamento de produção na estamparia automotiva?

3) Quais são os principais desafios enfrentados pelo processo de manufatura de uma estamparia automotiva na transição para a I4.0?

1.2 OBJETIVOS

Avaliar como a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 pode contribuir para a revitalização da eficiência operacional de uma estamparia automotiva, por meio de uma abordagem de pesquisa-ação orientada pelo diagnóstico da maturidade digital.

Nesse contexto, as inovações tecnológicas associadas à Indústria 4.0 serão exploradas com os seguintes objetivos específicos:

- Investigar de que forma a IoT pode apoiar a coleta e o controle de dados operacionais em tempo real, visando maior eficiência nos processos de produção.
- Analisar o papel dos Sistemas Ciberfísicos (CPS) no monitoramento das condições operacionais e na rastreabilidade automática dos eventos de produção.
- Avaliar o impacto da digitalização e da integração sistêmica, por meio de dados em tempo real, na gestão de inventários e no planejamento da produção.
- Identificar os principais obstáculos técnicos, organizacionais e culturais associados à transição para a I4.0 no contexto de uma estamparia automotiva.

1.3 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Esta pesquisa se justifica, em primeiro lugar, pela existência de uma demanda concreta da empresa estudada, que enfrenta dificuldades recorrentes na estamparia automotiva devido à baixa maturidade digital no processo de manufatura. A área analisada opera com forte dependência de registros manuais, fragmentação de sistemas legados e ausência de conectividade, o que compromete a confiabilidade das informações, dificulta o planejamento da produção e limita a capacidade de resposta da operação.

Neste contexto, a aplicação de tecnologias habilitadoras da I4.0, como IoT, CPS e o MÊS, surgem como alternativa viável para reestruturar o controle de

processos, permitir acesso em tempo real aos dados operacionais e apoiar decisões baseadas em dados estruturados.

Estudos recentes sugerem que, em operações industriais semelhantes, a adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 pode gerar ganhos importantes em planejamento, controle de qualidade e logística, ao promover a digitalização integrada dos sistemas produtivos (Ryalat; Elmoaqet; Alfaouri, 2023).

Já no setor automotivo, trabalhos como o de Conceição et al. (2022) demonstram que a digitalização afeta positivamente toda a cadeia de valor, inclusive com impacto em sustentabilidade e personalização de produtos.

Zhou et al.(2021) ressaltam que a aplicação de gêmeos digitais no processo de estampagem contribui para decisões operacionais mais precisas, ao integrar dados de sensores com simulações numéricas em tempo real. De forma complementar, Modad et al. (2024) apontam que a integração de IoT, CPS e digital twins possibilita a redução de variabilidade dimensional e a rastreabilidade contínua na fabricação de chapas metálicas.

A motivação acadêmica desta pesquisa reside na escassez de estudos interventivos em ambientes fabris reais, sobretudo no setor automotivo nacional.

Embora a literatura sobre I4.0 esteja em expansão, uma pesquisa realizada na base Scopus, com palavras-chave como “Digital Transformation”, “IoT”, “CPS”, “MES” e “Digitalization”, revelou que o Brasil ocupa apenas a 18ª posição no ranking mundial de publicações sobre o tema, sinalizando uma lacuna na produção científica voltada à aplicação prática em ambientes industriais.

Assim, esta dissertação atende a uma necessidade estratégica da empresa e a uma demanda do campo científico. Ao empregar a metodologia de pesquisa-ação em um ambiente fabril real, contribui com soluções aplicadas para o aumento da eficiência operacional na empresa estudada e, ao mesmo tempo, propõe um modelo técnico-organizacional replicável, que pode orientar futuras iniciativas de transição para a I4.0 no setor industrial.

1.4 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está focada na indústria automotiva e tem como base a estamparia de uma montadora sul-coreana instalada no Brasil desde 2011. A fábrica está localizada em Piracicaba, no estado de São Paulo, e tem capacidade para

produzir até 208.000 veículos leves por ano, incluindo três modelos principais: um *hatchback*, sua versão sedã e um utilitário esportivo (SUV).

A empresa está entre as cinco maiores do país em participação de mercado, o que mostra a importância do seu processo produtivo no setor automotivo nacional.

O estudo se concentra apenas no processo de estamparia. As propostas de análise, melhoria e digitalização foram aplicadas exclusivamente nessa área. Outras etapas da produção, como soldagem, pintura ou montagem, não foram incluídas. Essa escolha está ligada ao tipo de método usado — a pesquisa-ação — que exige acompanhamento próximo e detalhado de um setor específico para permitir a aplicação prática das ações.

Embora o modelo desenvolvido possa ser útil em outras áreas da empresa ou em fábricas com características parecidas, a validade dessa aplicação fora do escopo estudado não foi avaliada nesta pesquisa.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além desta introdução.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os conceitos centrais da Indústria 4.0, as tecnologias habilitadoras, a eficiência operacional na manufatura e os principais estudos sobre transição para a I4.0 no setor automotivo.

Na sequência o capítulo 3 descreve a metodologia utilizada, com ênfase na abordagem de pesquisa-ação. São detalhados os procedimentos de coleta de dados, a caracterização da unidade de estudo e o planejamento das ações aplicadas.

O capítulo 4 expõe os resultados obtidos, incluindo o diagnóstico da maturidade digital da estamparia, os desafios encontrados e as propostas estruturadas para apoiar a transição digital e melhorar a eficiência operacional.

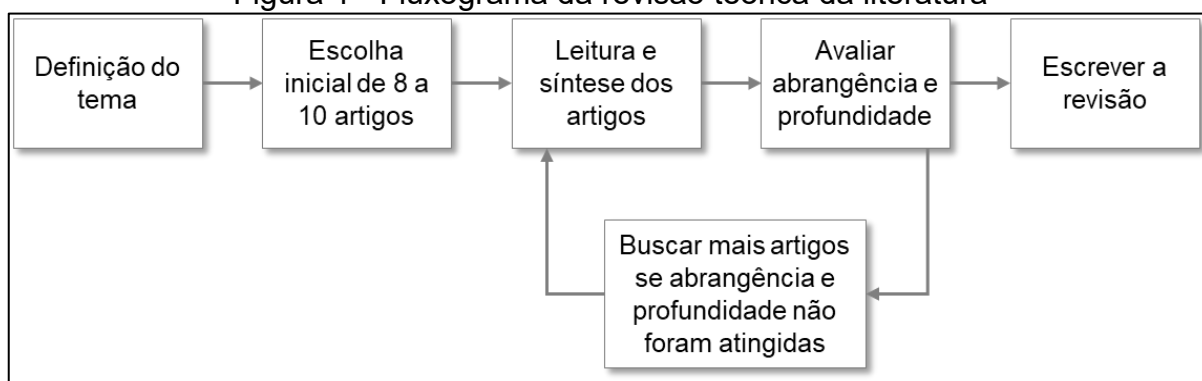
Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais, sintetizando os resultados alcançados, as contribuições práticas e acadêmicas do estudo, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para responder as perguntas de pesquisa a atingir os objetivos do projeto de forma metódica, esta pesquisa inclui uma etapa do processo para uma revisão teórica, para identificar estudos existentes, selecionar e avaliar contribuições, analisar dados, e relatar evidências de maneira que conclusões claras possam ser tiradas sobre o que é e o que não é conhecido e evitar viés (Siddaway; Wood; Hedges, 2019).

A Figura 1 explica como foi realizada a revisão teórica da literatura, para estabelecer uma base sólida para o argumento da pesquisa. Isso envolve revelar as teorias que sustentam o argumento, definir e clarificar os conceitos principais que serão usados nas seções empíricas e estabelecer os limites da discussão (Nakano; Muniz, 2018).

Figura 1 - Fluxograma da revisão teórica da literatura



Fonte: Nakano e Muniz (2018)

A revisão teórica deste estudo seguiu o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), focando na relação ao fluxo de informações em uma revisão sistemática (Moher *et al.*, 2016). Assim, a revisão foi organizada nas etapas de identificação, seleção e elegibilidade. Na fase de identificação, foram definidos dois grupos de palavras-chave relacionados ao tema da pesquisa para iniciar a busca na base *scopus*:

- Palavras chaves relacionadas com a Indústria 4.0 e Eficiência Operacional: "Industr* 4.0" OR "Manufactur* of the Future" OR "Future Manufactur*" OR "Advanced Manufactur*" OR "Advanced Manufactur* Technolog*" OR "Smart Factor*" OR

"Smart Manufactur*" OR "Digitalizat*" OR "Digitalisat*" OR "I4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitisat*"

- Palavras relacionadas com baixa maturidade digital e eficiência operacional. "Analog" OR "Pre digital" OR "pre-digital" OR "Paper-based" OR "Paper Based" OR "Pre-Digital" OR "Pre Digital" "OR" "Operati* efficienc*".

Após a pesquisa inicial nos bancos de dados, a fase de seleção foi conduzida com base nos seguintes critérios:

A busca inicial, considerava apenas artigos e revisões, em inglês e no período de 2020 ~ 2024 como tipos de documentos válidos.

O segundo filtro limitou os artigos as áreas de: *Engineering; Business, Management and accounting; Multidisciplinary*

Na etapa final, a elegibilidade foi determinada pela análise dos títulos e resumos dos documentos para avaliar sua relevância em relação ao tema da pesquisa, no Quadro 8, está o memorial de seleção dos artigos na base *scopus*.

Quadro 1 - Revisão teórica por protocolo Prisma

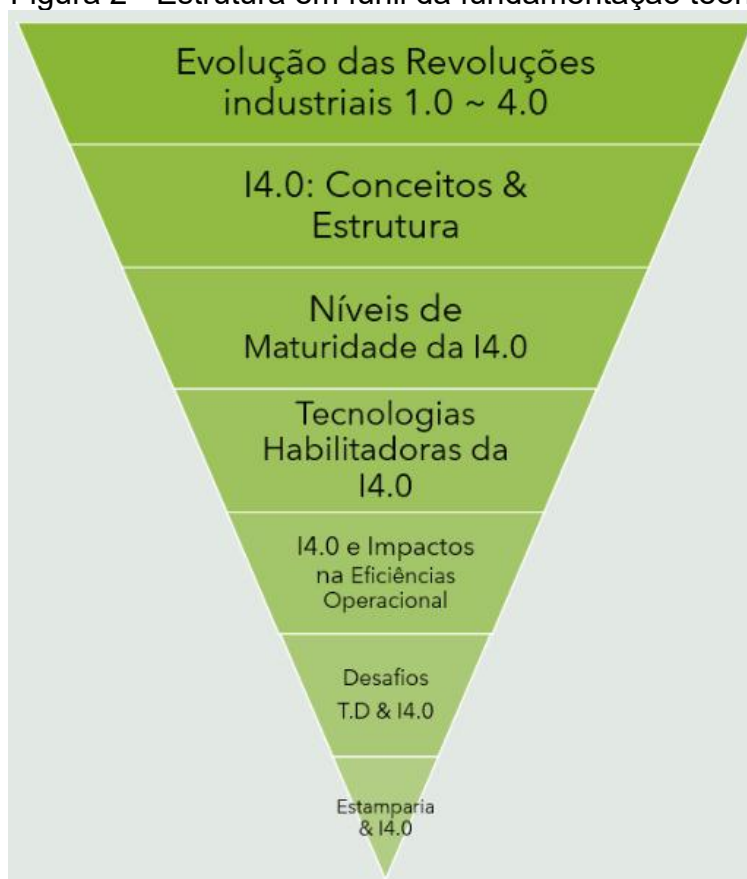
Plataforma	Scopus
Tópicos pesquisados (Identificação) • Artigos/ revisões • Em inglês • De 2018 a 2024	"Industr* 4.0" OR "Manufactur* of the Future" OR "Future Manufactur*" OR "Advanced Manufactur*" OR "Advanced Manufactur* Technolog*" OR "Smart Factor*" OR "Smart Manufactur*" OR "Digitalizat*" OR "Digitalisat*" OR "I4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitisat*" AND Analog OR "Pre digital" OR "pre-digital" OR "Paper-based" OR "Paper Based" OR "Pre-Digital" OR "Operati* efficienc*".
Resultados de documentos	1.001
Area Temática (1º critério de exclusão)	Engineering; Business Management and accounting; Multidisciplinary, Computer science
Resultados de documentos	702 (636 Artigos e 66 Revisões)
Categorias (2º critério de exclusão)	Adesão dos documentos ao objetivo da dissertação.
Resultados de documentos	120 (100 Artigos e 20 Revisões)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Após a aplicação da metodologia PRIMA, 120 artigos foram selecionados, com fichamento dos mais relevantes para elaboração da fundamentação teórica desse estudo.

O processo de revisão teórica seguiu uma lógica de funil, iniciando por uma busca ampla nas bases de dados, avançando por etapas de seleção com base em critérios definidos e resultando em um conjunto reduzido de estudos elegíveis para compor a fundamentação teórica. Esse processo está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura em funil da fundamentação teórica



Fonte: Elaborado pelo autor

No percurso adotado na fundamentação teórica em formato de funil. O capítulo inicia com uma visão geral sobre as revoluções industriais, avança para os conceitos e estruturas da I 4.0 e, em seguida, aborda níveis de maturidade e tecnologias habilitadoras. Na sequência, são discutidos os impactos da Indústria 4.0 na eficiência operacional e os principais desafios associados à sua implementação. Por fim, o foco se estreita para o setor de estamparia, conectando a revisão de literatura ao objeto de estudo da pesquisa.

2.1 EVOLUÇÃO DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

A evolução da revolução industrial pode ser dividida em quatro grandes fases, cada uma marcada por inovações tecnológicas que transformaram a produção industrial e a sociedade. O artigo *Literature review of Industry 4.0 and related technologies* de Oztemel e Gursev (2020) define as quatro revoluções industriais da seguinte forma:

Primeira Revolução Industrial (Indústria 1.0): Teve início na segunda metade do século XVIII e foi marcada pela introdução de máquinas a vapor e sistemas mecânicos. Essa revolução foi essencial para transformar uma economia agrária em uma economia industrial, resultando em grandes avanços nos transportes e na mecanização da produção (Oztemel; Gursev, 2020).

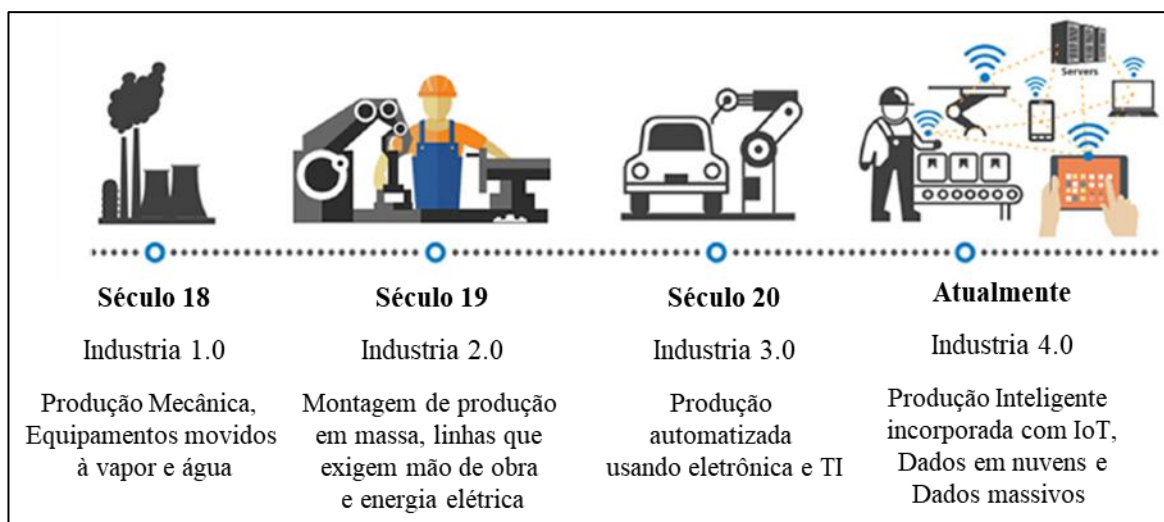
Segunda Revolução Industrial (Indústria 2.0): A partir da década de 1870, a eletrificação e a divisão do trabalho impulsionaram a produção em massa. A utilização de novos materiais, como o aço, e de fontes de energia, como a eletricidade, transformaram o cenário industrial, aumentando a eficiência e a produtividade (Oztemel; Gursev, 2020).

Terceira Revolução Industrial (Indústria 3.0): Conhecida como a Revolução Digital, começou na década de 1970 com o avanço da automação, sistemas eletrônicos e tecnologia da informação (TI). Essa fase foi marcada pela digitalização dos processos industriais, que permitiu o controle mais preciso e a automação das fábricas (Oztemel; Gursev, 2020).

Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0): Iniciada no início do século XXI, é caracterizada pela integração de CPS, IoT, big data, inteligência artificial e entre outras tecnologias habilitadoras. O foco está em fábricas inteligentes, onde as máquinas se comunicam entre si e tomam decisões autônomas em tempo real, promovendo uma produção altamente conectada e automatizada (Oztemel; Gursev, 2020).

A Figura 3, ilustra a perspectiva histórica das revoluções industriais, destacando na linha do tempo as inovações tecnológicas de cada período.

Figura 3. Perspectiva histórica das revoluções industriais



Fonte: Adaptado de Oztemel e Gursev (2020).

2.2 INDÚSTRIA 4.0

A quarta revolução industrial, é caracterizada pela integração de tecnologias emergentes e disruptivas em ambientes de manufatura. Esse conceito abrange a adoção de tecnologias como CPS, IoT, computação em nuvem, big data, inteligência artificial, impressão 3D e a interconectividade de equipamentos e processos (Oztemel; Gursev, 2020).

Essas tecnologias permitem a comunicação autônoma entre máquinas e a tomada de decisões em tempo real, transformando as fábricas em ambientes inteligentes e altamente automatizados (Ghobakhloo, 2020; Santos; Marinho, 2020).

Esta transformação é impulsionada por avanços tecnológicos que permitem às máquinas coletarem e analisarem dados e se comunicarem entre si, levando a fábricas mais inteligentes e interconectadas (Ghadge *et al.*, 2020).

A transição da fabricação tradicional para a I4.0 é vista como um empreendimento estratégico para manter a competitividade em um mercado global, aumentando a produtividade, melhorando a qualidade dos produtos e aprimorando a eficiência operacional (Santos; Martinho, 2020).

Os desafios da implementação da I4.0 incluem a complexidade da transição digital, a falta de qualificação da força de trabalho e altos investimentos. A adoção de tecnologias como IoT, Big Data e Fábricas Inteligentes exige que as empresas superem barreiras como a integração de sistemas, adaptação cultural e

segurança dos dados. A estrutura organizacional e processos precisam facilitar a implementação (Haseeb *et al.*, 2019).

A escassez de recursos financeiros e humanos, especialmente em pequenas e médias empresas, intensifica as dificuldades para adotar inovações sustentáveis (Haseeb *et al.*, 2019).

2.2.1 Maturidade da implementação das tecnologias da indústria 4.0.

A maturidade digital na Indústria 4.0 está associada ao grau de desenvolvimento e integração de tecnologias digitais em uma empresa, permitindo que ela se torne mais eficiente, conectada e autônoma (Schuh *et al.*, 2020)

Diferentes modelos foram propostos para avaliar esse nível de maturidade e guiar empresas na transição digital. Dentre esses modelos, destaca-se o *Industrie 4.0 Maturity Index Managing the Digital Transformation of Companies* desenvolvido pela Academia Nacional Alemã de Ciência e Engenharia, conhecida como ACATECH (Schuh *et al.*, 2020), que define uma abordagem estruturada para mensurar e orientar a evolução das empresas dentro da Indústria 4.0.

Esse índice permite que as empresas avaliem sua maturidade digital com base na implementação e integração das tecnologias habilitadoras da I4.0. Segundo Schuh *et al.* (2020), a maturidade digital é um processo evolutivo e gradual, estruturado em seis níveis: Computação, Conectividade, Visibilidade, Transparência, Capacidade Preditiva e Adaptabilidade. O Quadro 2 mostra como cada estágio representa um avanço na digitalização dos processos produtivos, desde a simples informatização de atividades isoladas até a completa autonomia operacional dos sistemas industriais.

Quadro 2 Estágios da maturidade I4.0 do molde ACATECH

Estágio	Descrição
1. Computação	Utilização de ferramentas digitais básicas de forma isolada para tarefas repetitivas. Máquinas podem não possuir interfaces digitais, sendo operadas manualmente.
2. Conectividade	Máquinas e sistemas começam a se conectar e a trocar dados entre si, permitindo o feedback em tempo real sobre o status das operações de produção.

(Continua)

3. Visibilidade	Monitoramento de processos de ponta a ponta por meio de sensores e dados em tempo real, criando um "sombreamento digital" que reflete o status atual da fábrica.
4. Transparência	O "sombreamento digital" é usado para analisar as causas e efeitos nos processos produtivos, ajudando na tomada de decisões mais fundamentadas e precisas.
5. Capacidade Preditiva	Capacidade de simular cenários futuros com base nos dados coletados, permitindo prever falhas e otimizar o planejamento e a eficiência da produção.
6. Adaptabilidade	Sistemas tornam-se autônomos, adaptando-se automaticamente às mudanças, utilizando dados em tempo real para tomar decisões sem necessidade de intervenção humana.

Fonte: Adaptado de Schuh et al., (2020).

O *Industrie 4.0 Maturity Index* avalia a maturidade digital das empresas considerando quatro dimensões fundamentais:

- Recursos: Incluem a infraestrutura tecnológica disponível e a qualificação da força de trabalho para operar em um ambiente digitalizado;
- Sistemas de Informação: Medem a digitalização dos processos, a interoperabilidade entre sistemas e a automação na coleta e análise de dados;
- Estrutura Organizacional: Examina o nível de integração e padronização dos processos internos, bem como a eficiência da comunicação entre diferentes setores da empresa;
- Cultura: Avalia a aceitação das mudanças tecnológicas e a adaptação da organização à transição digital.

A progressão dentro do modelo ocorre de forma incremental, conforme a empresa supera desafios tecnológicos, organizacionais e culturais. Segundo Schuh et al. (2020), para que uma organização evolua do nível Computação para Conectividade, é essencial que os sistemas sejam integrados e permitam a troca de dados em tempo real.

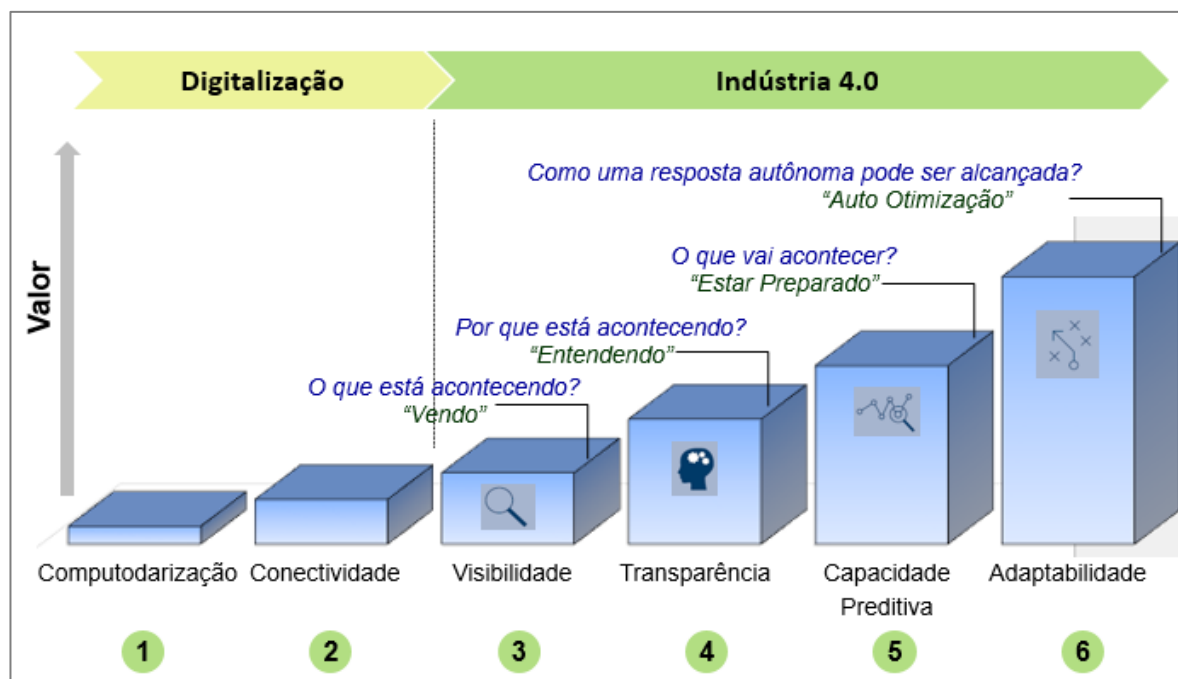
O autor ainda destaca que a transição para o nível visibilidade exige a adoção de sensores IoT e ferramentas de monitoramento digital que criam um sombreamento digital da operação. Para alcançar a Capacidade Preditiva, as empresas precisam implementar ferramentas de análise de dados e inteligência artificial, permitindo previsibilidade e simulação de cenários futuros.

No nível mais avançado, Adaptabilidade, os sistemas tornam-se autônomos, ajustando-se automaticamente às condições operacionais sem necessidade de intervenção humana. Cada fase da evolução da maturidade digital traz benefícios específicos, impactando diretamente a eficiência, a produtividade e a competitividade da empresa (Schuh *et al.*, 2020).

No Brasil, o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) utiliza esse manual como referência para medir a evolução da Indústria 4.0 nas empresas locais, avaliando o nível de maturidade tecnológica e orientando as estratégias de implementação (FIESC, 2022).

A evolução da maturidade na I4.0 está associada à geração progressiva de valor nos processos industriais. Conforme a empresa avança nos estágios de informatização à adaptabilidade, ela obtém benefícios graduais em eficiência, produtividade e competitividade (Schuh *et al.*, 2020). Cada fase reduz riscos e traz ganhos específicos, com resultados positivos em cada etapa. O planejamento gradual garante que os benefícios sejam percebidos ao longo do processo, conforme ilustrado na Figura 4 (Schuh *et al.*, 2020)

Figura 4 - Estágios no caminho de desenvolvimento da I4.0 e valor dos benefícios.



Fonte: Adaptado de Schuh *et al.*, (2020)

A transição entre os níveis de maturidade não ocorre de maneira linear e pode ser influenciada por fatores estruturais, financeiros e culturais (Veile *et al.*, 2020).

Empresas que permanecem no Nível 1 – Computação frequentemente enfrentam desafios relacionados à infraestrutura tecnológica limitada, ausência de integração entre sistemas e resistência organizacional à digitalização Oludapo *et al.*, 2024).

Para superar essas barreiras, a literatura sugere estratégias progressivas, como a adoção gradual de sensores IoT, capacitação da equipe e integração de sistemas legados com novas tecnologias (Tian *et al.*, 2023; Hopkins, 2021).

Dessa forma, o *Industrie 4.0 Maturity Index* classifica o nível de maturidade digital das empresas e orienta os passos necessários para sua evolução, garantindo que a transição para a Indústria 4.0 ocorra de forma estruturada.

2.3 TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDUSTRIA 4.0

As tecnologias habilitadoras da I4.0 são fundamentais para a digitalização e integração dos processos de fabricação, permitindo a integração e automação dos sistemas de produção em um ambiente inteligente e conectado (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019). O Quadro 3 mostra o resumo das tecnologias habilitadoras da I4.0.

Quadro 3 Tecnologias habilitadoras da indústria 4.0

n.º	Tecnologia Habilitadora	Definição	Autores
1	Internet das Coisas (IoT)	Permite que máquinas, dispositivos e sistemas se comuniquem entre si e com a internet, facilitando a coleta e análise de dados em tempo real.	(Ikumapayi et al., 2024) (Soori et al., 2023)
2	Sistemas Ciberfísicos (CPS)	Integram processos de computação, redes e processos físicos. Os sistemas ciberfísicos utilizam sensores e atuadores para alterar condições físicas através de feedback computacional	(Castaño et al., 2019) (Borangui et al., 2020)
3	Computação em Nuvem (<i>Cloud System</i>)	Oferece recursos de processamento de dados e armazenamento de forma remota, proporcionando flexibilidade e escalabilidade para operações industriais.	(Borangui et al., 2019) (L. C. Wang et al., 2021)
4	<i>Big Data, Data mining</i> e Análise de Dados	Envolve o processamento e análise de grandes volumes de dados gerados pelos dispositivos conectados para melhorar a tomada de decisões e otimizar os processos.	(N. Kumar et al., 2021) (Ageed et al., 2021)

(Continua)

5	Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina	Aplicativos de IA e algoritmos de aprendizado de máquina podem prever falhas, otimizar operações e personalizar a produção com base nos dados coletados.	(Konstantinidis et al., 2021) (Alzubaidi et al., 2021) (Mariani et al., 2023)
6	Robótica Avançada	Robôs cada vez mais autônomos e flexíveis que podem realizar tarefas complexas e trabalhar em colaboração com humanos.	(Alzubaidi et al., 2021) (Javaid et al., 2021)
7	Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR)	Estas tecnologias podem ajudar na manutenção de máquinas e no treinamento de funcionários, fornecendo uma camada de informação digital sobre o mundo físico ou criando um ambiente totalmente imersivo.	(Xu et al., 2024) (Hu, 2024)
8	Impressão 3D ou Manufatura Aditiva	Permite a produção de peças complexas diretamente a partir de dados digitais, reduzindo desperdícios e permitindo uma produção personalizada.	(Zhang et al., 2024) (Tuli et al., 2024)
9	Simulação e Modelagem Digital Ou Gêmeos Digitais (Digital Twin)	Uso de simulações computacionais para o planejamento e teste de processos de produção em um ambiente virtual antes de serem aplicados no mundo real.	(Tao et al., 2019) (Fuller et al., 2020)
10	<i>Machine to Machine (M2M)</i>	Refere-se à comunicação direta e automática entre dispositivos ou máquinas sem a intervenção humana. Permite a criação de sistemas de manufatura altamente conectados e autônomos, promovendo o conceito de fábricas autogerenciadas.	(Konstantinidis et al., 2021)
11	<i>Business Intelligence (ERP, MES)</i>	Refere-se ao uso de tecnologias, ferramentas e processos para coletar, integrar, analisar e apresentar dados empresariais de maneira que suporte a tomada de decisões estratégicas. Esses sistemas facilitam a gestão de toda a cadeia de valor, permitindo às empresas melhorarem suas operações, identificarem tendências, e tomarem decisões baseadas em dados.	(Cañas et al., 2022) (Clausen et al., 2020) (Mahmud, 2017)
	<i>ERP Enterprise Resource Planning</i>	Sistema integrado que gerencia e automatiza os principais processos de negócios, incluindo finanças, cadeia de suprimentos, produção, logística, e recursos humanos. Ele centraliza os dados da empresa, facilitando a coordenação entre diferentes departamentos e melhorando a eficiência operacional.	(V. Kumar et al., 2022) (Mahmud, 2017) (Ferrari et al., 2021)
	<i>MES (Manufacturing Execution Systems)</i>	Atua diretamente no chão de fábrica, monitorando, controlando e otimizando as atividades de produção em tempo real. O MES coleta dados de máquinas e operações, gerencia a	(Jaskó et al., 2020) (Neves et al., 2015)

(Continua)

		produção, e garante que os processos de manufatura estejam alinhados com os requisitos de qualidade e eficiência.	
12	Segurança Cibernética	Proteção avançada para garantir a segurança dos dados industriais e dos sistemas de controle de ataques cibernéticos	(Admass et al., 2024) (Kern et al., 2024)
13	Blockchain	Tecnologia de rede distribuída e descentralizada ponto a ponto (peer-to-peer), projetada para registrar e armazenar dados de maneira segura e inalterável. Ela emprega criptografia avançada e um sistema de armazenamento descentralizado, garantindo rastreamento confiável e verificação de transações sem a necessidade de um intermediário central.	(Jabbar et al., 2021) (Ugochukwu et al., 2022)

(Conclusão)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estas tecnologias além de melhorar a eficiência e flexibilidade da manufatura, ainda ajudam a criar sistemas de produção mais inteligentes e adaptáveis, que são capazes de responder de forma proativa às mudanças nas condições de mercado ou nas demandas dos clientes (Oztemel; Gursev, 2020).

No contexto da dessa pesquisa, foram aplicadas as tecnologias como IoT, CPS e MES para revitalizar o processo da estamparia automotiva.

2.4 TECNOLOGIAS DA I 4.0 E SEUS IMPACTOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DA MANUFATURA

A eficiência operacional é a capacidade de uma empresa melhorar seu desempenho em áreas como custo, qualidade, tempo de entrega, flexibilidade e produtividade. Impulsionada pela I4.0 é essencial para o sucesso empresarial, permitindo melhor controle de processos, decisões mais ágeis e maximização de recursos (Haseeb *et al.*, 2019).

Segundo Teixeira *et al.* (2021), no contexto da I4.0 e das práticas de produção enxuta, a eficiência operacional pode ser compreendida como a capacidade de maximizar a produção utilizando o menor número possível de recursos, economizando o uso de energia, materiais e mão de obra, enquanto se minimizam desperdícios e tempos de inatividade.

Para Olsen e Tomlin (2020) as tecnologias como a IoT, manufatura aditiva, inteligência artificial e blockchain têm o potencial de redefinir os principais pilares da eficiência operacional: custo, flexibilidade, velocidade e qualidade. A implementação dessas tecnologias permite que as empresas de manufatura conectem processos e produtos em uma rede digital interligada, promovendo melhorias significativas em eficiência e tomada de decisões baseadas em dados em tempo real.

Sunder e Prascar (2024) argumentam que a integração de tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e sistemas ciberfísicos, com métodos de produção enxuta voltados à eliminação de desperdícios, resulta em uma abordagem mais eficiente para melhorar processos. A digitalização potencializa os benefícios da estratégia de produção enxuta, capacitando a força de trabalho para enfrentar desafios em um ambiente digital. Empresas que equilibram tecnologias avançadas e práticas enxutas alcançam melhorias significativas em produtividade, qualidade e flexibilidade, enquanto a digitalização sem uma base nesse sentido pode não gerar o retorno esperado.

De forma complementar ao IoT, Castaño et al., (2019) define que os Sistemas Ciberfísicos (CPS) são essenciais para o monitoramento e controle em tempo real de processos industriais. Esses sistemas integram sensores, atuadores, *Programmable Logic Controllers* (PLC) e algoritmos avançados, conectados pela IoT, para coletar dados críticos e oferecer uma visão contínua e detalhada das operações. Essa integração permite detectar anomalias, prever falhas e ajustar automaticamente os processos, resultando em maior confiabilidade, redução de desperdícios e aumento da produtividade.

Outro exemplo de aplicação dos CPS é explorado por Möhring et al.; (2020), que demonstra a integração de tablets e dispositivos móveis à manufatura por meio de tecnologias sem fio, como Bluetooth, permitindo a coleta contínua de dados de ferramentas e proporcionando uma visão detalhada e em tempo real das atividades. Isso possibilita que operadores e gestores detectem rapidamente anomalias e recebam notificações sobre a necessidade de ajustes ou manutenção. Como resultado, os CPS melhoram a confiabilidade dos processos, aumentam a vida útil das ferramentas e reduzem paradas não planejadas, promovendo uma operação industrial mais eficiente e conectada.

Soori, Arezzo e Dastres (2023) no artigo de revisão "*Internet of Things for Smart Factories in Industry 4.0*" destacam que a IoT permite monitoramento em

tempo real e manutenção preditiva, reduzindo o tempo de inatividade e os custos operacionais. Além disso, a automação da gestão de inventários e da cadeia de suprimentos melhora o controle de produção e aumenta a eficiência, tornando as operações mais ágeis e adaptáveis às demandas do mercado. A adoção da IoT em fábricas inteligentes impulsiona a integração entre máquinas e processos produtivos, ampliando a conectividade e a disponibilidade de dados.

As tecnologias voltadas para a coleta de dados, como o *Manufacturing Execution System* (MES), desempenham um papel crucial na integração entre o chão de fábrica e os sistemas de gestão empresarial (Balashov et al., 2018). Segundo Jaskó et al., (2020) o uso do MES, permite uma integração eficiente entre o chão de fábrica e os sistemas de gestão empresarial, como o ERP. Essa conexão facilita o monitoramento e o controle das operações de produção em tempo real, oferecendo visibilidade completa dos processos e permitindo a tomada de decisões ágeis com base em dados precisos e atualizados. O MES melhora o fluxo de trabalho ao rastrear cada etapa da produção, garantindo a rastreabilidade de produtos e a gestão eficaz de recursos (Jaskó et al., 2020).

Ferrari et al., (2021) complementa que o uso do *Enterprise Resource Planning* (ERP) é fundamental para o controle preciso de processos produtivos. Ao integrar-se com o MES, o ERP facilita a coleta e a gestão de dados em tempo real, fornecendo uma visão detalhada e contínua de todas as operações. Essa integração permite que as empresas respondam rapidamente a desvios e realizem ajustes necessários de forma eficiente. Como resultado, há um aumento significativo na eficiência do fluxo de trabalho, redução de desperdícios e melhorias consistentes na qualidade e produtividade.

A conectividade da manufatura, que envolve a geração de dados através das tecnologias como CPS, MES e ERP, requer soluções de *Big Data* para processamento e análise. A capacidade de armazenar e processar esses dados em servidores distribuídos e utilizar a computação em nuvem é fundamental para lidar com a escala e a complexidade dos dados gerados. O uso de servidores de dados possibilita a coleta contínua e o armazenamento eficiente das informações, enquanto métodos de mineração de dados, como aprendizado de máquina e processamento distribuído, são utilizados para a análise (Ageed et al., 2021).

Por fim, segundo Lo e Lin (2024), *smart manufacturing* é um conceito central na I4.0, caracterizado pela utilização de tecnologias avançadas como

inteligência artificial (IA), *Machine Learning* (ML) e *Deep Learning* (DL) para melhorar processos de manufatura, garantindo maior agilidade e produtividade. Esse modelo visa a prevenção de erros e garantia de fabricar produtos com alta qualidade, priorizando a automação e integração de sistemas, como a visão computacional, que permite realizar inspeções rápidas e precisas ao longo processo produtivo.

No contexto dessa dissertação, focando no processo de estamparia, amplamente utilizado na fabricação de componentes automotivos, que envolve a conformação de chapas metálicas em peças estruturais, a integração de tecnologias como IoT e CPS permite o monitoramento do processo de forma contínua, ajustando a pressão e a velocidade das prensas, garantindo qualidade e eficiência energética. O uso de prensas automatizadas com dados em tempo real tem contribuído para o aumento da produtividade e a redução de custos, configurando um exemplo de aplicação das tecnologias da I4.0 no setor (Basri *et al.*, 2021).

Entretanto, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios importantes, como a necessidade de desenvolver novas competências na força de trabalho, integrar sistemas legados com tecnologias avançadas e garantir a segurança de dados. Além disso, exige uma mudança na cultura organizacional para estruturas mais ágeis e descentralizadas, bem como investimentos significativos em infraestrutura tecnológica (Veile *et al.*, 2020).

Esses desafios são agravados pela alta taxa de falhas nas transformações digitais, causadas pela falta de clareza estratégica, resistência à mudança e subestimação da complexidade, além de barreiras culturais e operacionais que exigem alinhamento entre estratégia, cultura e tecnologia (Oludapo *et al.*, 2024, 2024).

2.5 ESTUDOS DE CASO DA APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I 4.0 EM PROCESSOS DE MANUFATURA

Esta seção, aborda em detalhes como estas tecnologias foram aplicadas em processos de manufatura, alinhadas com as questões e objetivos da dissertação.

2.5.1 Aplicação da IoT em controles de processo

Conforme descrito por Soori, Arezoo e Dastres (2023), uma visão abrangente dos principais processos nos quais a IoT é aplicada em fábricas

inteligentes no contexto da I4.0. Esses processos contemplam desde a manutenção preditiva até a melhoria da cadeia de suprimentos, utilizando sensores e dispositivos conectados para monitorar e otimizar diferentes aspectos da produção em tempo real.

De maneira semelhante, Khan et al., (2020), apresentam uma visão detalhada dos principais processos nos quais o IoT é aplicado em ambientes industriais no contexto da I4.0. Esses processos abrangem desde a manutenção preditiva até o uso de dados em tempo real para melhorar a produção, utilizando tecnologias avançadas e dispositivos conectados para monitorar, personalizar e melhorar a eficiência operacional das fábricas.

Já Kumar et al. (2022) demonstram como a IoT está sendo aplicada para melhorar as operações de armazenagem e logística, desde a gestão eficiente de inventários até a automação e rastreamento de produtos em tempo real. O estudo tem como objetivo o uso de dispositivos conectados para aumentar a eficiência, reduzir custos e melhorar o uso de recursos em operações logísticas.

O Quadro 4 mostra um sumário destes processos e a aplicação da IoT, de acordo com as definições dos autores Soori, Arezoo e Dastres (2023), Khan et al., (2020) e Kumar et al., (2022).

Quadro 4. IoT aplicada nos processos de manufatura

Processos	Descrição	Aplicação	Benefícios
Manutenção Preventiva & Preditiva	Monitoramento contínuo da saúde das máquinas, e veículos, prevendo falhas e permitindo manutenção antes de quebras.	Sensores IoT detectam vibrações anormais em uma máquina ou veículo e agendam manutenção preventiva	Reduz o custo com reparos emergenciais, minimiza tempo de inatividade não planejada e prolonga a vida útil dos equipamentos
Monitoramento inteligente de máquinas	Monitoramento contínuo da saúde e desempenho das máquinas para evitar quebras e otimizar operações	Sistema de monitoramento que ajusta automaticamente a operação de uma máquina para evitar sobrecarga	Melhora a eficiência operacional e evita paradas inesperadas
Eficiência Energética	Monitoramento em tempo real do consumo de energia para identificar ineficiências e otimizar o uso.	Sensores ajustam o consumo de energia em equipamentos durante períodos de menor uso.	Ajuda a otimizar o uso de energia, reduzindo custos e melhorando a sustentabilidade
Gestão de Inventários	Rastreamento em tempo real de níveis de estoque, automação da reposição e previsão de demanda	Reabastecimento automático de peças quando o nível de estoque cai abaixo de um limite. Sensores RFID monitoram a localização e o status dos produtos em armazéns.	Facilita uma gestão eficaz de estoques, prevenindo excessos e faltas de produtos, o que contribui para a redução de custos. Minimiza erros de controle de inventário, automatiza a reposição de

(Continua)

			itens e diminui a necessidade (Continua) manual.
Rastreamento De ativos	Rastreamento da localização e condição de ativos, como máquinas e ferramentas, em tempo real	Monitoramento da localização de ferramentas e máquinas em uma fábrica para evitar perdas	Aumenta a eficiência operacional ao garantir que os ativos estejam disponíveis e em boas condições.
Monitoramento Do processo de produção	Coleta de dados em tempo real das linhas de produção para otimizar processos e monitorar KPIs.	Sensores monitoram a temperatura e umidade para garantir as condições ideais de produção.	Melhora a eficiência e a qualidade do processo de produção ao permitir ajustes em tempo real.
Controle de Qualidade	Monitoramento em tempo real para identificar defeitos e garantir que os produtos atendam aos padrões.	Sensores detectam defeitos de fabricação durante manufatura de peças e acionam alertas	Garante que os produtos atendam aos padrões de qualidade, reduzindo o risco de retrabalho ou defeitos.
Melhoria da cadeia de suprimentos	Rastreamento em tempo real de remessas e materiais, otimizando logística e gestão de suprimentos.	Rastreamento via GPS de remessas para otimizar rotas e reduzir custos de transportes.	Otimiza a logística e o transporte, reduzindo custos e melhorando o tempo de entrega
Personalização de produtos	Produção sob demanda e customização em massa, permitindo produtos personalizados de acordo com as necessidades dos clientes.	Produção de peças personalizadas sob demanda para o setor automotivo, com ajustes automáticos nas máquinas.	Aumenta a flexibilidade de produção e a satisfação do cliente com produtos customizados.
Planejamento de produção.	Aumenta a flexibilidade de produção e a satisfação do cliente com produtos customizados	Ajuste em tempo real da linha de produção baseado nos dados de demanda ou de falhas detectadas em tempo real	Otimiza a produção e melhora a resposta às demandas do mercado em tempo real.
Separação de pedidos "Picking"	Acelerar o processo de separação de produtos nos armazéns.	Dispositivos IoT guiam os trabalhadores para os produtos corretos de forma mais eficiente.	Aumento da eficiência, redução do tempo de separação de pedidos
Rastreamento de veículos	monitoramento de veículos durante o transporte e distribuição de produtos.	Dispositivos GPS conectados rastreiam veículos de entrega em tempo real.	Maior visibilidade da cadeia logística e melhoria de rotas, redução de custos de transporte.
Monitoramento ambiental	Controle de fatores como temperatura e umidade no armazenamento de produtos sensíveis	Sensores monitoram a temperatura em tempo real para garantir as condições adequadas de armazenamento.	Prevenção de perdas, garantia da qualidade de produtos perecíveis.

Fonte: Adaptado de Soori, Arezoo e Dastres (2023) ; Khan et al., (2020); Kumar et al., (2022)

A aplicação da IoT em controles de processo desempenha um papel essencial na melhoria da produção e na gestão eficiente de recursos, conforme evidenciado pelos estudos revisados e os exemplos práticos apresentados.

2.5.2 O papel dos sistemas ciberfísicos (CPS) na melhoria da qualidade da produção

A qualidade da produção refere-se à capacidade de uma empresa em atender às expectativas dos clientes, minimizando desperdícios e otimizando recursos. A integração de práticas enxutas com tecnologias da I4.0, como CPS e IoT, permite um controle mais eficiente dos processos produtivos. Esses avanços garantem ajustes em tempo real, resultando em maior precisão, melhor utilização de recursos e melhoria contínua na qualidade dos produtos (Tortorella; Giglio; Van Dun, 2019).

No estudo apresentado por Möhring et al., (2020) os CPS são aplicados no monitoramento de ferramentas de corte em operações de usinagem, onde, sensores integrados coletam dados sobre a condição da ferramenta, como desgaste e vibração, enviando essas informações para dispositivos móveis, como tablets e smartphones. Isso permite o monitoramento em tempo real do processo de corte, possibilitando a tomada de decisões rápidas e precisas, evitando problemas como desgastes excessivos, dessa forma mitigando falhas graves e melhorando a qualidade do produto.

De maneira semelhante, Ikumapayi et al., (2024), discutem como os CPS, aliados à IoT e à análise de big data, promovem a sustentabilidade e melhoram a qualidade da produção. Sensores em equipamentos coletam dados em tempo real, permitindo otimizar processos, reduzir o consumo de energia e minimizar defeitos. A integração de CPS possibilita ajustes automáticos, garantindo conformidade com os padrões de qualidade e eficiência no uso de recursos.

Outro exemplo relevante é apresentado por Ryalat et al. (2023) onde os CPS são aplicados em fábricas inteligentes. Sensores monitoram fatores críticos, como temperatura e umidade, ajustando automaticamente as condições para garantir a produção ideal de componentes eletrônicos. Essa automação otimiza continuamente o processo produtivo, minimizando defeitos e aumentando a consistência dos produtos.

Por fim, Kumar et al. (2022) destacam a aplicação de CPS em operações de logística e armazenagem. Neste contexto, os CPS são integrados a sistemas de gestão de inventário e rastreamento, melhorando o fluxo de materiais e a precisão das operações. Sensores IoT conectados aos CPS monitoram a localização e as condições dos produtos armazenados, garantindo que estejam em conformidade com as especificações de qualidade, mantendo o controle sobre o estado dos produtos durante toda a cadeia de suprimentos.

O Quadro 5 apresentado, é o resultado da revisão dos artigos e resume os principais aspectos da qualidade na produção, destacando como os CPS são aplicados em cada um dos aspectos.

Quadro 5 Aspectos da Qualidade da produção e aplicação dos CPS

Aspecto da Qualidade na produção	Descrição do CPS	Aplicação do CPS	Benefícios
Monitoramento do Processo	Sensores monitoram o processo em tempo real, ajustando automaticamente parâmetros críticos para garantir a conformidade	Ajuste parâmetros de produção em tempo real com base nos dados coletados.	Melhor controle e eficiência do processo, garantindo a qualidade em tempo real.
Gestão de Não Conformidades	Sensores e atuadores detectam desvios de qualidade e fazem ajustes automáticos para corrigir os problemas.	Identificam e corrigem automaticamente desvios de qualidade	Redução de defeitos e prevenção de falhas antes que impactem o produto.
Controle de Manutenção de Máquinas e Ferramentas	Sensores de desgaste e monitoram as condições de ferramentas e máquinas, enviando alertas para tablets quando há necessidade de manutenção.	Monitoramento de desgaste e alertam sobre a necessidade de manutenção.	Prevenção de falhas inesperadas e aumento da vida útil dos equipamentos.
Instruções de Trabalho	Tablets, conectados ao CPS, fornecem instruções atualizadas aos operadores com base no estado atual do processo.	Disponibilidade de instruções atualizadas para os operadores, ajustadas conforme as condições do processo.	Menor margem de erro nas operações, resultando em maior precisão no trabalho dos operadores. Eliminação do uso de papel e maior agilidade para controlar as informações.
Controle de Qualidade em Logística	Sensores de <i>Radio Frequency Identification</i> (RFID) rastreiam a localização e condições dos produtos durante o transporte e armazenamento.	Monitoramento da qualidade dos produtos durante transporte e armazenamento.	Garantia da conformidade dos produtos durante o transporte e armazenamento.
Controle dos Registros de Qualidade e Inspeção	Tablets, dispositivos móveis e RFID registram e exibem automaticamente os dados de qualidade e inspeção em tempo real.	Registros automáticos de inspeção e qualidade são acessíveis em dispositivos móveis.	Acesso rápido aos dados de qualidade e inspeção, maior rastreabilidade e suporte para auditorias. Eliminação do uso de papel e maior agilidade para controlar as informações.

Fonte: Adaptado de Möhring et al., (2020); Ikumapayi et al., (2024); Ryalat et al., (2023) e Kumar et al., (2022).

A aplicação dos Sistemas Ciberfísicos (CPS) em controles de processo é

fundamental para melhorar a qualidade da produção e garantir uma gestão mais eficiente dos recursos, conforme demonstrado pelos estudos revisados e exemplos práticos apresentados.

2.5.3 Coleta do material em tempo real

Inventário é o conjunto de materiais mantidos para atender à demanda e garantir a continuidade da produção. A gestão de inventários está diretamente ligada ao plano de produção, que define o que e quanto produzir com base nos níveis de estoque e demanda. A coleta de dados em tempo real permite ajustes imediatos no plano de produção, melhorando o controle de estoques e aumentando a eficiência operacional (Bueno *et al.*, 2020).

A importância da coleta de dados em tempo real não se limita à gestão de inventários, mas se estende também a processos mais amplos, como as Cadeias de Suprimentos Circulares (CSCs), conforme discutido por Taddei *et al.*, (2022) que enfatiza o papel da I4.0 na implementação das CSCs, destacando que o rastreamento contínuo de produtos e materiais ao longo da cadeia, fornece dados importantes para a tomada de decisões imediatas.

Essa visibilidade melhora a gestão de estoques, o monitoramento e a reposição de materiais, além de aprimorar o planejamento de produção, ajustando a capacidade produtiva à demanda e reduzindo tempos de espera. A coleta de dados em tempo real surge como um pilar para aumentar a eficiência, reduzir custos e promover a sustentabilidade nas CSCs (Upadhyay *et al.*, 2023).

Em ambientes produtivos específicos Mahmoud *et al.*, (2015) descreveu a implementação do sistema MES em uma fábrica de injeção de plásticos para peças de ventiladores e televisores, e mostrou que a coleta de dados em tempo real eliminou erros do sistema baseado em papel, melhorou a resposta a defeitos e reduziu perdas. O monitoramento da Eficiência Geral do Equipamento (OEE) aumentou a produtividade, a gestão de estoques e o planejamento de produção, tornando o processo mais ágil.

Complementando essa análise Wang *et al.* (2018) discute sobre a importância da coleta de dados em tempo real na gestão de inventários. O estudo realizado em uma fábrica de construção modular demonstrou que a implementação de sensores

IoT reduziu em 70% o tempo necessário para inserção de dados de inventário, resultando em uma economia anual de aproximadamente U\$ 24.840. A visibilidade em tempo real dos níveis de estoque permitiu ajustar o planejamento de produção com maior precisão, garantindo o fluxo contínuo de materiais e a redução de desperdícios, alinhando-se aos objetivos de uma cadeia de suprimentos eficiente e sustentável.

No contexto de logística inteligente, o estudo de Ugochukwu et al. (2022) discute a integração de Blockchain com IoT para rastreamento e segurança dos dados em tempo real ao longo da cadeia logística. O uso de dados em tempo real, combinado com a segurança oferecida pela Blockchain, aumentou a eficiência do rastreamento de mercadorias em 25% e reduziu fraudes e erros nos processos de inventário. Esses ganhos permitiram uma gestão mais eficiente de estoques e melhor planejamento de produção, ajustando a demanda às condições reais do mercado.

Por fim, Bueno et al. (2020) explora como as tecnologias da Indústria 4.0, como a IoT e Big Data, permitem que a coleta de dados em tempo real melhore a flexibilidade e adaptabilidade dos processos de produção. O estudo revela que a visibilidade em tempo real sobre o inventário e os processos de produção aumentou a eficiência do uso de recursos em 25%, permitindo uma resposta mais ágil às mudanças na demanda. O planejamento de produção foi ajustado de forma dinâmica, reduzindo os tempos de inatividade e aumentando a capacidade produtiva.

A seguir o Quadro 6 traz um resumo, com diversas obras sobre os principais impactos no gerenciamento de inventário e planejamento da produção, através da obtenção de dados em tempo real.

Quadro 6. Impactos no gerenciamento de inventário e planejamento da produção

Autor	Processo	Impacto / Benefício	
		No Inventário	No Planejamento de produção
(M. Wang et al., 2018)	Construção modular em fábrica de painéis (ACQBUILT, Inc, Edmonton, Canadá)	Redução de 70% no tempo de inserção de dados, economia anual de U\$24.840	Fluxo de produção Just-in-Time implementado, alinhando produção à demanda em tempo real
(Mahmud, 2017)	Processos logísticos e de manufatura integrados com SAP/ERP.	Redução de 30% nas rupturas de estoque, aumento de 20% na eficiência de recursos	Resposta mais rápida a mudanças de demanda, melhoria na eficiência de produção

(Continua)

(Bueno et al; (2020)	Tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas ao planejamento inteligente de produção.	Melhoria na visibilidade e flexibilidade de inventário, aumento de 25% na eficiência dos recursos	Redução no tempo de reprogramação da produção
(D. Kumar et al., 2022)	Operações de armazenamento e logística.	Redução de 50-55% nos custos operacionais de armazenagem	Melhoria na previsão de demanda e organização da produção
(Janczewski, 2019)	Logística reversa integrada à economia circular	Redução de 50% nos resíduos enviados a aterros através da reutilização de materiais	Produção sustentável por meio da reutilização de materiais, redução de custos em 30%
(Mahmoud et al., 2015)	Fábrica de moldagem por injeção plástica (El-Araby, Egito)	Aumento da precisão no controle de inventário, redução de erros operacionais	Redução do tempo de inatividade das máquinas, melhorando a coordenação da produção.
(Neves et al., 2015)	Laminação de alumínio	O MES permitiu rastrear 100% dos materiais em processo, reduziu em 5% o consumo de gás ao detectar desvios automaticamente e eliminou divergências de estoque com a integração ao ERP	A solução reduziu em até 15 segundos o tempo de setup por item, viabilizou reprogramações em tempo real, melhorou a comunicação entre áreas e aumentou a confiabilidade das ordens de produção com base em dados atualizados
(Kim et al., 2023)	“Servitização” (integração de serviços a um determinado produto)	Redução de 30% no desperdício de materiais devido à maior previsibilidade dos processos	Maior flexibilidade na adaptação da produção à demanda dos clientes
(Psarommatis et al., 2022)	Ligas metálicas avançadas, utilizadas em setores como o aeroespacial	Melhoria de 15-20% nos produtos conformes, redução de defeitos	Eliminação de defeitos, resultando em menos retrabalho e desperdício de materiais
(Ugochukwu et al., 2022)	Logística integrada com IoT e Blockchain.	Aumento de 25% na segurança dos dados e redução de fraudes no rastreamento de inventário	Melhoria na escalabilidade e tomada de decisões em tempo real nas operações logísticas

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.4 Integração entre ERP, MES e Controle de Chão de Fábrica: Aplicação da Norma ISA-95

A integração entre os sistemas de gestão corporativa (ERP), execução da

produção (MES) e controle de chão de fábrica, através do PLC e a interface Homem-Máquina (IHM) é um dos pilares técnicos da Indústria 4.0 (Castaño et al., 2019)

Essa integração é tratada pela norma internacional ANSI/ISA-95, publicada pela *International Society of Automation* (ISA) e adotada como padrão industrial para modelar a troca de informações entre os diferentes níveis funcionais de uma organização fabril (ISA, 2010).

A ISA-95 estabelece uma estrutura em cinco níveis: o nível 0 (processo físico), o nível 1 (sensores e atuadores), o nível 2 (controle supervisionado, com CLPs e IHMs), o nível 3 (execução da produção, tipicamente com MES) e o nível 4 (gestão empresarial com ERP). Essa estrutura aplicada em projetos de digitalização industrial, servindo de base para a definição de responsabilidades sistêmicas, automação de fluxos e padronização de interfaces (ISA, 2010).

Conforme destaca Gölzer e Fritzsche (2017), a implementação progressiva da I4.0 exige uma arquitetura escalável e modular, que respeite os domínios funcionais propostos pela ISA-95, promovendo a separação e integração lógica entre os diversos sistemas.

No contexto desta pesquisa, a norma foi utilizada como referência implícita na modelagem do processo proposto, servindo como guia para o posicionamento dos módulos MES, das coletas digitais via tablets, das conexões com PLCs e IHMs, e da interface com o ERP.

2.5.5 Desafios da I4.0 e de suas tecnologias habilitadoras na manufatura

A implementação da I4.0 nas manufaturas enfrenta uma série de desafios que podem ser categorizados em três grandes áreas: tecnológicos, organizacionais e culturais. Esses desafios estão relacionados a integração das tecnologias a infraestrutura, resistência a mudanças por parte das pessoas, e necessidade de revisão de processos internos (Veile et al., 2020) .

No artigo de Veile et al. (2020) o autor destaca que muitas empresas na Alemanha tiveram que repensar seus modelos organizacionais para facilitar essa transição, enfrentando a complexidade de alinhar estratégias de negócios com a adoção de tecnologias como IoT, big data e CPS, sendo essencial que as organizações tenham um planejamento adequado e recursos financeiros disponíveis.

Para Eriksson et al. (2022) a resistência dos funcionários à substituição de processos manuais por ferramentas digitais é um grande obstáculo à adoção da I4.0,

especialmente em empresas com mentalidade tradicional. Para superar isso, é essencial adotar uma abordagem centrada no ser humano, investir em treinamentos e promover a colaboração entre pessoas e tecnologias, facilitando a transição para um ambiente de manufatura mais digitalizado.

Por fim, os desafios tecnológicos esbarram na infraestrutura inadequada, onde a implantação de tecnologias como Big Data, IA, IoT enfrentam dificuldades pela falta de preparo técnico e muitas vezes a necessidade de integração com sistemas novos a plataformas antigas. Além disso, a demanda contínua por investimentos em cibersegurança impõe restrições adicionais ao avanço da digitalização dos processos produtivos (Hopkins, 2021).

O Quadro 7 mostra um resumo dos principais desafios de implementação das tecnologias da I4.0 em manufaturas.

Quadro 7 Desafios de implementação da I4.0 em manufaturas

Autor	Desafios		
	Tecnológicos	Organizacionais	Culturais
(Veile et al., 2020)	Dificuldade de integração de sistemas ciberfísicos, big data e IoT. Política de segurança de dados e infraestrutura inadequada	Adoção de novas tecnologias requer reestruturação organizacional e treinamento de funcionários para suportar mudanças	Resistência dos funcionários e gestores às mudanças tecnológicas, e a necessidade de uma cultura de inovação.
(Oludapo et al., 2024)	Falha na implementação de tecnologias digitais por falta de planejamento técnico adequado.	Falhas organizacionais, como planejamento deficiente e falta de suporte adequado na alocação de recursos para digitalização.	Falta de adesão de funcionários e líderes, com resistência cultural sendo um fator chave nas falhas de transformação.
(Eriksson et al., 2022)	Implementação de ferramentas digitais de controle e planejamento da produção, com desafios técnicos de automação.	Necessidade de ajustar processos organizacionais para a integração de ferramentas digitais, o que requer treinamento específico.	Resistência dos funcionários a novas tecnologias e necessidade de balancear aspectos humanos e tecnológicos.
(Hopkins, 2021)	Adoção de big data, inteligência artificial e IoT, com desafios de infraestrutura, preparo técnico e cibersegurança.	Dificuldades na preparação e treinamento da força de trabalho para usar as tecnologias da Indústria 4.0.	Não abordado.
(Lei & Wang, 2023)	Resistência na implementação de novas tecnologias para aumentar a produtividade e reduzir custos operacionais.	A necessidade de adaptação organizacional para otimizar processos e alocar recursos adequadamente.	Não abordado.
(Dutta et al., 2021)	Falta de maturidade digital e dificuldade em digitalizar processos de controle de qualidade em PMEs.	Adoção limitada de processos digitais devido à falta de estrutura organizacional e suporte para mudanças digitais.	Não abordado
(Mashayekhy et al., 2022)	dificuldade na implementação de IoT para gerenciamento de inventários, com foco em infraestrutura e integração de sistemas.	Não abordado.	Não abordado.

(Continua)

(Ikumapayi et al., 2024)	Integração de IoT, big data e sistemas ciberfísicos para melhorar eficiência e sustentabilidade, com desafios de segurança.	Necessidade de adaptação organizacional para lidar com novos fluxos de trabalho baseados em dados e automação.	Não abordado
(Alzubaidi et al., 2021)	Escalabilidade e processamento de grandes volumes de dados usando <i>deep learning</i> e redes neurais convolucionais.	Não abordado	Não abordado
(Grooss, 2024)	Digitalização de atividades de manutenção, especialmente em relação a limitações de infraestrutura e custo.	Adaptação e capacitação dos funcionários para novas tecnologias em PMEs com recursos limitados.	Não abordado
(Singh et al., 2024)	Integração de IoT, IA e outras tecnologias digitais como desafios técnicos para a implementação eficaz.	A necessidade de planejamento organizacional para integrar os pilares da Indústria 4.0 em manufaturas.	Resistência à adoção das novas tecnologias, especialmente em economias emergentes.
(Tian et al., 2023)	Implementação de tecnologias digitais como big data e IoT para melhorar a eficiência operacional.	A necessidade de adaptar as operações para melhorar a produtividade e integração de práticas digitais.	Não abordado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para superar os desafios apresentados na implementação da I4.0, conforme destacado nos artigos discutidos, é essencial que as empresas adotem uma abordagem estratégica e integrada, com um planejamento rigoroso e a alocação adequada de recursos financeiros e humanos (Veile *et al.*, 2020).

Além disso, Eriksson *et al.*, (2022) propõe que a resistência cultural deve ser enfrentada com programas de treinamento que promovam a colaboração entre pessoas e tecnologias.

No aspecto tecnológico, Hopkins (2021) sugere que as empresas invistam em infraestrutura robusta e cibersegurança, garantindo a integração de sistemas novos com plataformas legadas, além de manter uma evolução contínua em termos de tecnologia e segurança digital.

A superação desses desafios, portanto, depende de uma estratégia que equilibre a modernização tecnológica com a preparação organizacional e a aceitação cultural, permitindo uma transição adequada para um ambiente de manufatura digitalizado e competitivo.

2.5.6 Estamparia e I4.0: Ganhos operacionais e desafios de implementação

A aplicação das tecnologias da I4.0 no contexto da estamparia automotiva tem se mostrado eficaz na melhoria da eficiência operacional. CPS, sensores IoT e

controle preditivo têm viabilizado o acompanhamento em tempo real das variáveis críticas do processo, contribuindo para a redução de refugos, aumento da estabilidade dimensional e menor tempo de parada das máquinas (Awasthi et al., 2021).

A integração entre o ambiente físico e digital permite o controle contínuo da força de estampagem, temperatura e desgaste da ferramenta, com respostas automatizadas via atuadores. Gêmeos digitais implementados em células de estampagem incremental demonstraram maior precisão na conformação, com capacidade de prever desvios antes que causem falhas na peça (Zhou et al., 2021).

O uso de controle preditivo baseado em modelo (MPC) em processos de estampagem possibilitou a estabilização da força de componentes das matrizes, reduzindo a incidência de retorno elástico do metal e variabilidade dimensional. Isso impacta diretamente a produtividade da linha e a qualidade do produto final (Cavone et al., 2022).

Sensores conectados via IoT também foram aplicados com sucesso em ambientes de estamparia de grande escala, gerando dados contínuos para sistemas de monitoramento inteligente. Isso permitiu a identificação rápida de anomalias, ajustes automáticos em tempo de ciclo e a melhoria da coordenação entre linhas produtivas (Havinga et al., 2020).

Do ponto de vista da gestão, sistemas MES têm sido utilizados para integrar dados de chão de fábrica ao planejamento e controle da produção. Em estamparias com alto mix de produtos, a adoção de MES promoveu ganhos em rastreabilidade, sequenciamento e confiabilidade das informações operacionais (Bruno et al., 2020).

No entanto, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios significativos. A integração dos sensores com sistemas legados muitas vezes requer customizações significativas e enfrenta limitações de interoperabilidade entre plataformas industriais (Jang et al., 2022).

A implementação de gêmeos digitais exige maturidade digital elevada e infraestrutura robusta de coleta, armazenamento e análise de dados. Em ambientes ainda parcialmente analógicos, isso impõe altos custos e dificuldades técnicas para calibrar modelos em tempo real (Modad et al., 2024).

Além disso, o uso de soluções de armazenamento de dados em nuvem para planejamento de produção e gestão de inventários traz preocupações com segurança cibernética e controle sobre a propriedade dos dados, exigindo políticas internas claras e investimento em proteção da informação (Simeone et al., 2020).

Modelos matemáticos, como os baseados em *Support Vector Regression* (SVR), traduzido como Regressão por Vetores de Suporte, têm mostrado bom desempenho na previsão de força de retenção e falhas por atrito. Porém, demandam grande volume de dados de alta qualidade e conhecimento técnico especializado para sua calibração e aplicação (Yixiong *et al.*, 2019).

Por fim, a capacitação da mão de obra se apresenta como barreira relevante. A digitalização exige operadores e técnicos aptos a interpretar gráficos, dados, interagir com sistemas MES e compreender alertas emitidos por modelos de IA, o que demanda ações estruturadas de formação profissional (Awasthi *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 PESQUISA-AÇÃO

Este capítulo detalha as etapas da pesquisa e os métodos empregados para a coleta e análise de dados que sustentam este estudo. Adotou-se a abordagem empírica da pesquisa-ação, na qual o pesquisador atua como participante ativo no processo, promovendo etapas de planejamento, ação, observação e reflexão para implementar mudanças e gerar conhecimento aplicável a outros contextos (Mello et al., 2012).

A pesquisa-ação é uma metodologia caracterizada pela participação direta do pesquisador na resolução de problemas organizacionais, sendo amplamente utilizada em contextos nos quais a intervenção prática e a análise sistemática ocorrem simultaneamente (Westbrook, 1995).

Diferencia-se do estudo de caso por envolver um processo cíclico de diagnóstico, implementação e avaliação contínua das ações realizadas (Thillent, 2022).

Neste estudo, a pesquisa-ação foi estruturada com base no modelo de Schuh et al., (2020), um referencial que permite diagnosticar o nível de maturidade digital da empresa e acompanhar sua evolução ao longo da investigação.

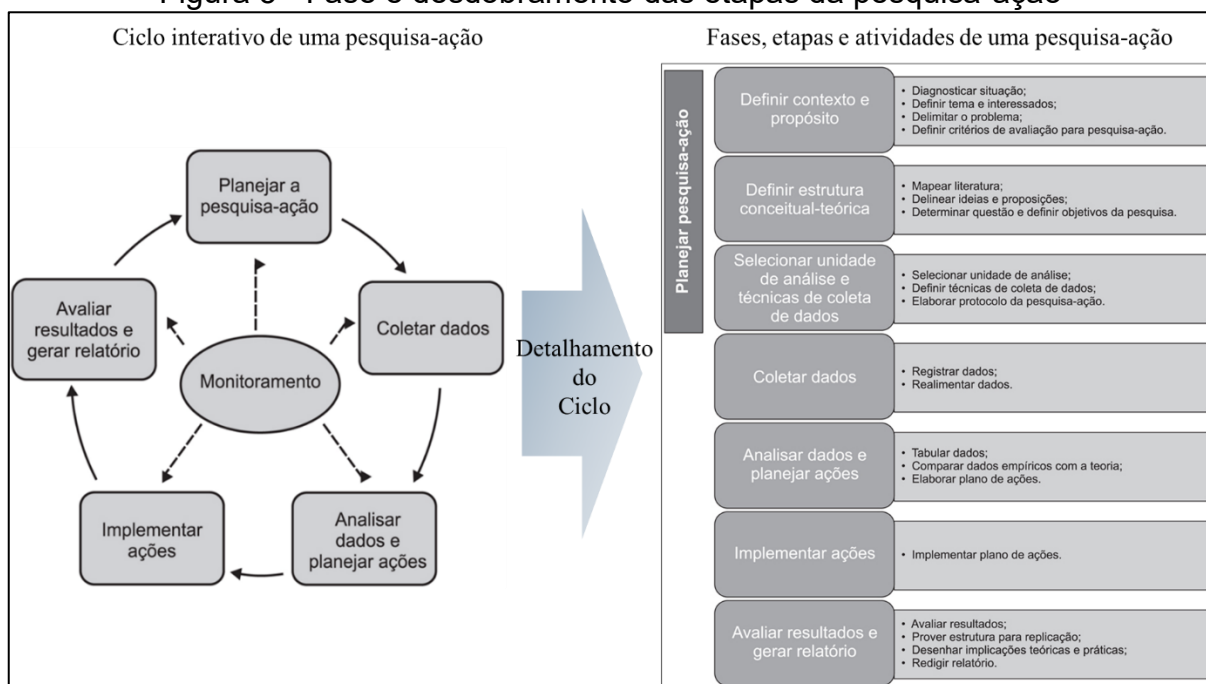
O objetivo é identificar e implementar melhorias na eficiência operacional da estamparia, explorando as tecnologias da I4.0. O processo atual apresenta desafios como dependência de registros manuais, uso de relatórios em papel e atrasos na apuração de inventários e programação da produção, decorrentes da baixa digitalização e do acesso limitado a informações em tempo real.

A pesquisa-ação abrange diversas abordagens metodológicas, permitindo sua adaptação ao contexto estudado. Para Thiollent, (2022), esse tipo de pesquisa ocorre em ambientes organizacionais e envolve grupos ou hierarquias que enfrentam dificuldades, exigindo planejamento criterioso e participação ativa dos envolvidos. Segundo Miguel *et al.* (2018), seus objetivos podem ser divididos em:

- a) Objetivo técnico: busca resolver um problema prático, identificando soluções e sugerindo ações para transformar a situação estudada.
- b) Objetivo científico: coleta informações difíceis de obter por outros métodos, ampliando o conhecimento sobre situações específicas.

A pesquisa foi organizada em três fases: (i) Diagnóstico, (ii) Plano de implementação e (iii) Avaliação dos resultados pós-implementação. Cada fase seguiu cinco etapas: planejamento, coleta de dados, análise dos dados e planejamento das ações, implementação das ações e avaliação dos resultados (Thiollent, 2022). Esse encadeamento, representado na Figura 5, é iterativo e prevê monitoramento contínuo, permitindo a retroalimentação do estudo e a integração entre teoria e prática.

Figura 5 - Fase e desdobramento das etapas da pesquisa-ação



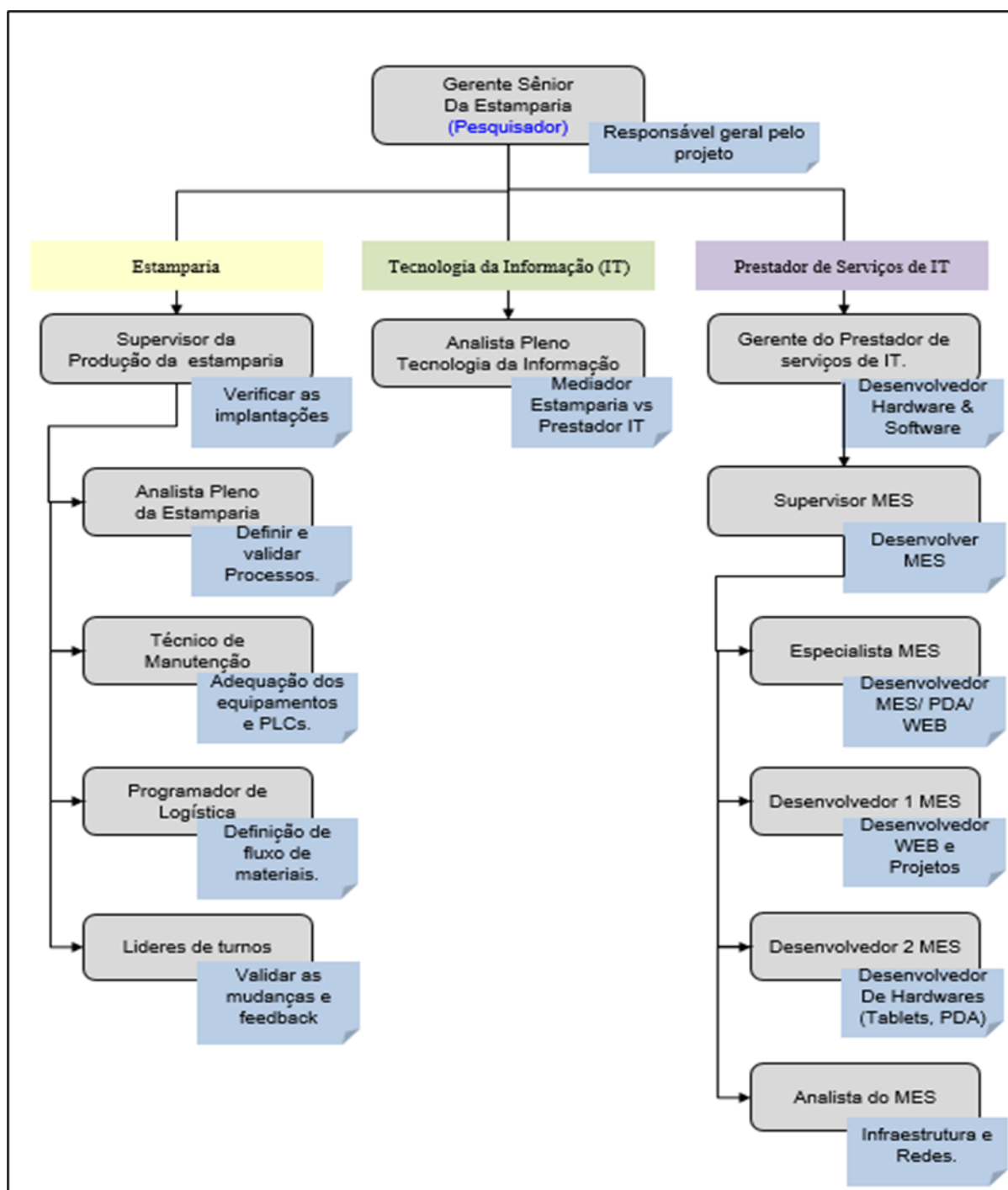
Fonte: Adaptado de Thiollent (2022).

3.2. ORGANIZAÇÃO DAS 3 FASES DA PESQUISA-AÇÃO

A condução empírica foi realizada por um grupo multidisciplinar responsável por planejar, executar e monitorar as três fases da pesquisa-ação. A Figura 6 apresenta o organograma do time, composto por representantes de Produção, Qualidade, Manutenção, PCP e TI, sob coordenação do pesquisador.

Esse arranjo assegurou a integração entre áreas e a rastreabilidade das decisões ao longo das fases. Em termos conceituais, a organização das fases segue a lógica iterativa da pesquisa-ação representada na Figura 6 (Thiollent, 2022).

Figura 6 - Organograma da equipe multidisciplinar



Fonte: elaborado pelo autor.

O organograma apresentado ilustra a estrutura de governança do projeto, evidenciando a relação entre os diferentes atores envolvidos na implementação das soluções tecnológicas na estamparia. No topo da hierarquia, o Gerente Sênior da Estamparia assume a responsabilidade geral pelo projeto, coordenando a integração entre a operação e a área de tecnologia.

A equipe está dividida em três frentes principais: Estamparia, Tecnologia da Informação (TI) e Prestador de Serviços de TI. A estamparia concentra-se na adaptação dos processos produtivos às novas soluções, envolvendo supervisores, analistas e técnicos que atuam diretamente na validação e implementação das mudanças.

A área de TI tem o papel de mediar as demandas operacionais e convertê-las em requisitos técnicos, garantindo a compatibilidade das soluções digitais com a infraestrutura existente.

O prestador de serviços de TI é responsável pelo desenvolvimento de software e hardware, incluindo o sistema MES (Manufacturing Execution System), dispositivos móveis e redes industriais.

Essa estrutura organizacional favorece um modelo colaborativo, em que cada setor contribui para o desenvolvimento e implementação das soluções, promovendo ciclos iterativos de validação. A interação contínua entre os profissionais possibilita a adaptação dos sistemas às necessidades da produção, assegurando maior confiabilidade no processo de adoção da I4.0

3.2.1 Fase 1: Diagnóstico

Esta fase descreve como foi conduzido o diagnóstico inicial e como foi estabelecida a referência de maturidade digital nas dimensões Recursos, Sistemas de Informação, Estrutura Organizacional e Cultura, no modelo proposto por Schuh et al., (2020), no período de dezembro/2023 a março/2024.

Seguiu-se o encadeamento conceitual representado na Figura 5, descrito na Seção 3.1 (Thiollent, 2022): diagnosticar a situação e delimitar o problema; mapear a literatura e formular questões/objetivos; selecionar a unidade de análise e definir técnicas; elaborar o protocolo (roteiro de entrevistas, fichas de observação, planilha de análise documental e procedimentos de registro/consentimento).

- Observação participante (coleta e tratamento).

A observação foi realizada no chão de fábrica, com registro sistemático de fluxos, rotinas e pontos de falha em fichas padronizadas. As anotações foram digitadas e consolidadas em planilha de eventos (processo, etapa, descrição, evidência registrada), que serviu de base para modelar o fluxo atual de programação

da produção e inventários. Esse fluxo é utilizado, posteriormente, como referência de comparação com o novo processo (analisar dados/planejar ações).

- Análise documental (coleta e tratamento).

Foram levantados e categorizados relatórios de produção, inventários, *check sheets* de qualidade, *production claims* e *checklists* de manutenção/qualidade. Para cada documento, preencheu-se uma planilha de análise contendo: finalidade, informações registradas, lacunas de padronização e integrações ausentes. Essa planilha estruturou o quadro de fragilidades dos registros manuais que orienta o desenho de requisitos para a etapa de implementação.

- Entrevistas com questionário estruturado: coleta e tratamento no Atlas.ti.

As entrevistas foram realizadas em dezembro de 2023, de forma individual, com participantes de três estratos (Gestão; Analistas/Engenharia; Operacional). O entrevistador (pesquisador) registrou manualmente as respostas diretamente no questionário estruturado. Todos os participantes assinaram termo de consentimento.

Para garantir a confidencialidade, os respondentes foram codificados e, nos registros analíticos, mantiveram-se apenas o cargo e o código (p.ex., G1, A2, O7), de modo a permitir a seleção de falas representativas sem identificar pessoas. Os arquivos com as respostas anotadas/transcritas foram digitados e importados no Atlas.ti.

Adotou-se codificação temática dedutiva, guiada por eixos definidos a priori a partir do roteiro, da literatura e dos objetivos da pesquisa, com a finalidade de padronizar a análise entre grupos.

A unidade de codificação foi o trecho (frase/parágrafo), admitindo-se codificação múltipla quando pertinente; considerou-se co-ocorrência quando dois ou mais códigos incidiam sobre o mesmo trecho.

O Atlas.ti foi utilizado para operacionalizar a codificação e gerar saídas técnicas (distribuições de frequência, matrizes de co-ocorrência e diagrama de Sankey) que subsidiarão as análises apresentadas no Capítulo 4, onde também constam os eixos temáticos e suas definições

- Integração analítica e referência de maturidade.

Os achados das três frentes (observação, documentos e entrevistas) foram triangulados em uma estrutura única de análise, confrontados com a revisão de literatura (Capítulo 2) e mapeados às quatro dimensões do ACATECH (Schuh et al., 2020), e então classificado o nível de maturidade.

3.2.2 Fase 2: Implementação

A segunda fase da pesquisa-ação correspondeu à etapa de planejamento e implementação das ações associadas à I4.0 no processo de estamparia, conduzido pela equipe multidisciplinar entre abril de 2024 e maio de 2025. Essa etapa buscou responder às fragilidades identificadas no diagnóstico inicial, com foco na superação da fragmentação sistêmica, da baixa rastreabilidade e da ausência de dados confiáveis para tomada de decisão.

A organização das fases seguiu um cronograma gerencial estruturado em três horizontes temporais (Ações iniciais, de implementação e conclusivas), o que permitiu distribuir as ações conforme sua complexidade técnica e grau de maturidade requerido.

Essa lógica de desdobramento é consistente com a literatura sobre projetos de digitalização industrial, que recomenda fases progressivas de planejamento, testes e estabilização (Frank et al., 2019).

- Ações iniciais: concepção técnica e integração inicial

Realizadas entre abril de 2024 e agosto de 2024, as atividades dessa fase concentraram-se na modelagem do fluxo digital, tomando como referência a norma ISA-95 (ISA, 2010), que define a hierarquia funcional entre níveis de controle (CLPs), execução (MES) e planejamento (ERP).

Foram especificados os dispositivos digitais a serem utilizados (tablets industriais, monitores, quiosques), bem como a infraestrutura necessária, incluindo rede wireless e servidores locais.

Paralelamente, foi desenvolvida a concepção inicial das interfaces digitais, que reproduziram os formulários manuais já existentes, de forma a facilitar a adaptação dos operadores. O pesquisador, em conjunto com a equipe de TI,

supervisionou ainda a configuração inicial da lógica de integração MES–PLC, criando a base para a coleta digital de dados em tempo real.

- Ações de implementação: implantação física e desenvolvimento funcional

Essa etapa, realizada entre junho de 2024 e março de 2025 envolveu a expansão da infraestrutura de rede fabril, a instalação de dispositivos digitais e o desenvolvimento da camada lógica e visual do sistema MES.

Para o dimensionamento da rede wireless, foi realizada análise técnica com software *EkaHau Site Survey*, que mapeou cobertura e interferências, subsidiando o reposicionamento e instalação de novos pontos de acesso (APs).

Os dispositivos foram alocados segundo critérios de criticidade e fluxo produtivo: tablets e PDAs nas linhas e empilhadeiras, quiosques em setores de suporte (manutenção, qualidade, ferramentaria) e monitores em áreas de circulação.

O desenvolvimento do MES seguiu arquitetura segmentada em backend, frontend e comunicação em tempo real, utilizando aplicações como: *Node.js*, *React*, *Vue.js*, *Docker* e *Oracle PL/SQL*.

A integração dos CLPs Siemens foi programada em *Step7/WinCC*, com estruturação modular de blocos de dados para status, alarmes e contadores, garantindo rastreabilidade e sincronização.

O cronograma técnico da implantação foi dividido por áreas da estamparia (qualidade, PCP, logística, linhas de blanks e prensas, ferramentaria, estoques), permitindo validação incremental com entregas sucessivas e ajustes iterativos, em consonância com a lógica de pesquisa-ação.

- Ações conclusivas: validação técnica em ambiente fabril

A última etapa, foi realizada entre março de 2025 a maio de 2025 e contemplou testes práticos realizados diretamente na planta, com participação de operadores, manutenção e qualidade.

O objetivo foi validar a coleta automática de dados, a sincronização dos dispositivos e a confiabilidade dos *dashboards* em operação contínua. As inconsistências detectadas (falhas de apontamento, atrasos de atualização, erros de sincronização) foram corrigidas iterativamente, até a estabilização do sistema.

Essa fase também marcou a validação final da integração completa PLC–MES–ERP, assegurando a rastreabilidade digital e a operação integrada da estamparia.

O acompanhamento metodológico de todas as ações incluiu reuniões semanais da equipe multidisciplinar, registros técnicos de cada entrega, atas de decisão e comparações entre fluxos originais (diagnóstico) e digitalizados.

Essa abordagem assegurou rastreabilidade, coerência metodológica e adaptação contínua às condições reais do ambiente fabril.

3.2.3 Fase 3: Avaliação dos resultados de implementação

A terceira fase da pesquisa-ação correspondeu à etapa de avaliação pós-implementação, conduzida entre junho e julho de 2025. O objetivo foi verificar se as intervenções realizadas na fase anterior produziram avanços na confiabilidade das informações, na integração entre áreas e na maturidade digital da estamparia.

Para tanto, empregou-se um conjunto estruturado de procedimentos metodológicos baseados em três pilares principais: observação participante associada à análise documental, questionário aplicado a usuários e entrevistas com representantes de diferentes grupos hierárquicos.

- **Observação participante e análise documental**

O pesquisador acompanhou diretamente os processos no chão de fábrica, registrando práticas operacionais, fluxos de informação e evidências visuais em fichas padronizadas (data, área, evento e evidência coletada).

Esses registros foram comparados aos fluxos mapeados no diagnóstico inicial, de modo a permitir análise pré-pós-intervenção.

Foram examinados dashboards digitais, relatórios automáticos do MES, históricos de inventário, registros de qualidade, programação de produção e logs de eventos. Essa análise documental possibilitou avaliar mudanças na coleta de dados, no controle de não conformidades e na elaboração do plano de produção.

Como salvaguarda, cada evidência foi arquivada com rastro de origem (nome do relatório, filtro aplicado e período analisado), garantindo rastreabilidade e auditabilidade.

- Questionário eletrônico aplicado aos usuários

O segundo pilar da avaliação consistiu na aplicação de um questionário eletrônico, elaborado no Microsoft Forms e encaminhado a todos os colaboradores da estamparia. Dos 110 funcionários convidados, 75 responderam (68% de participação), contemplando operadores, líderes, analistas, supervisores e administrativos. O questionário foi estruturado em quatro blocos:

1) Caracterização dos respondentes: função, tempo de empresa, turno e familiaridade com sistemas digitais;

2) Avaliação do sistema: 12 questões fechadas em escala Likert de cinco pontos (de “discordo totalmente” a “concordo totalmente”), abordando acesso e confiabilidade dos dados, agilidade na identificação de problemas, integração entre setores, redução de registros manuais, usabilidade e suporte recebido;

3) Perguntas abertas: coleta de percepções espontâneas sobre benefícios e desafios da digitalização, gerando nuvens de palavras.

4) Satisfação geral: medição do índice Net Promoter Score (NPS), classificando respondentes em promotores, passivos e detratores.

Os dados foram exportados automaticamente, tratados em planilhas e analisados por distribuições de frequência, médias posicionais e cruzamentos por função, turno e nível de familiaridade digital. Para as questões abertas, foi utilizada análise textual com nuvem de palavras.

- Entrevistas com os grupos estratégico, técnico e operacional

O terceiro pilar envolveu 12 entrevistas presenciais com representantes dos três grupos hierárquicos definidos no estudo: 2 estratégicos, 4 técnicos e 6 operacionais. As entrevistas foram gravadas em áudio, transcritas na plataforma *Whisper Transcribe* e analisadas com apoio do software *Atlas.ti*.

Adotou-se codificação temática dedutiva, baseada em 11 eixos temáticos previamente definidos, sendo: maturidade inicial, concepção da solução, IoT e coleta de dados, integração de sistemas, qualidade e CPS, estoque e planejamento, barreiras e desafios, integração com operação, validação e feedback, maturidade pós-projeto e recomendações finais.

Cada trecho das entrevistas foi classificado segundo esses eixos, admitindo codificação múltipla quando pertinente. Foram produzidas:

- 1) Distribuições de frequência de códigos por grupo de entrevistados;
- 2) Quadros-síntese comparando focos dos três grupos;
- 3) Matriz de co-ocorrência de códigos para identificar vínculos entre temas;
- 4) Diagrama de Sankey para visualizar associações entre eixos e grupos hierárquicos.

5) Esses recursos permitiram identificar padrões, contrastes e relações de proximidade entre aspectos técnicos, organizacionais e culturais, reduzindo a subjetividade da análise qualitativa.

- Triangulação e reaplicação do modelo de maturidade

A etapa de avaliação pós-implementação foi consolidada por meio de um processo de triangulação metodológica que buscou integrar, de forma coerente, os resultados obtidos nos três pilares da pesquisa: observação participante combinada à análise documental, questionário aplicado a 75 colaboradores e entrevistas realizadas com 12 profissionais de diferentes grupos hierárquicos. Essa triangulação foi concebida como um mecanismo de redução de vieses e de validação cruzada entre fontes de natureza distinta.

O procedimento consistiu em mapear cada evidência empírica às quatro dimensões do modelo de maturidade digital proposto por Schuh et al., (2020), considerando: Recursos, Sistemas de Informação, Estrutura Organizacional e Cultura.

Dessa forma, um avanço identificado em registros documentais, como a substituição de planilhas manuais por dashboards digitais, era confrontado com a percepção registrada no questionário (ex.: confiabilidade e precisão dos dados) e validado ou relativizado pelas entrevistas (ex.: relatos de maior autonomia dos operadores ou de dificuldades iniciais de adaptação).

Quando os três instrumentos convergiam para o mesmo achado, a classificação do estágio de maturidade era considerada consolidada; quando divergiam, a interpretação privilegiava a evidência objetiva dos sistemas digitais, complementada por nuances qualitativas.

Essa integração foi realizada de forma sequencial e sistemática. Inicialmente, as fichas de observação e os relatórios documentais foram examinados para identificar mudanças concretas nos fluxos operacionais.

Em seguida, os resultados do questionário foram analisados para verificar se as percepções dos usuários confirmavam ou relativizavam essas mudanças. Por fim, os relatos das entrevistas foram incorporados como camada interpretativa, permitindo compreender as razões por trás de concordâncias ou discrepâncias.

Esse encadeamento assegurou que a análise refletisse a dinâmica da implementação da I4.0 observada sob diferentes perspectivas. Ao final, a triangulação permitiu construir uma visão articulada da evolução da maturidade digital da estampa, evidenciando como os avanços tecnológicos implementados se traduziram em mudanças organizacionais e culturais.

3.3 Representação metodológica da avaliação de maturidade digital

A avaliação da maturidade digital na fase de diagnóstico (fase 1) e de pós-implementação (fase 3) foi conduzida de forma sistemática, integrando observação participante, análise documental, questionário e entrevistas, sempre em confronto com as dimensões do manual ACATECH (Schuh et al., 2020).

A Figura 7 apresenta o esquema metodológico utilizado, para avaliação da maturidade.

Figura 7 - Diagrama de análise da maturidade digital com os dados empíricos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 PROTOCOLO SUMARIZADO DA PESQUISA

Para sintetizar o percurso metodológico, elaborou-se um protocolo resumido da pesquisa-ação apresentado no quadro 8.

Quadro 8 - Protocolo metodológico sumarizado da pesquisa-ação

Planejar pesquisa-ação						
Definir contexto e Propósito	Definir estrutura conceitual- Teórica	Selecionar unidade de análise e técnica de coleta de dados	Coletar Dados	Analisar dados e planejar ações	Implementar ações	Avaliar resultados e gerar relatório
Diagnosticar a situação: Estamparia automotiva com baixa digitalização, processos manuais e deficiências nos controles operacionais. Definir tema de interesse: Gestão e otimização Delimitar o problema: Processos baseados em papel dificultam a coleta precisa de dados, afetando a produção e o controle operacional. Definir critérios de avaliação para pesquisa-ação Reduzir falhas, retrabalhos e tempo de resposta no planejamento da produção.	Mapear Literatura: Indústria 4.0 & eficiência operacional Delinear ideias e proposições: Lacunas teóricas da R.L e necessidade de praticas observadas na estamparia Determinar questões e definir objetivos da pesquisa: Como a I4.0 pode melhorar processos, qualidade e planejamento na estamparia? Investigar como a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 pode contribuir para a melhoria da eficiência operacional em uma estamparia automotiva.	Selecionar unidade de análise: Operações de produção da estamparia automotiva, com 110 funcionários. Definir técnicas de coleta de dados: 1. Observação participante (processos e documentos). 2. Entrevistas semiestruturadas 3. Análise documental e de registros operacionais (dados históricos, formulários, procedimentos) 4. Questionários exploratórios. 5. Softwares: Atlas Ti, MS Forms, excel. Elaborar protocolo da pesquisa-ação: Definido em ciclos iterativos: diagnóstico, planejamento, intervenção, observação e reflexão, com base em dados coletados e alinhamento com o modelo de maturidade da Indústria 4.0.	Registrar dados: <u>Ciclo 1) Diagnostico</u> 1. Registros operacionais coletados em campo. 2. Entrevistas com lideranças 3. Observações de processos produtivos <u>Ciclo 2) Implementação</u> 1. Retro alinhamento interativo e correções do sistema <u>Período 3) Pós-Implementação</u> 1. Observação participante combinada com análise documental 2. Questionário com usuários 3. Entrevistas com grupos estratégicos, técnicos e operacional Realimentar os dados: Os dados coletados orientaram ajustes nos ciclos seguintes, promovendo melhorias contínuas e embasadas.	Tabular dados: As informações foram organizadas por tipo (qualitativo e quantitativo) e por tema de análise. Elaboração de eixos temáticos no Atlas ti. Comparar dados empíricos com a teoria: Os achados foram confrontados com os pressupostos teóricos da Indústria 4.0 e dos modelos de maturidade digital Elaborar plano de ações, em prazos: Curto: Modelo digital, definição de dispositivos, telas de interação, integração Médio: Expandir redes, instalar dispositivos, desenvolver <u>softwares</u>. Longo: Testes e ajustes do sistema	Implementar plano de ações: Desenvolvimento e instalação dos sistemas: 1. MES: Node.js (backend), React/Next.js (frontend), Vue.js (mobile), C# (auxiliares), Oracle PL/SQL, Docker. 2. Integração: APIs, socket.io, CLPs Siemens (Step7/WinCC), Profibus/Ethernet. 3. Infraestrutura: rede wireless (Ekahau + APs Cisco), servidores locais. 4. Dispositivos: tablets industriais, PDAs, quiosques, monitores de parede. 5. Aplicações: dashboards de produção, qualidade, manutenção e estoques. 6. Testes e correções 7. Treinamentos	Avaliar Resultados: Triangulação dos dados para análise e definição: <u>Diagnóstico Inicial</u> Nível 1: Computação (ACATECH) <u>Resultados:</u> Nível 3: Visibilidade e Nível 4: Transparência Prover estrutura para replicação: Detalhes e roteiro das ações implantadas Desenhar implicações teóricas e práticas: Os achados reforçam os desafios descritos na literatura e apontam lacunas na implementação prática da transformação digital Redigir relatório: Documentar os novos processos e procedimentos de acordo com as novas praticas estabelecidas pelo sistema.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a trajetória da de adoção da I4.0 na estamparia automotiva, abrangendo desde o diagnóstico inicial até a consolidação das mudanças implementadas ao longo do estudo. Para isso, revisita-se a metodologia adotada, fundamentada na pesquisa-ação, conduzida em cinco ciclos básicos.

Essa abordagem permitiu de adoção da I4.0 ocorresse em três fases distintas, todas ancoradas na comparação com a literatura existente:

(1) Diagnóstico Inicial, caracterizado pela identificação dos desafios operacionais e pela avaliação da maturidade digital existente, confrontando os achados com estudos prévios sobre o tema;

(2) Planejamento e Implementação, em que são analisadas as modificações decorrentes da adoção das tecnologias da Indústria 4.0, buscando elevar o nível de maturidade digital e alcançar os objetivos da pesquisa, sempre cotejando os dados obtidos com as referências acadêmicas; e

(3) Avaliação Pós-Implementação, dedicada à verificação dos impactos das mudanças e à análise comparativa dos resultados com os modelos e discussões previamente estabelecidos na literatura.

A estrutura do capítulo segue essa lógica, apresentando uma análise detalhada de cada fase, a evolução da maturidade digital da empresa conforme o *Industrie 4.0 Maturity Index* de Schuh *et al.*, (2020) e a conexão dos resultados com os referenciais teóricos, para uma compreensão aprofundada dos impactos da digitalização no contexto produtivo da estamparia.

4.1 DIAGNÓSTICO INICIAL

O diagnóstico inicial teve como objetivo identificar os principais gargalos operacionais da estamparia, compreender o estágio de maturidade digital da planta e mapear oportunidades de melhoria associadas à aplicação de tecnologias da Indústria 4.0. Esta etapa foi conduzida entre dezembro de 2023 e março de 2024 e envolveu três frentes principais de coleta de dados: entrevistas com colaboradores, análise documental e observação participante.

4.1.1 Resultados das entrevistas

Para compreender os desafios operacionais e o nível de maturidade digital da estamparia automotiva antes da implementação das mudanças, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com 14 colaboradores, distribuídos em três grupos hierárquicos: Gestão, Analistas e Operacional.

As entrevistas ocorreram em dezembro de 2023, durante a fase 1 da pesquisa-ação, e tiveram como foco a coleta, processamento e uso de dados na produção, a integração entre sistemas, os impactos da ausência de informações em tempo real, as barreiras para a digitalização e as sugestões de melhorias.

As respostas foram analisadas com o apoio do software Atlas.ti, permitindo a organização em eixos temáticos, a categorização das falas e a comparação entre os grupos hierárquicos.

4.1.1.1 Perfil dos entrevistados

O grupo de entrevistados foi composto por 14 colaboradores da área produtiva da estamparia, contemplando diferentes funções e níveis hierárquicos. A seleção buscou assegurar diversidade de perspectivas, incluindo supervisores de produção e manutenção, líderes técnicos e de operação, e analistas, bem como operadores diretamente envolvidos com operação de máquinas, controle da qualidade e logística.

Para fins de análise, os entrevistados foram organizados em três grupos hierárquicos: Gestão (1), Operacional (2) e Analistas e Engenheiros (3). Essa classificação permite observar diferenças na forma como os distintos níveis percebem os desafios relacionados à coleta e ao uso de dados, à integração entre processos e às barreiras para a digitalização.

O quadro 9 apresenta a caracterização detalhada dos participantes, indicando nome, função, tempo de casa, tempo na função atual e experiência prévia com projetos de implantação tecnológica.

Quadro 9 - Perfil dos Entrevistados: avaliação antes da implementação

Código	Grupo	Função / Tempo de casa	Experiência com implementação de tecnologias?
G1	Gestão	Supervisor de Produção – 13 anos e 6 meses / 11 meses na função	Sim (Robôs ABB, Sistema de Visão, MES)

(Continua)

G2	Gestão	Gerente de Manutenção – 1 ano e 3 meses	Sim (IBA Analyzer, LMS)
G3	Gestão	Supervisor Sr. de Manutenção – 13 anos / 4 anos na função	Sim (sistemas de visão, IA, sensores, softwares)
G4	Gestão	Supervisor de Produção – 12 anos	Sim (MES e ERP)
O1	Operacional	Líder de Produção – 13 anos / 4 anos na função	Não
O2	Operacional	Líder de Time – Logística – 13 anos	Não
O3	Operacional	Líder de Time – Qualidade – 6 meses	Não
O4	Operacional	Líder de Time – Operação – 6 anos / 2 meses	Não
O5	Operacional	Líder Técnico – Ferramentaria – 3 anos e 2 meses / 1 ano na função	Não
O6	Operacional	Líder de Time – Inspeção – 7 meses	Não
O7	Operacional	Líder Técnico – Estamparia – 3 anos e 10 meses / 1 ano na função	Não
O8	Operacional	Líder de Time – Reparo e Logística – 7 anos / 3 anos na função	Não
A1	Analistas	Especialista Pl. de Processos – 7 anos e 7 meses / 2 meses na função	Sim (cabeçote angular, apalpador digital, sistema de visão)
A2	Analistas	Analista de Processos e Qualidade – 4 anos	Não

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise do perfil revela que os colaboradores possuem tempos de casa variados, desde recém-ingressos com menos de um ano até profissionais com mais de uma década de experiência na estamparia.

Verifica-se ainda que a maior parte dos entrevistados do grupo de Gestão já participou de projetos de implantação tecnológica, ao passo que, no grupo Operacional, não há essa experiência. Essa diferença indica que a percepção sobre os desafios associados à I4.0 tende a variar conforme o grau de exposição prévia a iniciativas de modernização tecnológica.

4.1.1.2 Eixos temáticos e codificação no Atlas.ti

Para organizar e analisar as respostas, as entrevistas foram estruturadas em eixos temáticos, definidos a partir das questões do roteiro semiestruturado. Cada eixo foi associado a um código no software Atlas.ti, permitindo a categorização dos

trechos, a contabilização das ocorrências e a análise comparativa entre os diferentes grupos hierárquicos.

O Quadro 10 apresenta os eixos temáticos, acompanhados de seus respectivos códigos e significados. A descrição foi utilizada para evitar análises ambíguas e deixar claro o conteúdo crítico identificado nos relatos.

Quadro 10 - Eixos temáticos e significados

No	Nome do eixo temático	Descrição
1	Coleta de dados inconsistente	Refere-se à coleta manual, suscetível a erros, omissões e baixa confiabilidade dos registros.
2	Disponibilidade de informações insuficientes	Diz respeito ao tempo elevado para acesso e análise, bem como à ausência de dados em tempo real.
3	Integração e comunicação Falha	Relaciona-se à falta de conexão entre áreas e sistemas, além de ruídos de comunicação entre gestores e operadores.
4	Barreiras de digitalização resistentes	Engloba resistência cultural, custos, complexidade técnica e necessidade de treinamento.
5	Soluções e sugestões necessárias	Reúne propostas de digitalização, padronização de processos e capacitação do time.
6	Gargalos operacionais	Abrange as consequências da indisponibilidade de dados, como atrasos, setups mal programados, decisões reativas e perdas de eficiência.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.3 Reação dos entrevistados aos eixos temáticos

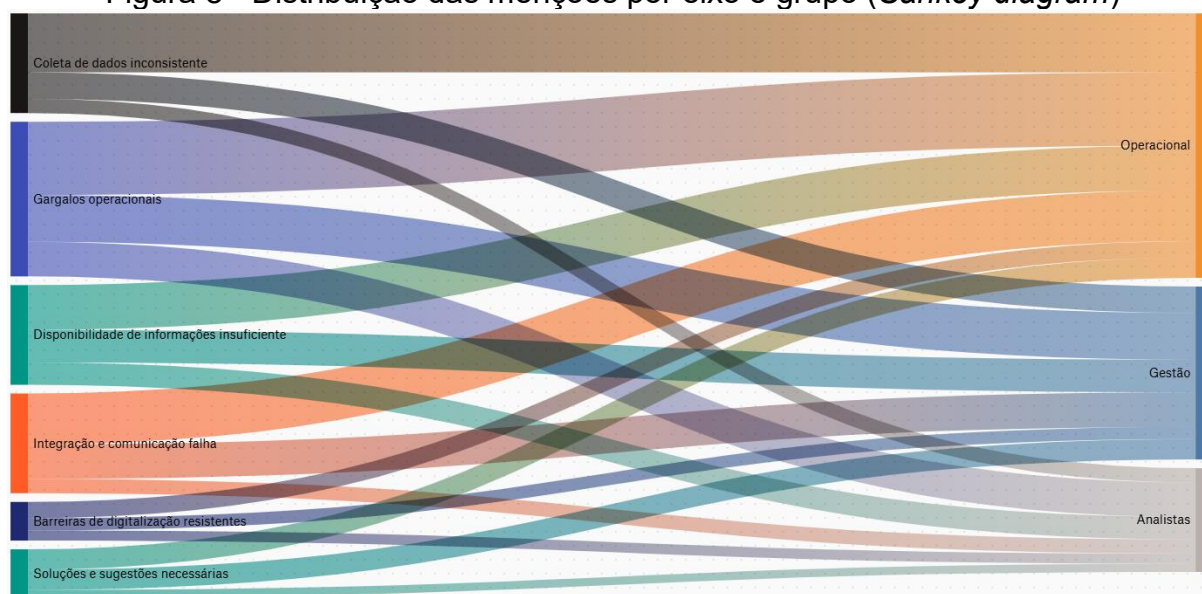
A análise de frequência dos códigos no Atlas.ti permitiu identificar como cada grupo hierárquico reagiu aos eixos temáticos definidos. O Quadro 11 apresenta a distribuição das menções por eixo, evidenciando que o grupo Operacional concentrou maior volume absoluto de citações, reflexo do número maior de participantes (oito entrevistados), enquanto a Gestão (quatro entrevistados) e os Analistas/Engenheiros (dois entrevistados) apresentaram volumes menores, porém com ênfases específicas em alguns eixos.

Quadro 11 - Frequência de menções por eixo temático e grupos dos entrevistados

	Analistas	Gestão	Operacional
Barreiras de digitalização resistentes	5	6	8
Coleta de dados inconsistente	7	13	29
Disponibilidade de informações insufici...	11	16	22
Gargalos operacionais	17	23	36
Integração e comunicação falha	7	17	25
Soluções e sugestões necessárias	4	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para complementar a análise e reduzir a assimetria causada pela diferença de tamanho dos grupos, a Figura X apresenta o fluxo entre eixos temáticos e grupos hierárquicos, por meio de um gráfico Sankey. A espessura das conexões representa a intensidade da relação entre cada tema e cada grupo.

Figura 8 - Distribuição das menções por eixo e grupo (*Sankey diagram*)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados indicam que Gargalos operacionais foi o tema mais citado em todos os grupos (76 menções no total), confirmando a percepção comum de que a ausência de dados confiáveis e em tempo real resulta em travas operacionais, setups atrasados e decisões reativas.

Em segundo plano, três eixos apresentaram recorrência equivalente (Coleta de dados inconsistente, Disponibilidade de informações insuficiente e Integração e comunicação falha, com 49 menções cada). Esses temas formam a base dos problemas relatados, reforçando que falhas de coleta, atraso no acesso às informações e falta de integração entre setores convergem para a geração de gargalos.

Os eixos Barreiras de digitalização resistentes (19 menções) e Soluções e sugestões necessárias (24 menções) tiveram menor frequência, mas representam elementos importantes: enquanto as barreiras refletem resistências culturais e técnicas, as soluções sinalizam caminhos apontados pelos próprios colaboradores.

O gráfico Sankey evidencia ainda que, proporcionalmente, os Analistas foram os mais enfáticos em “Gargalos operacionais” e “Disponibilidade insuficiente”, enquanto a Gestão destacou “Integração falha” e “Coleta inconsistente”. O grupo Operacional, por sua vez, reforçou em maior volume absoluto os gargalos e as falhas na coleta de dados, em consonância com sua vivência prática no chão de fábrica.

4.1.1.4 Concorrência entre eixos

A análise de co-ocorrência realizada no Atlas.ti possibilitou identificar quando dois ou mais eixos temáticos foram mencionados conjuntamente nas entrevistas. Esse cruzamento é relevante porque evidencia a interdependência entre os problemas relatados, permitindo compreender como determinadas fragilidades estruturais se conectam e se reforçam na percepção dos colaboradores.

O Quadro 12 apresenta os pares de eixos com maior frequência de co-ocorrência, bem como a interpretação das relações identificadas.

Quadro 12 - Principais co-ocorrências entre eixos temáticos

Eixo Temático	Coleta de dados inconsistente	Disponibilidade de informações insuficiente	Integração e comunicação falha	Barreiras de digitalização resistentes	Soluções e sugestões necessárias	Gargalos operacionais
Coleta de dados inconsistente	-	1	1	1	2	2
Disponibilidade de informações insuficientes	1	-	25	19	21	1
Integração e comunicação Falha	1	25	-	27	19	2
Barreiras de digitalização resistentes	1	19	27	-	30	2
Soluções e sugestões necessárias	2	21	19	30	-	3
Gargalos Operacionais	2	1	2	2	3	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados mostraram que as associações mais recorrentes envolveram integração e comunicação falha e gargalos operacionais, com 30 ocorrências, seguidas por disponibilidade de informações insuficiente e gargalos operacionais, com 27 ocorrências.

Esses achados confirmam que tanto a falta de coordenação entre áreas quanto a indisponibilidade de dados em tempo real são reconhecidas como causas diretas das travas operacionais, impactando setups, fluxos de materiais e decisões de produção.

Outro cruzamento significativo foi observado entre coleta de dados inconsistente e disponibilidade insuficiente (25 ocorrências), indicando que a utilização de registros manuais e pouco padronizados compromete não apenas a confiabilidade das informações, mas também o tempo necessário para as consolidar.

Da mesma forma, a co-ocorrência entre coleta inconsistente e gargalos operacionais (19 ocorrências) evidencia que erros de registro e ausência de padronização se traduzem em problemas práticos, como setups incorretos, reprogramações de lote e perdas de eficiência.

Embora menos frequentes, as co-ocorrências entre barreiras de digitalização resistentes e soluções e sugestões necessárias (2 ocorrências) revelam que, quando os entrevistados apontaram resistências culturais, custos ou dificuldades

técnicas, também sugeriram alternativas de superação, como treinamentos, padronização e capacitação da equipe.

De maneira geral, a análise confirma que os entrevistados não percebem os problemas de forma isolada, mas como partes de um sistema interdependente de fragilidades, cujo núcleo é representado pelos gargalos operacionais, sempre associados a falhas de coleta, indisponibilidade de dados ou dificuldades de integração.

4.1.1.5 Falas representativas por eixo temático

Além da análise quantitativa, foi considerada a dimensão qualitativa das entrevistas, por meio da seleção de falas representativas que ilustram a percepção dos colaboradores sobre cada eixo temático. Essas falas foram escolhidas a partir da codificação no Atlas.ti, considerando tanto a recorrência quanto a clareza na expressão das dificuldades relatadas.

Para cada eixo, é apresentada a pergunta-chave que orientou a discussão, seguida de trechos curtos das respostas mais relevantes, identificadas pelo código do entrevistado e sua função. Em seguida, são tecidas breves interpretações, de modo a conectar as manifestações individuais com o padrão coletivo observado.

- **Coleta de dados inconsistente**

Quando questionados sobre como os dados eram coletados na produção, os entrevistados destacaram a predominância de registros manuais em cadernos, formulários e planilhas, frequentemente sujeitos a falhas. Essa prática foi vista como fonte de erros e retrabalho, prejudicando a confiabilidade das informações:

“[...] os dados ainda são anotados em cadernos pelos operadores, e muitas vezes não batem quando vamos conferir no sistema” (O1 – Líder de Produção).

“[...] o registro manual acaba permitindo falhas e até manipulação, porque não existe padronização” (A2 – Analista de Processos e Qualidade).

“[...] a coleta é feita em formulários impressos, depois lançados em planilhas, e sempre tem erro de digitação ou rasura” (G3 – Supervisor Sr. de Manutenção).

- Disponibilidade de informações insuficiente

Ao serem indagados sobre o tempo necessário para consolidar e analisar os dados, os entrevistados apontaram atrasos significativos, que em alguns casos comprometiam a tomada de decisão em tempo hábil.

“[...] o tempo mínimo é um turno, mas em alguns casos só temos os dados no dia seguinte” (G2 – Gerente de Manutenção).

“[...] os dados levam em torno de 24 horas para serem lançados, sempre relacionados ao dia anterior” (A1 – Especialista Pl. de Processos).

“[...] quando precisamos tomar uma decisão rápida, a informação chega tarde demais” (O7 – Líder Técnico – Estamparia).

- Integração e comunicação falha

A ausência de integração entre sistemas e processos também foi percebida como fator crítico, gerando falhas de coordenação e perda de eficiência.

“[...] sem integração entre produção e manutenção, temos falhas que não são mapeadas e decisões tardias” (G3 – Supervisor Sr. de Manutenção).

“[...] a falta de conexão entre Blank e Prensa gera falta de peças e paradas na linha” (O4 – Líder de Time – Operação).

“[...] sem um sistema centralizado, cada área trabalha com informações diferentes” (A2 – Analista de Processos e Qualidade).

- Barreiras de digitalização resistentes

Em relação às dificuldades para implantação de sistemas automáticos de coleta de dados, surgiram referências às barreiras culturais e à necessidade de preparo das equipes.

“[...] o maior problema é a resistência dos operadores em abandonar o processo manual” (O6 – Líder de Time – Inspeção).

“[...] a principal barreira é cultural, mas também temos custos e priorização” (G1 – Supervisor de Produção).

“[...] sem treinamento adequado, o sistema não vai ser aceito” (A1 – Especialista Pl. de Processos).

- Soluções e sugestões necessárias

As medidas de melhoria sugeridas pelos entrevistados convergiram para digitalização, padronização e integração entre áreas.

“[...] a digitalização da coleta eliminaria retrabalho e permitiria decisões mais rápidas” (G2 – Gerente de Manutenção).

“[...] padronizar o processo e treinar a equipe são pontos essenciais” (O1 – Líder de Produção).

“[...] precisamos de um sistema integrado que conecte produção e estoque” (O2 – Líder de Time – Logística).

- Gargalos operacionais

Por fim, os entrevistados apontaram os momentos em que a falta de dados em tempo real mais prejudicava a operação, evidenciando os gargalos enfrentados na rotina.

“[...] os setups atrasam porque a informação não chega na hora certa” (G4 – Supervisor de Produção).

“[...] na mudança de lotes o processo trava sem dados confiáveis” (O7 – Líder Técnico – Estamparia).

“[...] quando falta informação no estoque, a linha para e ficamos sem saída” (O4 – Líder de Time – Operação).

De modo geral, os entrevistados apontaram que falhas na coleta, a falta de informações em tempo real e a ausência de integração entre áreas convergem para a geração de gargalos operacionais. Embora cada grupo tenha enfatizado aspectos distintos, como gestão voltada à integração, analistas à acuracidade das informações e o operacional aos impactos práticos, a percepção comum é de um conjunto de fragilidades interdependentes que comprometem a eficiência da estamparia.

4.1.1.6 Síntese das entrevistas

A análise das entrevistas realizadas com os diferentes grupos hierárquicos da estamparia evidenciou dificuldades recorrentes na coleta e uso de dados, além da baixa integração entre processos, impactando diretamente a eficiência operacional.

Entre os problemas mais citados estão o excesso de registros manuais, atrasos na consolidação das informações e inconsistências nos apontamentos, que comprometem a confiabilidade dos indicadores e dificultam a tomada de decisão em tempo hábil. Esse quadro confirma os apontamentos de Haseeb *et al.* (2019) e Teixeira *et al.* (2021), ao destacarem que a eficiência operacional depende do uso racional de recursos e da redução de desperdícios, fatores prejudicados por sistemas fragmentados e controles manuais.

A falta de dados em tempo real foi mencionada de forma recorrente como causa de decisões reativas, acúmulo de defeitos e riscos de falhas no abastecimento. Tais limitações dialogam com os achados de Bueno *et al.* (2020), Wang *et al.* (2018) e Upadhyay *et al.* (2023), que mostram como a coleta em tempo real melhora o planejamento da produção, reduz perdas e aumenta a confiabilidade da gestão de estoques. Nos relatos, essa ausência se traduz em atrasos de até um turno inteiro para consolidação das informações, reforçando o distanciamento entre planejamento e execução.

Também se destacaram falhas na integração entre setores, principalmente entre planejamento, qualidade e manutenção, o que gera duplicidade de registros e falta de visibilidade sobre os processos. Essa fragmentação é consistente com as discussões de Jaskó *et al.* (2020) e Ferrari *et al.* (2021), que demonstram como a integração entre MES e ERP é determinante para a rastreabilidade e resposta rápida a desvios. A ausência dessa integração foi associada a custos adicionais, menor flexibilidade e dificuldades na prevenção de falhas recorrentes.

Outro ponto recorrente nas entrevistas foi a expectativa em relação aos sistemas ciberfísicos. Os entrevistados reconhecem que sua aplicação poderia apoiar a identificação de falhas, automatizar controles e aumentar a confiabilidade dos dados. Essa percepção converge com Tortorella, Giglio e Van Dun (2019) e Möhring *et al.* (2020), ao mostrarem que os CPS possibilitam ajustes em tempo real e melhorias contínuas na qualidade. Além disso, estudos como os de Ikumapayi *et al.* (2024) e Ryalat *et al.* (2023) reforçam que sensores e ajustes automáticos contribuem para consistência da produção, exatamente a carência relatada na estamperia analisada.

Por fim, as entrevistas revelaram barreiras culturais e de capacitação para a digitalização, como resistência dos operadores, receio no uso de novas ferramentas e necessidade de treinamentos. Esses aspectos estão alinhados a Veile *et al.* (2020) e Oludapo *et al.*, (2024), que apontam a importância da mudança cultural, do desenvolvimento de competências e da clareza estratégica para que a adoção da Indústria 4.0 seja efetiva.

Em síntese, os relatos confirmam que os principais obstáculos à eficiência operacional estão ligados ao predomínio de registros manuais, ausência de dados em tempo real e baixa integração entre sistemas. Ao mesmo tempo, demonstram que as soluções propostas pelos entrevistados, como a digitalização dos processos, maior

Falhas semelhantes foram encontrados em outros documentos, sumarizado no Quadro 13 a seguir:

Quadro 13 - Lista de documentos com registros manuais

Documento Analisado	Finalidade	Informações Registradas	Principais fragilidades
Inventário Diário – Painéis	Controle de estoque de produto acabado	Nome das peças, pallets completos, retrabalho, vazios	Contagem manual, risco de divergência físico vs sistema
Relatório de Produção de Blanks	Monitoramento da fabricação de blanks	Quantidade produzida, sucata, turnos, tempos de parada	Registros manuais e atraso na consolidação
Relatório de Produção da Prensa	Desempenho diário das prensas	Lotes, golpes, rejeições, falhas, paradas	Falta de integração, sem análise em tempo real
Check Sheet – Qualidade dos Blanks	Inspeção dimensional e visual de blanks	Lote, dimensões, espessura, defeitos	Subjetividade da inspeção, baixa rastreabilidade
Check Sheet – Qualidade da Prensa	Inspeção de peças estampadas	Conformidade visual e dimensional, peças retrabalhadas e sucateadas	Dependência de apontamento manual, ausência de integração digital
Production Claim	Registro de não conformidades	Defeitos, falhas de processo, paradas, evidências fotográficas	Retrabalho na digitalização, dificuldade em analisar padrões
Check List de Inspeção de Equipamentos	Verificação de condições de uso	Empilhadeiras, prensas, pontes rolantes	Notificação manual, risco de falhas não tratadas
Formulário de Inspeção de Qualidade (dimensões adicionais)*	Verificação complementar em inspeções	Variáveis dimensionais específicas dos blanks e prensas	Limitação para análise estatística automatizada

Fonte: Acervo da estamparia.

A análise do quadro permite identificar três fatores recorrentes. O primeiro refere-se à confiabilidade dos dados, comprometida por erros de transcrição, inconsistências e divergências entre registros físicos e sistemas, situação que dificulta o uso dos indicadores como base para decisões gerenciais.

O segundo diz respeito à disponibilidade da informação, pois a consolidação manual gera atrasos e restringe o acesso em tempo real, o que, segundo Teixeira et al. (2021), limita a capacidade de resposta e aumenta a probabilidade de decisões reativas.

O terceiro fator envolve a rastreabilidade e integração, já que a ausência de sistemas digitais dificulta correlacionar falhas com causas e parâmetros de processo, alinhando-se ao que Haseeb et al. (2019) descrevem como barreira para o aproveitamento eficiente dos recursos produtivos.

Conclui-se, portanto, que os registros analisados, apesar de essenciais para a operação rotineira, apresentam lacunas estruturais que comprometem sua confiabilidade e utilidade gerencial. Esses achados reforçam a necessidade de

digitalização e integração dos processos, aspecto que será aprofundado nas seções seguintes ao se discutir a implantação de sistemas baseados em IoT, MES e CPS.

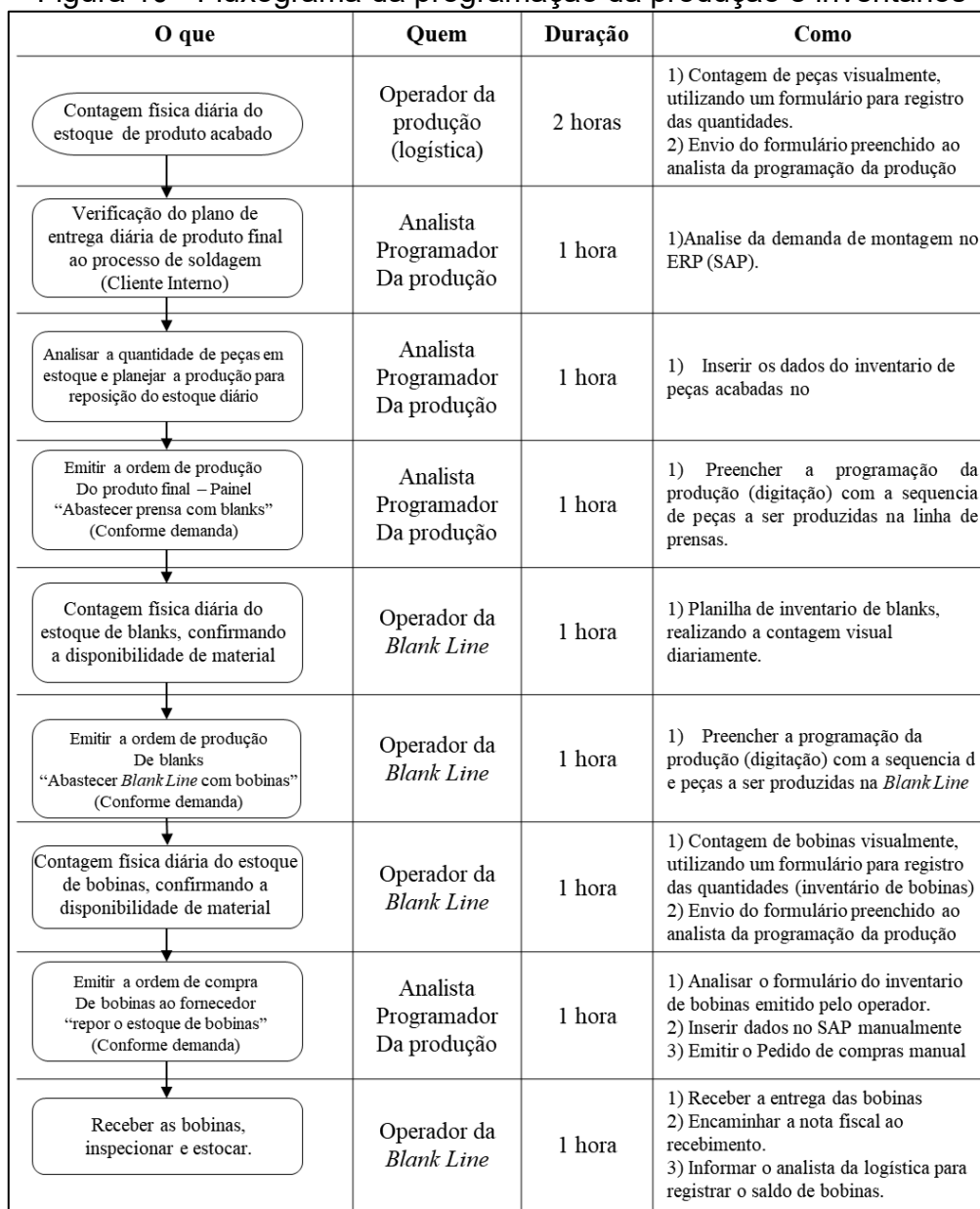
4.1.3 Observação direta de processos e procedimentos da estamparia

A observação direta dos processos produtivos buscou identificar limitações operacionais, mapear fluxos de trabalho e avaliar o nível de digitalização da estamparia. Três processos centrais foram acompanhados: (i) programação da produção e controle de estoques, (ii) gestão da qualidade e não conformidades e (iii) monitoramento da produção e registros operacionais.

O primeiro foi detalhado em fluxograma por representar o núcleo de integração entre áreas e maior impacto na eficiência da gestão de materiais.

A Figura 10 apresenta o fluxo de programação da produção e inventários atualmente adotados pela estamparia, evidenciando as principais etapas do processo e os pontos críticos associados à execução manual das atividades.

Figura 10 - Fluxograma da programação da produção e inventários



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise desse fluxo mostrou três fragilidades recorrentes: (i) forte dependência de registros manuais, tanto nas contagens físicas quanto na atualização do SAP; (ii) ausência de integração e automação nas etapas de planejamento e reposição de materiais; e (iii) elevado tempo para completar o ciclo, que chega a nove horas diárias, comprometendo a agilidade na tomada de decisão.

Essas limitações indicam a necessidade de digitalização das atividades, com aplicação de sensores IoT, algoritmos de previsão de demanda e automação da

emissão de ordens para reduzir o tempo de resposta e aumentar a confiabilidade dos registros.

Além desse fluxo, foram observados os processos de gestão da qualidade e não conformidades e de monitoramento da produção. Como ambos apresentaram limitações semelhantes, sendo registros manuais, ausência de integração digital e tempo excessivo para consolidação das informações, seus resultados são apresentados de forma consolidada no Quadro X, que resume as atividades e fragilidades identificadas.

Quadro 14 - Processos observados e principais fragilidades

Processo Observador	Principais atividades	Fragilidades identificadas
Programação da produção e controle de estoques	Contagens físicas de bobinas, blanks e produtos; atualização no SAP; emissão manual de ordens de compra e produção.	Registros manuais e risco de erros; ausência de integração e automação; tempo de ciclo elevado (cerca de 9 horas diárias).
Gestão da qualidade e não conformidades	Identificação de defeitos; preenchimento manual do Production Claim; transcrição para planilhas; encaminhamento às áreas responsáveis; execução e monitoramento de ações corretivas.	Registros manuais duplicados; comunicação por e-mail sem rastreabilidade; demora no fechamento das ações corretivas.
Monitoramento da produção e registros operacionais	Registro manual de dados em formulários; digitação em planilhas; consolidação em relatórios impressos; reuniões diárias para análise; implementação de ações corretivas.	Retrabalho na transcrição de dados; ausência de monitoramento em tempo real; decisões reativas baseadas em relatórios impressos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise consolidada dos três processos evidencia um padrão recorrente de fragilidades: dependência de registros manuais, baixa integração entre setores e elevado tempo de resposta para a tomada de decisão. Esses fatores reduzem a confiabilidade dos dados e comprometem a agilidade operacional da estampa.

De acordo com Haseeb et al. (2019), a eficiência operacional depende diretamente da capacidade de eliminar desperdícios e tornar os fluxos produtivos mais ágeis e precisos. Nesse sentido, os registros manuais e a fragmentação dos sistemas observados no diagnóstico representam obstáculos à melhoria do desempenho. Teixeira et al. (2021) reforçam que, no contexto da I4.0, a maximização da produção com o menor uso possível de recursos requer a digitalização e integração dos processos, de forma a reduzir retrabalhos e tempos de inatividade.

Dessa forma, os resultados da observação direta confirmam as limitações identificadas previamente na análise documental e apontam a necessidade de avançar para soluções digitais para revitalizar a eficiência operacional da estampa.

4.1.4 Avaliação inicial da maturidade digital

Este tópico apresenta a análise do estágio de maturidade digital da estam-
paria automotiva, com base nos achados das entrevistas, análise documental e ob-
servação dos processos.

A avaliação segue as dimensões conforme define o *Industrie 4.0 Maturity Index* de Schuh et al., (2020), permitindo identificar desafios operacionais, estruturais e culturais que impactam a adoção das tecnologias da Indústria 4.0. A seguir, no Qua-
dro 15 sintetiza os principais desafios identificados, proporcionando uma visão estru-
turada das barreiras a adoção das tecnologias da i4.0

Quadro 15 - Resultados das avaliações da maturidade da I4.0

Dimensões das Avaliações maturidade (Acatech)	Principais achados do diagnóstico inicial		
	Entrevistas	Análise de documentos	Observação dos processos
Recursos	Registros de produção, manutenção e qualidade são feitos manualmente; operadores anotam dados em papel e digitam posteriormente, gerando retrabalho e atrasos.	Documentos como inventário, produção e inspeção da qualidade são preenchidos manualmente, sujeitos a erros e inconsistências que afetam a confiabilidade dos dados.	Coleta de dados manual prolonga tempo de processamento e análise; não há sensores IoT para rastreamento em tempo real, prejudicando a gestão da produção.
Sistemas de Informação	ERP não se comunica com sistemas de produção; controle de estoque e programação da produção baseiam-se em dados desatualizados, comprometendo a sincronização entre setores.	Falta de conectividade entre setores; divergências entre registros manuais e sistemas digitais dificultam rastreamento da produção e controle de materiais.	Sistemas desconectados impedem atualizações em tempo real; ajustes na programação de produção e controle de estoque são feitos manualmente, elevando risco de falhas.
Estrutura organizacional	Tomada de decisão é relativa, baseada em dados do dia anterior; fluxos de informação dependem de comunicação verbal, aumentando riscos de falhas e falta de rastreabilidade.	Relatórios de produção e qualidade não possuem padronização digital, dificultando a análise de desempenho; ausência de indicadores automáticos reduz a visibilidade dos processos.	Baixa integração entre áreas leva a decisões descentralizadas e desalinhamento entre setores; falta de padronização na comunicação operacional.
Cultura	Baixa adesão a novos sistemas devido à resistência cultural; operadores relatam dificuldades na adaptação a mudanças tecnológicas e preferem métodos tradicionais.	Capacitação em novas tecnologias é esporádica; ausência de incentivos para adoção de ferramentas digitais reduz a efetividade da transição para a I4.0.	Mudanças tecnológicas são percebidas como complexas e geram resistência entre operadores; treinamentos são insuficientes para garantir domínio das novas ferramentas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise consolidada dos achados da pesquisa revela que a estampaia automotiva enfrenta desafios estruturais na transição para a Indústria 4.0. A dependência de registros manuais e a falta de integração entre sistemas comprometem a confiabilidade das informações e geram retrabalho. Além disso, a ausência de um fluxo digital padronizado e a resistência à digitalização dificultam a adoção de novas tecnologias.

De acordo com o *Industrie 4.0 Maturity Index* de Schuh et al., (2020), a estampaia se encontra no Nível 1 – Computação, onde as tecnologias digitais são utilizadas de forma isolada, sem conectividade e automação adequadas. A falta de sensores IoT e a fragmentação dos dados impedem a rastreabilidade eficiente e a tomada de decisão baseada em tempo real. A resistência cultural à digitalização e a carência de capacitação reforçam essas barreiras, limitando a evolução para níveis mais avançados de maturidade digital.

4.1.5 Análise comparativa entre os achados da pesquisa e a literatura

A presente seção tem como objetivo comparar os achados da pesquisa com os referenciais teóricos apresentados na revisão da literatura. Essa análise busca identificar convergências, divergências e lacunas entre os desafios observados na estampaia automotiva e os modelos de maturidade digital e implementação da Indústria 4.0 descritos nos estudos acadêmicos.

Para isso, as questões e objetivos da pesquisa são tomados como referência, estruturando a análise em três dimensões principais: (i) a aplicação das tecnologias habilitadoras da I 4.0 para otimização da eficiência operacional, (ii) o impacto da obtenção de dados em tempo real na gestão de inventários e no planejamento da produção e (iii) os desafios enfrentados no processo de adoção da I4.0.

4.1.5.1 Aplicação das Tecnologias da I4.0 na Eficiência Operacional

A primeira questão de pesquisa busca compreender como as tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e sistemas ciberfísicos (CPS), podem ser aplicadas para resolver problemas específicos de eficiência operacional na estampaia automotiva.

A literatura destaca que essas tecnologias permitem monitoramento em tempo real, automação inteligente e integração de dados operacionais, favorecendo

processos produtivos mais eficientes e flexíveis (Boranguiu et al.; 2020)

Os achados da pesquisa indicam que a estamparia não possui sensores IoT ou CPS integrados aos seus sistemas de produção. Os processos são registrados manualmente, sem rastreamento em tempo real das variáveis produtivas, o que compromete a identificação de gargalos operacionais e aumenta o tempo de resposta a falhas.

A falta de automação no controle da produção e qualidade impede uma gestão eficiente, confirmando as dificuldades apontadas na literatura sobre a adoção dessas tecnologias em empresas de manufatura tradicionais (Singh; Goyat; PanwAR, 2024).

A ausência de um plano estruturado representa uma lacuna em relação às melhores práticas da literatura, que sugerem implementações faseadas, com testes piloto e integração gradual de tecnologias (Boranguiu et al., 2020).

4.1.5.2 Impacto da Obtenção de Dados em Tempo Real na Gestão de Inventários e Planejamento da Produção

A segunda questão de pesquisa investiga de que maneira a obtenção de dados em tempo real pode melhorar a gestão de inventários e o planejamento da produção na estamparia automotiva. A literatura aponta que a digitalização desses processos, por meio de IoT, MES e Big Data, permite reduzir erros, prever demandas com maior precisão e otimizar fluxos logísticos (Wang et al., 2018; Mashayekhy et al 2022).

Os achados da pesquisa evidenciam que a estamparia ainda opera com registros manuais de inventário, sem integração entre os setores de produção e logística. A falta de dados em tempo real resulta em inconsistências entre os registros físicos e os sistemas, impactando a disponibilidade de materiais e o planejamento da produção. Essa realidade está alinhada com os desafios descritos na literatura, que indicam que a falta de digitalização compromete a rastreabilidade de materiais e a eficiência dos processos produtivos (Mahmud, 2017; Bueno *et al.*, 2020).

Por outro lado, a literatura destaca casos de empresas que superaram essas dificuldades adotando sistemas de monitoramento digital progressivo, como sensores IoT para rastreamento de materiais e integração entre ERP e MES (Wang et al.,

2018). A pesquisa, no entanto, não identificou iniciativas concretas nesse sentido na estamperia, evidenciando uma lacuna na estratégia de digitalização da empresa.

4.1.5.3 Desafios da Implementação da I4.0 na Estamperia Automotiva

A terceira questão de pesquisa busca identificar os principais desafios enfrentados pelo processo de manufatura da estamperia automotiva na transição para a Indústria 4.0. Estudos acadêmicos apontam três desafios principais para essa transformação:

- (i) Tecnológicos – dificuldade na integração de sistemas e infraestrutura digital defasada (Veile et al., 2020);
- (ii) Organizacionais – ausência de um planejamento estruturado para a digitalização (Oludapo et al., 2024, 2024);
- (iii) Culturais – resistência dos funcionários à adoção de novas tecnologias e falta de treinamentos adequados (Hermann et al., 2016).

Os achados da pesquisa confirmam a existência desses três desafios na estamperia. A empresa apresenta uma infraestrutura tecnológica limitada, com processos fragmentados e sistemas não integrados. Além disso, não há um planejamento formal para a implementação da digitalização, o que dificulta a evolução para níveis mais avançados de maturidade digital. Por fim, a resistência dos funcionários foi apontada como um fator crítico, com baixa adesão a novas ferramentas digitais e ausência de treinamentos para capacitação.

Enquanto a literatura apresenta estratégias para mitigar esses desafios, como investimentos em capacitação e implementação progressiva de novas tecnologias (Eriksson et al., 2022), os achados indicam que a empresa ainda não adotou medidas para lidar com essas dificuldades. Essa falta de ação constitui uma barreira adicional ao avanço da I4.0, contribuindo para que a maturidade da estamperia permaneça distante dos níveis recomendados.

4.1.5.4 Diagnóstico da Maturidade Digital e Lacunas Identificadas

A avaliação de maturidade digital da estamperia, com base no modelo de Schuh et al., (2020), classificou a empresa no Nível 1 – Computação, estágio inicial da digitalização industrial. Esse nível é caracterizado pelo uso de ferramentas digitais

isoladas, sem conectividade e integração entre sistemas. A predominância de registros manuais, falta de interoperabilidade entre sistemas e ausência de automação são aspectos que mantêm a empresa nesse estágio.

Os achados da pesquisa corroboram a literatura ao demonstrar que empresas nesse nível enfrentam dificuldades para avançar na digitalização devido à falta de infraestrutura tecnológica e resistência organizacional (Schuh et al., 2020; Veile et al., 2020). No entanto, enquanto a literatura sugere que a superação dessas barreiras ocorre por meio de planejamento estratégico e implementação gradual das tecnologias habilitadoras da I4.0, a pesquisa não identificou ações concretas nesse sentido, evidenciando uma lacuna na gestão da adoção da I4.0 na empresa.

4.2 PLANEJAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DAS INICIATIVAS DA I4.0

Com base nas limitações identificadas na fase diagnóstica (Seção 4.1), deu-se início à concepção das iniciativas da I4.0 na estamparia, com o objetivo de superar a fragmentação sistêmica, a baixa rastreabilidade e a ausência de dados confiáveis para a tomada de decisão, por meio do estabelecimento de ações iniciais, implementação e conclusivas.

4.2.1 Cronograma gerencial das iniciativas da I4.0

Para organizar as etapas de desenvolvimento e implantação da solução digital, foi elaborado um cronograma estruturado com base em três horizontes temporais: Ações iniciais, de implementação e conclusivas. Essa organização temporal permitiu distribuir as ações conforme sua complexidade técnica e grau de maturidade exigido, favorecendo uma transição progressiva e controlada entre o estado atual da fábrica e a estrutura digital desejada.

O cronograma segue a lógica recomendada por Frank et al. (2019), que propõem a adoção de fases progressivas de planejamento, testes e estabilização em projetos de digitalização industrial. Além disso, considera a viabilidade prática de execução no ambiente fabril, respeitando limites operacionais, infraestrutura disponível e ritmo de absorção das mudanças pelos usuários.

O Quadro 16 apresenta a consolidação do plano, com as principais etapas técnicas distribuídas por horizonte de tempo, seus períodos estimados e atividades associadas.

Quadro 16 - Cronograma gerencial das iniciativas da I4.0

Horizonte	Etapa Técnica	Período	Atividades principais
Ações Iniciais	Planejamento técnico da digitalização	Abr ~ maio/2024	Modelagem do fluxo digital; definição de dispositivos, interfaces, infraestrutura e arquitetura de integração (ISA-95).
	Elaboração conceitual das telas e interfaces dos sistemas	Abr ~ maio/2024	Definição de layout de telas, quais dados deveriam ser coletados e integrados.
	Início da integração lógica MES–PLC	Ago./2024	Estruturação da lógica de troca de dados entre chão de fábrica e sistema de execução MES.
Ações de implementação	Expansão da infraestrutura de rede fabril	Jun ~ Ago/2024	Instalação de pontos de acesso Wi-Fi nas linhas; validação de cobertura e estabilidade.
	Instalação dos dispositivos digitais	Jun~Ago/2024	Implantação de tablets industriais, quiosques e monitores nas áreas produtivas e de suporte.
	Desenvolvimento e testes dos dashboards	Set ~Dez/2024	Criação de painéis MES com KPIs de produção, paradas, OS&D e painéis de manutenção e qualidade.
	Programação de filtros operacionais	Jan ~ Mar/2025	Configuração de filtros por operador, turno, máquina e status (reparos, refugo, parada).
Ações conclusivas	<i>Try-out</i> técnico em ambiente real	Mar ~ Abr/2025	Validação da coleta digital no ambiente fabril; testes de integração completa entre PLC–MES–ERP.
	Ajustes e estabilização final dos módulos	Maio/2025	Correções pós-implantação, liberação dos relatórios web, estabilização das operações digitais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desse planejamento consolidado, as subseções seguintes detalham as atividades previstas em cada horizonte, destacando suas motivações técnicas, fundamentos teóricos e decisões tomadas no decorrer do processo.

4.2.2 Ações iniciais: concepção técnica e integração inicial

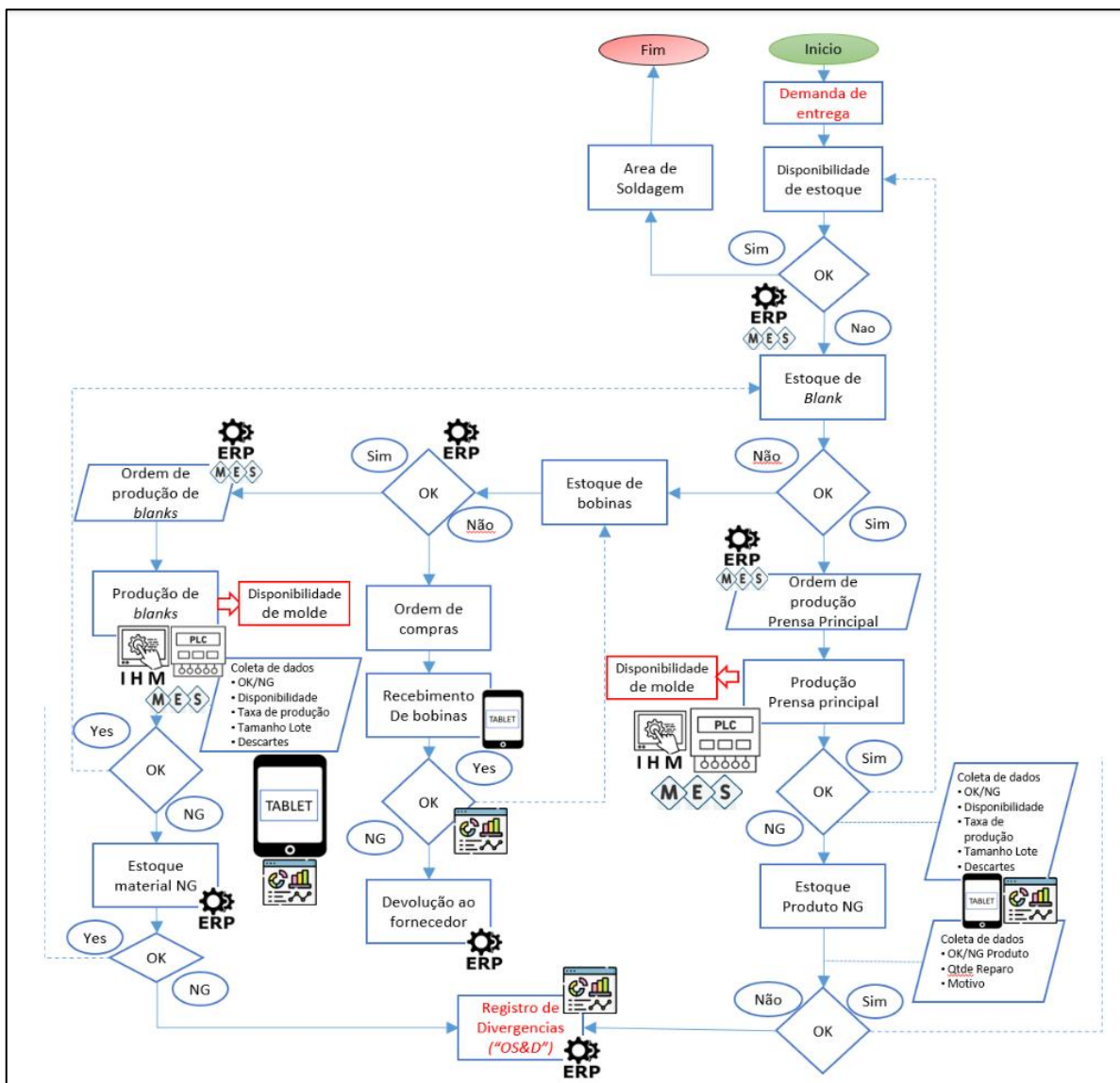
As ações iniciais concentraram-se na estruturação técnica da solução digital a ser implementada na estampa. Para isso, foi mobilizada a equipe multidisciplinar, composta por representantes das áreas de operação, manutenção, engenharia e tecnologia da informação, com o objetivo de mapear os fluxos produtivos e informacionais nas áreas de Blanks e Prensas, definir os recursos físicos e conceber as interfaces iniciais do sistema baseado em tablets.

Durante essa etapa, foram identificadas fragilidades estruturais relevantes, como a inexistência de integração entre os sistemas fabris, infraestrutura atual insuficiente, a dependência de registros manuais e a ausência de dados confiáveis em tempo real. Esses elementos reforçaram a necessidade de um modelo de digitalização alinhado às reais condições operacionais da planta.

4.2.2.1 Modelagem do fluxo digital e arquitetura técnica

A partir do mapeamento inicial, foi elaborado um modelo de fluxo digital com base na norma ISA-95 (ISA, 2010), estabelecendo uma hierarquia funcional entre os níveis de controle (PLC e IHMs), execução (MES) e planejamento (ERP). A Figura 11 apresenta a arquitetura proposta, com os pontos de coleta de dados, os canais de comunicação e o encadeamento das informações ao longo da cadeia produtiva.

Figura 11 - Modelo de diagrama proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Definido o modelo, passou-se à especificação dos recursos físicos e de infraestrutura. O planejamento contemplou tablets industriais com proteção térmica e mecânica, ampliação da rede Wi-Fi para garantir cobertura em todo o espaço fabril, instalação de servidor local e adequações técnicas para integração com o sistema MES em uso.

As interfaces digitais foram projetadas internamente, respeitando os formulários manuais em uso e as limitações operacionais da planta, conforme recomendam Ghobakhloo (2020) e Oztemel e Gursev (2020), ao defenderem a necessidade de adequar projetos digitais à maturidade e capacidades da organização.

4.2.2.2 Definição dos dispositivos e infraestrutura técnica

A escolha dos dispositivos e a configuração da rede foram orientadas por referências como Santos et al. (2021) e Castaño et al. (2019), que enfatizam a importância de uma base tecnológica confiável para viabilizar a coleta de dados com qualidade. A lógica de integração entre os níveis de controle, execução e planejamento manteve-se fundamentada na ISA-95 (Barbosa et al., 2020).

As especificações foram consolidadas em um plano técnico detalhado, organizando os equipamentos por área de aplicação, função no processo e status de aquisição ou necessidade de atualização. O Quadro 17 resume essas informações, incluindo tablets, monitores, quiosques, PLCs e outros dispositivos.

Quadro 17 - Planejamento dos dispositivos digitais por área de aplicação

Item	TV/Monitor	Kiosk	Tablet	PDA	PLC	Wi-Fi
Foto						
Utilização	Visão geral dos dados	Inserir dados	Inserir dados	Coletar dados	Coletar dados automático	Ampliar conexão
Estado atual	Adquirir	Adquirir	Adquirir	Adquirir	Atualizar / Melhorar	Ampliar rede atual
Área	Dispositivo		Aplicação			
Armazenamento de bobinas	PDA - Assistente Digital Pessoal		Recebimento de bobina (entrada da bobina no inventário do SAP)			
	TV/ Monitor		Visualização do estoque de bobinas			
Linha de Blanks	PLC - Controlador Lógico Programável		Coleta de dados de numero do produto e tempos de parada			
	PDA - Assistente Digital Pessoal		Uso de etiquetas – Rastreabilidade por lote			
	TV/ Monitor		Visão geral do estoque de bobinas, plano de produção de blanks e estoque atual de blanks			
Linha de prensas	Kiosk Digital		Confirmar plano de produção e entradas de qualidade			
	PLC - Controlador Lógico Programável		Coleta de dados de numero do produto e tempos de parada			
	Digital Kiosk		Confirmar plano de produção, gestão de paradas e solicitações de ferramentas			
	TV/ Monitor		Visão geral do estoque de blanks, plano de produção de painéis e estoque atual de painéis			
Controle de qualidade	Tablet		Confirmar plano de produção, gestão de paradas e solicitações de ferramentas			
	PDA - Assistente Digital Pessoal		Uso de etiquetas – Rastreabilidade por lote			
Ferramentaria	Kiosk Digital & PDA		Gestão de qualidade e impressão de etiquetas			
	Kiosk Digital & tablets		Gestão da manutenção de ferramentas			
Área de reparos	PDA - Assistente Digital Pessoal		Uso de etiquetas – Rastreabilidade por lote			
	Digital Kiosk		Gestão de qualidade e impressão de etiquetas			
Geral	Tablet		Saúde e Segurança – Checklist de empilhadeira, checklist de ponte rolante, notificações diárias			

Fonte: Elaborado pelo autor.

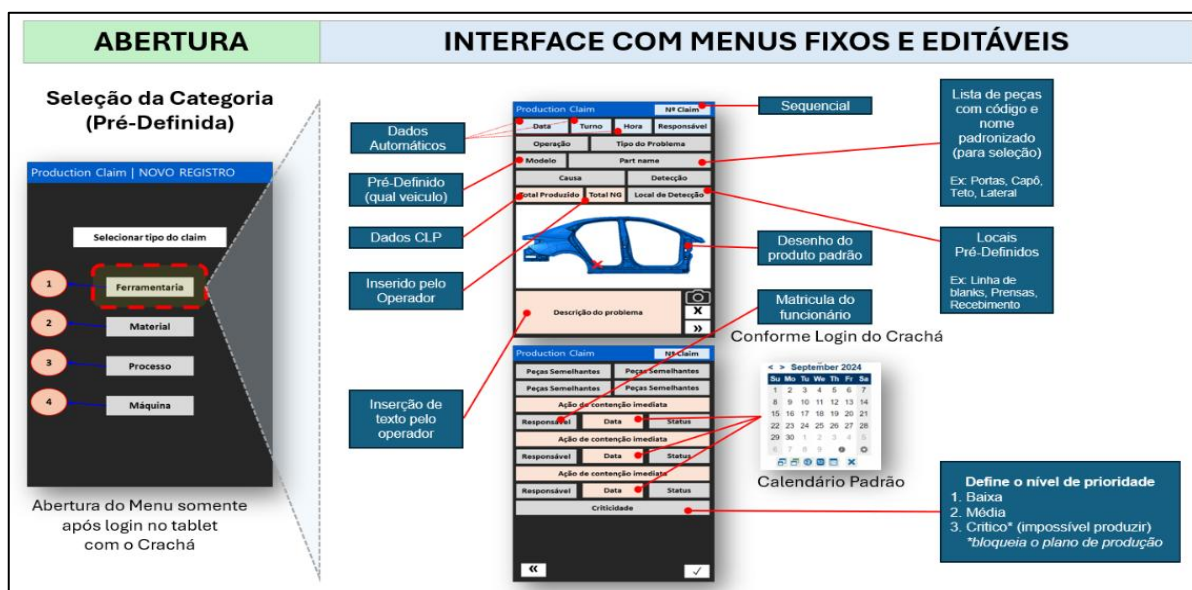
Esse planejamento representou o ponto de partida para a digitalização da estampa, orientando as fases seguintes da implantação.

4.2.2.3 Concepção das interfaces digitais

Com os dispositivos definidos, a equipe técnica iniciou o desenvolvimento conceitual das telas que seriam usadas nos tablets. O objetivo foi substituir os registros manuais por interfaces digitais intuitivas, promovendo padronização das informações, rastreabilidade e facilidade de uso, como propõem Kusiak (2018) e Barbosa et al. (2020), ao enfatizarem o papel do operador na transição digital.

A Figura 999 apresenta um exemplo de interface para registro de não conformidades relacionadas a problemas em ferramentais. O operador insere as informações por meio de menus organizados de forma sequencial, incluindo dados como modelo, número da peça, turno, quantidade e local de detecção. As entradas combinam preenchimento automático, seleção pré-definida e inserção manual.

Quadro 18 - Exemplo de concepção de telas de interface.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após o envio do registro, o sistema encaminha a ocorrência diretamente ao time responsável pela manutenção de moldes, onde a criticidade já definida pelo emissor define o nível de prioridade, sendo baixa, média ou crítica, sendo esta última associada a falhas que inviabilizam a programação de produção com o molde afetado.

Essa lógica de categorização, além de favorecer a agilidade na resposta, também padroniza a linguagem de comunicação entre operação e suporte técnico, conforme discutido por Castaño et al. (2019) no contexto de integração entre áreas fabris.

O desenvolvimento dessa interface seguiu diretrizes metodológicas fundamentadas nos trabalhos de Schumacher et al. (2019), que destacam a importância da usabilidade, consistência visual e integração com dados operacionais na concepção de sistemas digitais voltados à I 4.0. Além disso, a proposta se alinha à abordagem defendida por Weyer et al. (2015), que consideram a modularidade das interfaces e a autonomia do operador como elementos chave para ambientes produtivos ciberfísicos.

Todas as demais interfaces dos tablets, como as utilizadas para lista de verificação de máquinas, controle de qualidade, apontamento de inventário, recebimento de bobinas e abastecimento de estoque foram desenvolvidas seguindo o mesmo princípio de construção: análise dos formulários manuais em uso, definição dos campos necessários, escolha dos dados a serem automatizados e padronização da sequência lógica de preenchimento.

Essa abordagem incremental e participativa permitiu que as telas fossem ajustadas à realidade operacional, contribuindo para a aceitação do novo sistema pelos usuários finais, conforme orientações de Ghobakhloo (2020) e Oztemel e Gursev (2020), que defendem o alinhamento entre capacidades organizacionais e tecnologias habilitadoras da digitalização.

4.2.2.4 Integração inicial MES–PLC

A última etapa do planejamento técnico de ações iniciais consistiu na configuração inicial da lógica de integração entre os dispositivos de controle de chão de fábrica (PLC e IHMs) e o sistema de execução da manufatura (MES). Essa integração estabeleceu a base para a coleta digital de dados em tempo real, eliminando a dependência de registros manuais e viabilizando a rastreabilidade automatizada das operações produtivas.

Durante essa fase, foi necessário adequar os sistemas legados existentes, especialmente os PLCs de gerações anteriores, de forma a permitir a extração e o envio das variáveis operacionais relevantes para o sistema MES.

Esse processo envolveu o estudo da lógica de programação já implementada, a identificação dos pontos possíveis de coleta e a reconfiguração parcial de parâmetros para viabilizar a comunicação com os módulos superiores da arquitetura digital.

Conforme destaca Ghobakhloo (2020), a integração de tecnologias da I4.0 demanda esforços significativos quando há presença de sistemas legados, sendo comum a existência de barreiras técnicas que limitam a interoperabilidade e o uso de dados em tempo real. Tais limitações exigem soluções adaptativas, customizadas às condições de cada planta fabril, especialmente quando não há infraestrutura padronizada ou recursos disponíveis para substituições.

A estrutura de integração foi concebida de acordo com os princípios definidos na norma ISA-95 (ISA, 2010), garantindo coerência entre os diferentes níveis funcionais da planta, desde o controle em tempo real até os sistemas de planejamento e gestão. Essa arquitetura técnica permitiu criar um ambiente preparado para a troca segura e padronizada de informações, essencial para o funcionamento de sistemas ciberfísicos.

Com essa base estruturada, o projeto avançou para as etapas subsequentes de implantação física, testes em ambiente real e desenvolvimento funcional das interfaces digitais. As ações de implementações, descritas na próxima seção, consolidam essa transição do planejamento técnico para a execução prática no chão de fábrica.

4.2.3 Ações de implementações: implantação física e desenvolvimento funcional

As ações de implementações concentraram-se no desenvolvimento e programação dos sistemas digitais, bem como na consolidação das estruturas físicas e funcionais que dariam suporte ao sistema MES.

As ações seguiram uma sequência técnica planejada, contemplando a expansão da infraestrutura de rede, a instalação dos dispositivos de coleta de dados e a construção progressiva das interfaces digitais. O cronograma abrangeu o período de junho de 2024 a abril de 2025, com entregas alinhadas ao avanço da maturidade digital da planta.

4.2.3.1 Expansão da infraestrutura de rede fabril

A expansão da rede wireless da estamperia foi planejada a partir de estudo técnico detalhado. O levantamento, realizado com consultoria especializada, utilizou o *EkaHau Site Survey* para mapear a cobertura, identificar falhas de sinal e simular cenários de posicionamento de Access Points (APs). Adotaram-se como parâmetros

intensidade mínima de -67 dBm e $SNR > 25$ dB, conforme recomendações do fabricante.

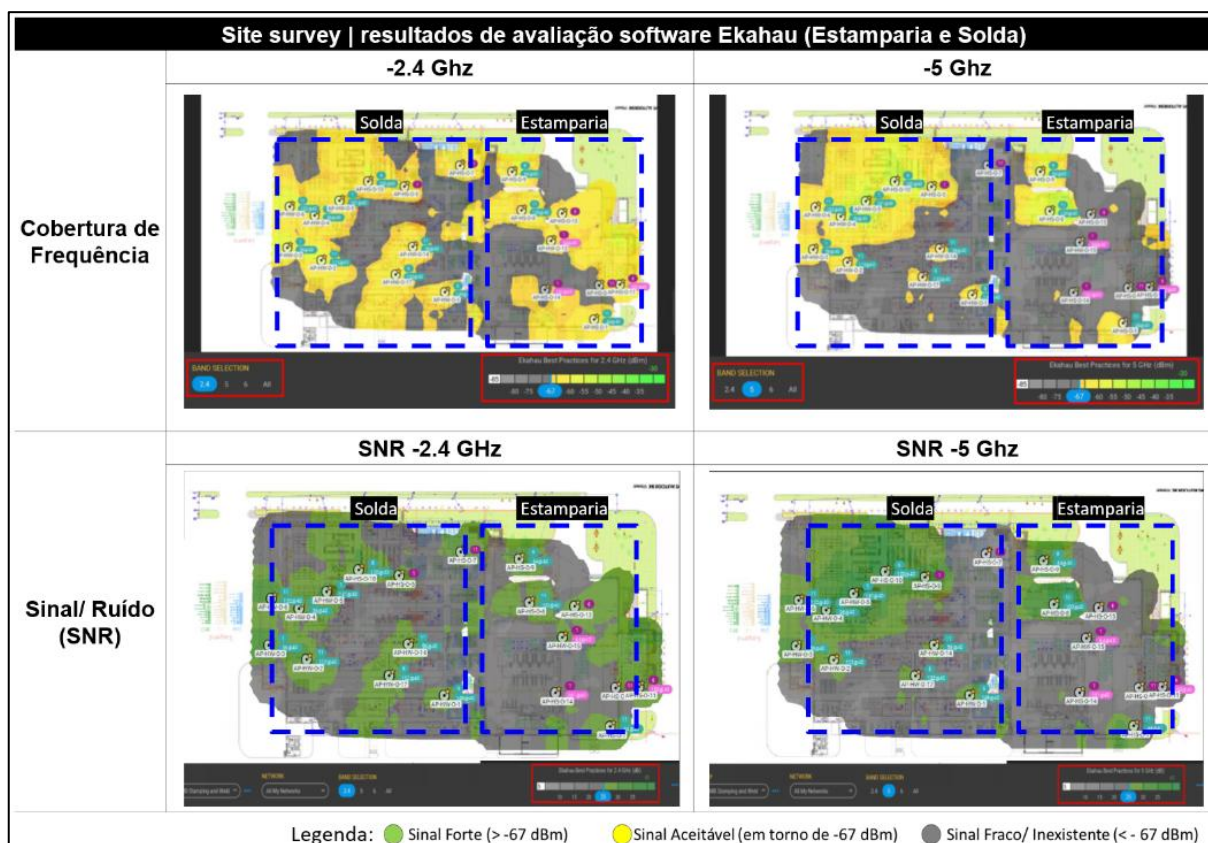
Do ponto de vista teórico, conectividade estável é condição para monitoramento em tempo real e manutenção preditiva com IoT, base para reduzir inatividade e sustentar decisões operacionais (Soori; Arezoo; Dastres, 2023). A integração CPS–IoT exige captura contínua de dados por sensores e atuação sincronizada, o que pressupõe rede confiável para detecção de anomalias e ajustes automáticos (Castaño et al., 2019). Em contextos de estoque e planejamento, a visibilidade em tempo real melhora reposição e aderência do plano de produção, desde que a infraestrutura permita fluxo estável de dados (Bueno et al., 2020; Wang et al., 2018).

O diagnóstico inicial identificou 19 APs ativos distribuídos de forma irregular, com áreas de sombra, sobreposição de canais e inatividade da banda de 5 GHz em setores críticos. A análise incluiu a área de solda, que depende de PDAs e tablets para abastecimento e baixa automática de materiais; a instabilidade comprometia a comunicação com o sistema de estoque e a atualização em tempo real, efeito descrito em estudos que relacionam coleta contínua de dados a melhorias no controle de inventários e no planejamento (Bueno et al., 2020; Wang et al., 2018). A Figura 16 apresenta os resultados consolidados do diagnóstico inicial, com os mapas de cobertura de frequência e relação sinal-ruído (SNR) para as bandas de 2.4 GHz e 5 GHz.

Observa-se que as áreas em verde indicam sinal adequado para aplicações industriais, enquanto as zonas em amarelo operam no limite inferior de desempenho e as áreas em cinza apontam ausência ou fragilidade de cobertura, principalmente em regiões periféricas e de maior densidade estrutural.

A Figura 12 apresenta o mapa de cobertura atual e a análise de SNR (2,4 e 5 GHz), evidenciando zonas de sombra, áreas no limite operacional e regiões periféricas com fragilidade de sinal.

Figura 12 - Mapa de cobertura atual e análise SNR em 2.4 GHz e 5 GHz



Fonte: Elaborado pela consultoria especializada em infraestrutura wireless industrial

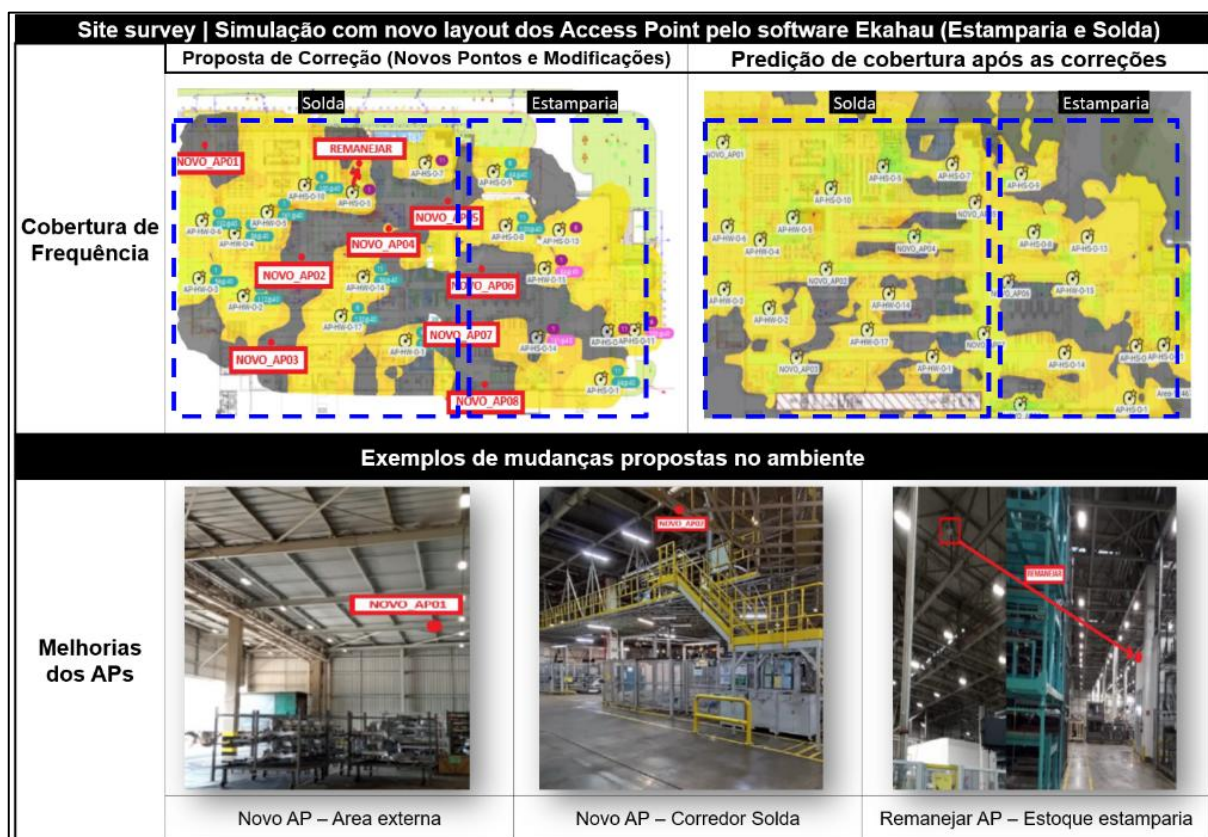
Com base nos resultados do diagnóstico inicial, foi elaborado um plano de reconfiguração da rede wireless, com foco na eliminação de zonas de sombra, na ampliação da cobertura e na preparação da infraestrutura para aplicações industriais sensíveis à conectividade contínua. A proposta incluiu:

- Reposicionamento físico de APs instalados em ângulo inadequado, ajustando o padrão de propagação;
- Ativação da banda de 5 GHz em quatro equipamentos existentes;
- Instalação de oito novos APs modelo Cisco C9115AXE-Z, com antenas AIR-ANT2524DW-R, distribuídos conforme o modelo preditivo gerado pelo *Ekahau*.

A Figura 13 apresenta o novo layout com os pontos a serem adicionados ou remanejados (à esquerda) e a previsão de cobertura resultante após as correções (à direita). Observa-se uma melhoria na cobertura contínua da planta, com redução significativa das áreas cinzentas (sinal < -67 dBm) e melhor distribuição da

intensidade de sinal em toda a área fabril, incluindo os corredores logísticos e áreas periféricas.

Figura 13 - Simulação da nova configuração da rede

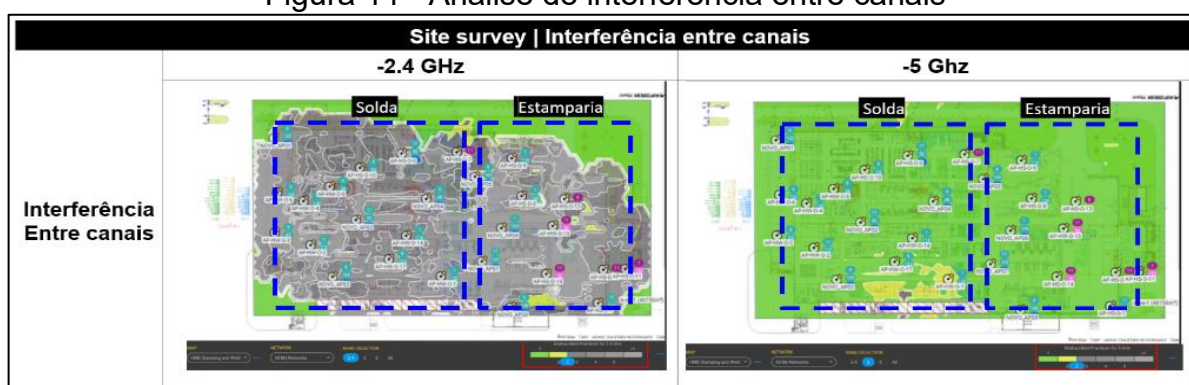


Fonte: Elaborado pela consultoria especializada em infraestrutura wireless industrial

Além da cobertura física, foi analisada a interferência entre canais, considerando a redistribuição dos APs e a ativação da banda de 5 GHz. A interferência excessiva entre pontos próximos pode comprometer o desempenho da rede, reduzir a taxa de transferência efetiva e prejudicar o roaming de dispositivos móveis.

A Figura 14 apresenta os mapas de interferência nas bandas de 2.4 GHz e 5 GHz, já considerando a nova configuração da rede.

Figura 14 - Análise de interferência entre canais



Fonte: Elaborado pela consultoria especializada em infraestrutura wireless industrial

A manutenção da qualidade do sinal após a expansão cria base técnica para coleta contínua de dados e sincronização de processos, condição necessária à integração MES–ERP e à tomada de decisão em tempo real (Jaskó et al., 2020; Balashov et al., 2018).

Em cadeias de suprimentos, essa visibilidade operacional sustenta ajustes dinâmicos e redução de perdas ao longo do fluxo de materiais (Taddei et al., 2022; Upadhyay et al., 2023).

Em termos de arquitetura de dados, o aumento de conectividade intensifica o volume e a variedade de dados de chão de fábrica, exigindo processamento distribuído e soluções de *Big Data* para análise e armazenamento (Ageed et al., 2021).

No plano gerencial, a literatura aponta que avanços em maturidade digital dependem da integração entre tecnologia, processos e competências, com ênfase em conectividade e dados para ganhos em eficiência, qualidade e flexibilidade (Veile et al., 2020).

Em ambientes de manufatura inteligente, a coordenação entre sensores e sistemas conectados amplia agilidade e produtividade quando sustentada por infraestrutura estável (Lo; Lin, 2024). Esses achados são coerentes com o resultado observado na planta após a reconfiguração da rede.

4.2.3.2 Instalação dos dispositivos digitais

Com a infraestrutura de rede validada e operante, a etapa seguinte concentrou-se na instalação dos dispositivos digitais nas áreas produtivas, com o objetivo de viabilizar a coleta direta de dados operacionais e a visualização em tempo real de indicadores de processo.

Essa fase foi conduzida entre os meses de setembro e dezembro de 2024, com a implantação de tablets industriais, quiosques fixos, monitores de parede e PDAs (assistentes digitais portáteis), todos integrados à rede interna da planta e ao sistema MES.

Os dispositivos foram selecionados com base nos requisitos do ambiente fabril, considerando fatores como resistência a vibração, durabilidade, proteção contra poeira e umidade, capacidade de fixação e ergonomia de uso.

O Quadro 19 apresenta os principais equipamentos utilizados, com as respectivas especificações técnicas, função operacional e quantidade instalada. Esse levantamento técnico foi essencial para orientar a etapa de instalação e garantir compatibilidade com os requisitos funcionais do sistema MES.

Quadro 19 - Especificações dos dispositivos digitais instalados na estamparia

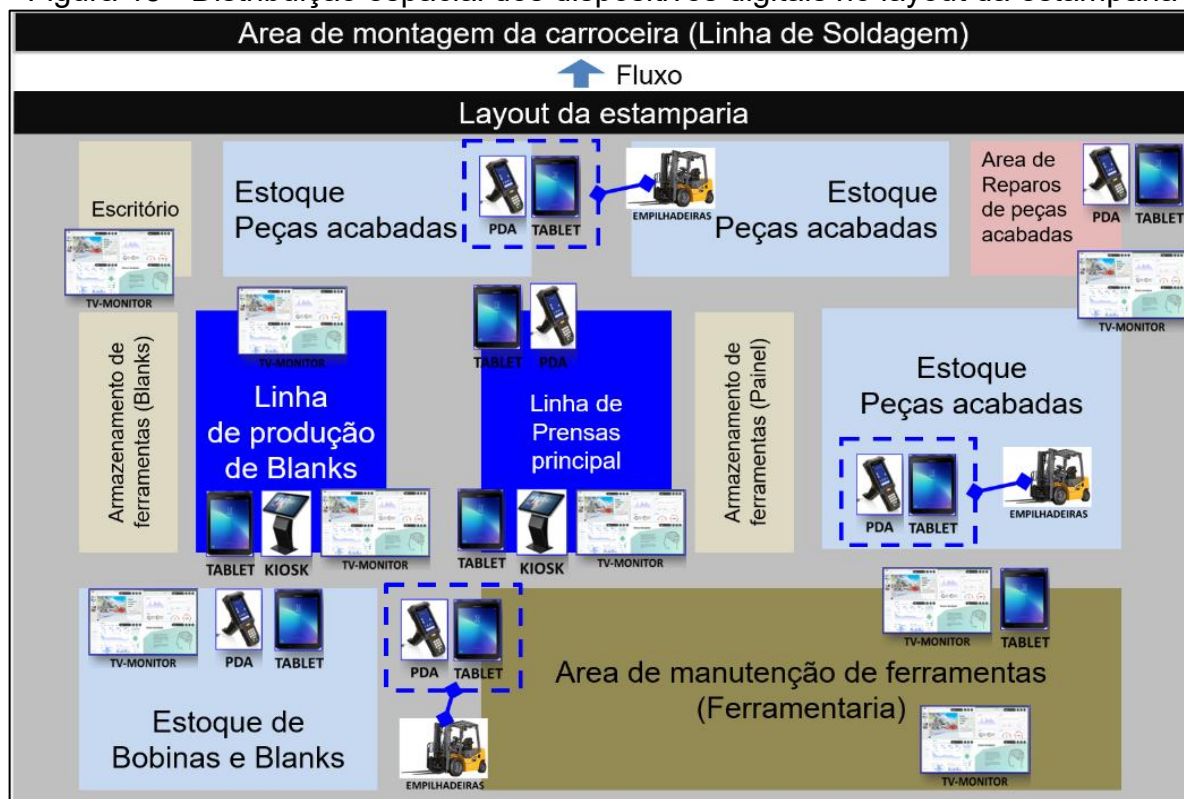
Memorial dos dispositivos instalados na estamparia.				
Item	TV/Monitor	Kiosk	Tablet	PDA
Foto				
Especificação	Monitor Industrial: Samsung QBB55 UHD 4K Display LH55QBBEBGCXEN	Totem L, MDA Com PC OptiPlex 3000 Micro	Samsung Galaxy Tab Active3 LTESM-T575NZKPL05	Computador móvel MC3300x
Aplicação	Disponibilização dos dados, indicadores, e <i>dashboards</i>	Inserção de dados e interface operador e sistema (Controle da qualidade, estoques e paradas)	Inserção de dados e interface operador e sistema (Controle da qualidade, estoques e paradas)	Coleta de dados logísticos, quantidades abastecimento de estoques, <i>OS&D</i> .
Local de Instalação	Estoque de bobinas, linha de blank, prensas principais, controle de qualidade, área de reparos e ferramentaria	Linha de blanks, prensas principais, controle de qualidade, área de reparo e ferramentaria	Dispositivo móvel, disponível nas áreas da linha de blank, prensas principais, área de reparo, empilhadeiras	Dispositivo móvel, disponível nas áreas da linha de bobinas, linha de blank, prensas principais, área de reparo empilhadeiras
Quantidade	8	2	18	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição dos equipamentos, foi realizada a alocação dos dispositivos conforme a lógica do processo produtivo, priorizando as áreas com maior criticidade operacional e necessidade de visibilidade contínua das informações.

A Figura 15 apresenta o layout da estamparia com a localização dos dispositivos implantados, evidenciando a cobertura das rotinas de operação, suporte e movimentação de materiais.

Figura 15 - Distribuição espacial dos dispositivos digitais no layout da estamparia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tablets e PDAs industriais foram alocados diretamente nas estações de trabalho das linhas de produção, permitindo que os operadores registrassem produção, paradas e refugos por meio da interface do sistema MES. Além disso, esses dispositivos foram instalados em empilhadeiras responsáveis pela movimentação de blanks e peças acabadas, viabilizando a coleta de dados em tempo real durante as operações logísticas.

Nos setores de apoio, como manutenção, ferramentaria e controle de qualidade, foram implementados quiosques digitais fixos, que oferecem acesso direto aos módulos do sistema voltados à emissão de registros de OS&D, ao controle de não conformidades e ao preenchimento de listas de verificação. De forma complementar, monitores de parede foram distribuídos em áreas de ampla circulação, permitindo a visualização contínua dos dashboards operacionais. Por fim, PDAs foram

disponibilizados às equipes de inspeção, otimizando a coleta de dados em tarefas móveis nas áreas de estocagem e logística interna.

A instalação desses dispositivos representou um passo fundamental na consolidação da estrutura digital da planta. Essa prática está em consonância com o que apontam Bueno et al. (2020), ao destacarem que a coleta em tempo real é essencial para reduzir erros de registros manuais e aumentar a eficiência no monitoramento de estoques e processos produtivos. Do mesmo modo, Jaskó et al. (2020) ressaltam que a distribuição estruturada de dispositivos digitais conectados à rede é base para a integração entre o chão de fábrica e os sistemas de gestão, garantindo registros fidedignos e rastreabilidade contínua.

A presença desses equipamentos também fortalece a lógica de integração entre IoT, CPS e MES, em que sensores, interfaces digitais e sistemas de supervisão atuam de forma conjunta para ajustar processos de maneira dinâmica. Estudos de Castaño et al. (2019) e Möhring et al. (2020) evidenciam que a combinação de sensores e dispositivos móveis melhora a confiabilidade dos dados e amplia a capacidade de resposta em tempo real, reduzindo falhas e interrupções não planejadas.

Em setores de logística interna, essa estrutura é particularmente relevante. Conforme discutem Kumar et al. (2022), a utilização de IoT e dispositivos digitais embarcados em veículos industriais favorece o rastreamento de materiais e melhora a precisão das operações de armazenagem. Essa abordagem está alinhada ao observado na estamparia, onde empilhadeiras equipadas com PDAs passaram a registrar movimentações de blanks e peças de forma automática, eliminando etapas manuais e assegurando maior aderência ao fluxo logístico.

Por fim, a visibilidade ampliada por meio dos monitores de parede reforça os achados de Soori, Arezoo e Dastres (2023), segundo os quais a transparência dos dados em tempo real permite maior agilidade e adaptabilidade da produção. Esses autores destacam que a disponibilização de dashboards operacionais visíveis aos diferentes grupos de trabalho promove maior alinhamento entre equipes e acelera a tomada de decisão no chão de fábrica.

4.2.3.3 Desenvolvimento dos softwares na infraestrutura lógica e visual

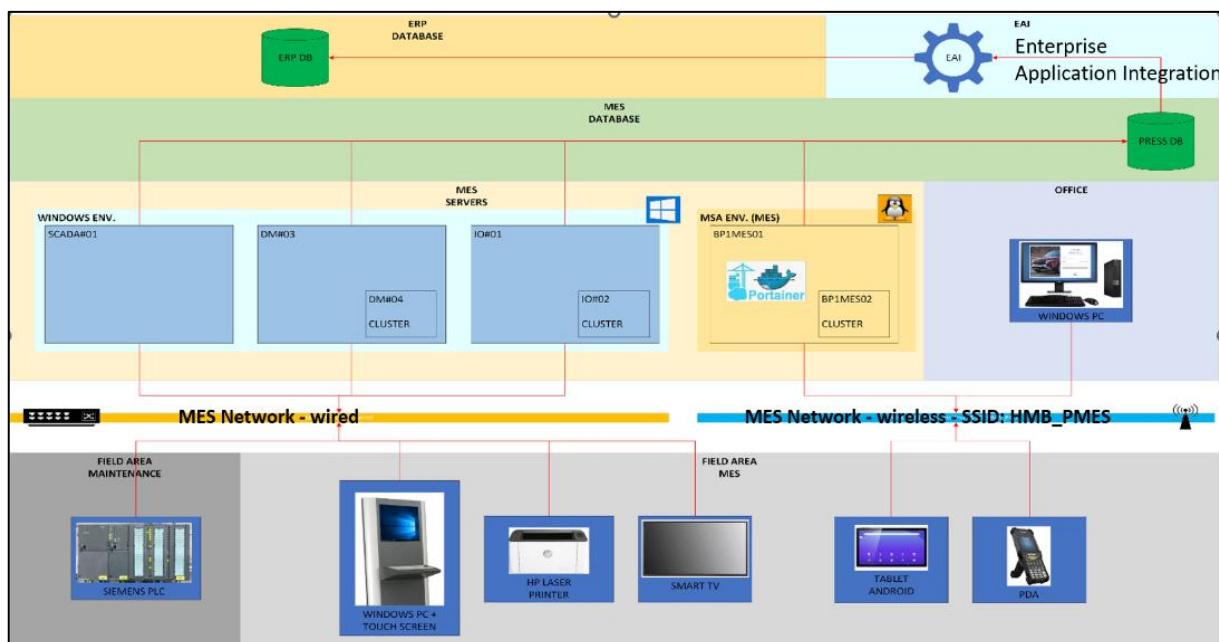
A etapa de desenvolvimento dos softwares envolveu a construção da infraestrutura lógica e visual que sustenta o funcionamento do sistema MES implantado na estamparia.

Essa estrutura compreende, por um lado, o desenvolvimento da lógica de aplicação (*backend*), responsável pelo processamento dos dados e pela integração com dispositivos e banco de dados e a camada de apresentação (*frontend*), voltada à visualização das informações por meio de dashboards interativos.

Essa organização é coerente com os modelos de referência para sistemas MES, que segmentam as funcionalidades em camadas de coleta, processamento e apresentação dos dados, conforme descrito por Loures et al. (2019) e pela norma ISA-95 (ISA, 2010)

A Figura 16 ilustra a arquitetura técnica adotada para viabilizar a operação integrada do sistema, evidenciando a separação entre os ambientes de desenvolvimento, os servidores de aplicação MES, os dispositivos de campo e os meios de comunicação com o ERP e demais sistemas legados.

Figura 16 - Arquitetura técnica do sistema MES implantado na estamparia



Fonte: Elaborado pelo autor.

As próximas seções detalham as tecnologias empregadas, a lógica de programação adotada e a organização das funcionalidades por área da fábrica

a) Plataformas, softwares e ambiente de desenvolvimento

O sistema MES foi desenvolvido com base em tecnologias web e mobile organizadas em camadas lógicas. A tabela a seguir apresenta os principais componentes utilizados, sua função no sistema e as tecnologias adotadas em cada parte.

O uso de tecnologias baseadas em aplicações web, arquiteturas em containers e APIs representa uma tendência consolidada nos sistemas MES de nova geração, como apontado por Giret et al. (2020).

O Quadro 20 resume os principais componentes do sistema, as tecnologias utilizadas e suas respectivas funções.

Quadro 20 - Tecnologias utilizadas no desenvolvimento do sistema MES

n.o	Camada Parte do Sistema	Tecnologia Utilizada	Função Principal
1	Backend (servidor de aplicação)	Node.js + Express (JavaScript)	Processar dados, integrar sistemas, expor APIs
2	Comunicação com banco de dados	oracledb (Node.js) + Oracle (PL/SQL)	Acesso e manipulação de dados
3	Autenticação	JWT + jsonwebtoken	Controlar acesso de usuários via tokens
4	Comunicação em tempo real	socket.io-client	Atualização de dados entre servidores e dashboards em tempo real
5	Requisições HTTP	Axios	Troca de dados entre frontend, backend e sistemas externos
6	Frontend Web (interface visual)	React + Next.js + Tailwind (Hero UI)	Visualização dos dados e navegação no sistema
7	App Mobile Android	Vue.js + Vuetify	Coleta e visualização de dados em dispositivos móveis
8	Programas auxiliares (Windows)	C# + Windows Forms	Comunicação com CLPs e impressão de etiquetas
9	Containers e infraestrutura	Docker + Portainer + GitLab CI/CD	Execução dos serviços, versionamento e automação de builds
10	Alta disponibilidade e rede	HAProxy + Keepalived	Proxy reverso e failover com IP virtual

Fonte: Elaborado pelo autor

O desenvolvimento foi realizado com as seguintes ferramentas:

- Visual Studio Code para backend e frontend web;
- Android Studio para o aplicativo mobile;
- Visual Studio 2022 para os sistemas auxiliares em C#.

A área de TI ficou responsável pela interface de integração com o sistema MES, estruturando a coleta e envio de dados por meio de Application Programming Interface (APIs) e serviços de comunicação. A programação dos PLCs foi conduzida pela equipe de manutenção elétrica, utilizando a plataforma da Siemens, sendo detalhada no tópico seguinte.

b) Integração entre CLPs e sistema MES

Esta seção detalha como essa integração foi operacionalizada na linha de prensas, estruturando a coleta automática de dados por meio de sensores, IHMs e redes industriais.

O arranjo técnico adotado viabilizou a consolidação e transmissão das informações em tempo real, permitindo que eventos de produção, paradas e falhas fossem registrados sem a necessidade de apontamentos manuais.

A organização dos dados em blocos específicos dentro da lógica dos CLPs contribuiu para a confiabilidade, rastreabilidade e sincronização com o *backend* do sistema MES, conforme resumido no Quadro X a seguir.

Quadro 21 - Arquitetura de coleta e envio de dados entre CLPs e sistema MES

Item	Componente/ Elemento	Tecnologia/ Plataforma utilizada	Função na coleta de dados
1	CLPs das prensas	Siemens S7-300 + Step7 (Simatic Manager)	Execução da lógica de controle e coleta dos sinais operacionais
2	Sensores de Máquinas	Sensores de posição, pressão, fim de curso	Deteção física de eventos de produção e condição das prensas
3	Interfaces Homem-Máquina (IHMs)	IHMs Siemens + WinCC Flexible 2008	Interface do operador e apontamentos manuais de produção/paradas
4	Rede de comunicação local	Profibus DP	Comunicação entre IHMs e os CLPs de cada prensa
5	Prensa mestre (nº1)	Siemens 2300 ton + Ethernet industrial	Consolidação local dos dados das demais prensa
6	Transmissão ao backend TI	Comunicação Ethernet TCP/IP	Envio dos dados consolidados ao backend do sistema PMES

(Continua)

7	Organização da lógica CLP	Blocos de dados para status, alarmes e contadores	Estrutura modular dos dados para uso pelo sistema MÊS
---	---------------------------	---	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura apresentada evidencia o papel dos CLPs como elo técnico entre o processo físico e o sistema digital de controle, em conformidade com os princípios da integração horizontal e vertical descritos pela norma ISA-95 (ISA, 2010).

Essa abordagem permitiu que o sistema MES operasse de forma contínua, recebendo dados em tempo real das prensas e viabilizando os *dashboards* de análise com dados atuais.

c) Cronograma técnico de implantação por setor

A implantação do sistema MES foi realizada em etapas distribuídas entre os meses de abril e julho de 2025, seguindo uma lógica de priorização baseada na criticidade dos processos, disponibilidade das equipes e complexidade técnica de integração.

A estruturação da implantação permitiu validar as funcionalidades em ciclos curtos, com testes intermediários e ajustes contínuos conforme o retorno dos usuários de cada área. Esse modelo incremental de desenvolvimento dialoga com a abordagem de pesquisa-ação adotada neste estudo, permitindo que cada avanço técnico fosse acompanhado por validações operacionais e intervenções pontuais no ambiente fabril.

O Quadro 22, demonstra o planejamento que foi conduzido por meio de um cronograma técnico consolidado, que organizou o desenvolvimento das funcionalidades em lotes por área da estamperia, envolvendo a equipe multifuncional do projeto.

Quadro 22 - Cronograma de desenvolvimento técnico por setor da estamperia

Setor	Funcionalidade Implantada	Período de Desenvolvimento	Equipe envolvida
Qualidade	Gestão de reclamações, acompanhamento de OS&D, painel de aprovação ("OK Ratio"), histórico dos painéis	Set/2024	TI/ Qualidade
Planejamento da produção	Edição e visualização do plano de produção, dashboards com sequência de ordens	Set/2024	TI/ PCP
Rastreamento e logística	Painel de movimentação, rastreabilidade de peças, histórico logístico	Set/2024	TI/ Logística/ Produção

(Continua)

Linhas de Blanks	Dashboards com indicadores de produtividade, paradas não planejadas, "OK Ratio", integração com PLCs, apontamento por tablets, rastreabilidade de bobinas	Out/2024	TI/ Manutenção/ Produção
Linha de Prensas	Dashboards com indicadores de produtividade, paradas não planejadas, "OK Ratio", integração com PLCs, apontamento por tablets, rastreabilidade de blanks	Out/2024	TI/ Manutenção/ Produção
Ferramentaria	Checklist de auditoria de ferramentas, registros de manutenções preventivas e corretivas.	Nov/2024	TI/ Ferramentaria/ Qualidade
Area de Reparos	Controle de entrada e saída de materiais, controle da qualidade, registros dos operadores	Dez/24~Fev/25	TI/ PCP/ Qualidade
Estoques (Bobinas, Blanks e produto acabado)	Monitoramento de níveis e painel de status	Nov/24~Mar/25	TI/ PCP/ Produção
Sistema de Alertas	Envio automático de alertas por e-mail para anomalias de produção, qualidade e inspeção	Mar/25	TI/ Qualidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

A organização das etapas por setor favoreceu a identificação de problemas específicos durante a implantação, viabilizando ajustes localizados e evitando interrupções generalizadas. Além disso, o cronograma permitiu acompanhar a aderência das entregas às necessidades práticas da fábrica, especialmente nas áreas críticas para a eficiência operacional e rastreabilidade da produção.

Na próxima seção, são apresentados os dashboards desenvolvidos, com base nas funcionalidades descritas na tabela anterior, permitindo a visualização de dados em tempo real, indicadores e tomada de decisão nas áreas produtivas.

d) Dashboards operacionais desenvolvidos

Como parte da implantação do sistema MES na estamparia, foram desenvolvidos dashboards operacionais interativos que viabilizam a visualização, análise e interpretação de dados em tempo real, capturados diretamente dos equipamentos e inseridos pelos operadores via interfaces digitais. Esses painéis foram concebidos como instrumentos de acompanhamento e recursos para suporte à tomada de decisão técnica e gerencial, estruturando informações operacionais de maneira acessível a diferentes níveis hierárquicos da organização.

A literatura reforça o papel dos dashboards no contexto da I4.0. Segundo Soori, Arezoo e Dastres (2023), a integração de IoT e sistemas digitais amplia a visibilidade dos processos e reduz tempos de resposta, enquanto Bueno et al. (2020) mostram que a coleta de dados em tempo real é decisiva para eliminar erros manuais e sustentar decisões em logística e inventário.

Para Jaskó et al. (2020), a visualização estruturada é um elemento central da maturidade digital, pois conecta o chão de fábrica aos sistemas de gestão, consolidando registros que refletem a dinâmica real do processo produtivo.

A construção dos painéis foi orientada pelas necessidades identificadas na etapa de diagnóstico e conectada aos objetivos específicos desta pesquisa, como promover rastreabilidade digital, reduzir perdas operacionais, apoiar decisões de planejamento baseadas em dados e elevar a maturidade digital da operação.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais dashboards desenvolvidos, descrevendo operação, dados utilizados e propósito operacional.

Quadro 23 - Principais Dashboards desenvolvidos no sistema MES e suas finalidades

N.º	Dashboard	Operação e Dados Disponíveis	Objetivo
1	Inventário de bobinas	Exibe número da peça, nome do produto e veículo associado à bobina. Mostra a quantidade disponível em tonelagem. Dados coletados após o recebimento das bobinas, por inserção no MES com base na nota fiscal e leitura via PDA.	Exibir em tempo real a quantidade de bobinas em kg disponíveis. Eliminar necessidade de contagem física. Apoiar decisões de planejamento e controle de produção. Automatizar geração de pedidos de compra com base no consumo e estoque.
2	Estoque de blanks & Inventário por painel	Traz um display informando os dados do blank (código, nome da peça, aplicação no veículo). Quantidade em tonelagem do material disponível ("Ok") e segregado ("NG"). Dados coletados após o processamento da bobina na linha de blanks. Dados estruturados via PLC; operador insere apenas variáveis decisórias como quantidade rejeitada, descrição do defeito e aprovação do lote.	Exibir em tempo real a quantidade de blanks disponíveis em unidades. Eliminar necessidade de contagem física. Apoiar decisões sobre ordens de produção. Gerar ordens automáticas conforme consumo do estoque.
3	OEE – Blank Line	Exibe um resumo em tempo real da performance da blank line. OEE calculado com base em tempo disponível, produção medida por ciclos de PLC, rejeitos apontados via tablet. Registros de parada também coletados via tablet, com classificação padronizada.	Consolidar informações de desempenho da linha. Identificar os fatores que impactam a produtividade (disponibilidade, performance, qualidade). Apoiar a definição de ações corretivas com base nas causas diagnosticadas.
4	Plano de produção Blank Line	Mostra ordens, quantidade de blanks a produzir, status da ordem (com-	Garantir elaboração automatizada do plano de produção. Priorizar ordens com lógica técnica. Alinhar produção

(Continua)

		pleta, fila etc.), número de lote da bobina e do fardo processado. Planejamento gerado automaticamente com base em disponibilidade de painéis, bobinas, ferramentas e plano de entrega. Integração com dashboard de manutenção informa prioridades de liberação de ferramenta.	com disponibilidade real. Orientar operadores e áreas de apoio com clareza e prioridade técnica.
5	OEE Prensa Principal	Exibe o OEE da prensa principal, com dados de tempo de máquina, produção (via PLC), rejeições (via tablet), e motivos de parada. As categorias de parada são padronizadas e selecionadas no momento da ocorrência.	Apresentar desempenho consolidado da prensa, com detalhamento dos fatores que impactam a produtividade. Priorizar ações corretivas baseadas em evidências. Integrar dados de PLC, operador e sistema para análise técnica.
6	OK Ratio (Desempenho da Qualidade)	Mostra proporção de peças aprovadas (OK Ratio) por data, produto, turno e código. Dados via PLC (produção) e tablet (rejeições). Exibe rankings de piores peças e defeitos mais frequentes.	Monitorar qualidade da produção em tempo real. Identificar falhas recorrentes e peças críticas. Apoiar controle de qualidade estruturado. Relaciona-se com confiabilidade e redução de desperdícios da pesquisa.
7	Paradas (Downtime)	Apresenta tempo de parada por dia, mês, peça e motivo. Dados via PLC (tempo) e tablet (classificação). Permite comparação com meta e análise de rankings por causa e produto.	Identificar causas de indisponibilidade. Apoiar ações corretivas com base em evidências. Viabilizar comparações entre períodos e promover decisões operacionais baseadas em dados objetivos.
8	Inventário de peças na área de reparo	Mostra quantidade de painéis segregados por código, comparando com o estoque e a capacidade. Dados via MES, tablets e etiquetas. Visualização com destaque em vermelho para peças indisponíveis para expedição.	Monitorar impacto do retrabalho no fornecimento. Aler (Continua) no plano de produção lotes com alta taxa de retrabalho. Apoiar tomada de decisão e controle de estoque com base em dados em tempo real.
9	Gestão de não conformidades (Claim)	Exibe histórico de claims por status, turno, data, tipo de causa, local de detecção, responsável. Registro realizado via tablets, com imagens e <i>interlocks</i> que impedem falhas no preenchimento	Rastrear falhas com padronização digital. Integrar evidências visuais e registros completos. Apoiar decisões baseadas em dados e promover rastreabilidade de causa raiz e uso estruturado dos sistemas digitais na qualidade.
10	Sumário das não conformidades (Claim Status)	Consolida dados agregados das claims: status, turnos, peças, defeitos, causas, locais de detecção e modelos. Permite visão comparativa por gráfico e categorização. Dados registrados via tablet, com <i>interlocks</i> e imagem obrigatória.	Fornecer visão consolidada de falhas. Identificar padrões por produto/processo/turno. Direcionar ações corretivas por área com base em dados estruturados. Fortalecer confiabilidade da gestão digital da qualidade, alinhada aos objetivos da pesquisa.
11	Gestão de manutenção de ferramentas (Die Stroke)	Compara número real de ciclos (strokes) por ferramenta com o limite de uso recomendado. Dados via PLC. Ao ultrapassar limite, sistema gera alerta para manutenção com categorização do tipo de intervenção. Permite rastrear status e histórico por ferramenta	Monitorar vida útil da ferramenta com base em dados reais. Planejar manutenção preventiva. Apoiar confiabilidade técnica e rastreabilidade da manutenção com base em parâmetros digitais, conforme propósitos da adoção das tecnologias da I4.0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre os painéis elaborados, destaca-se o dashboard de OEE da prensa principal, que consolida em um único ambiente os três componentes do indicador: disponibilidade, performance e qualidade.

O tempo de máquina é registrado automaticamente via PLC, a produção é calculada com base na contagem de ciclos (*strokes*), e os tempos de parada são categorizados pelos operadores por meio de tablets com menus padronizados. As rejeições também são registradas manualmente a partir da inspeção final da peça.

A Figura 17 apresenta a interface desse painel e os principais dados extraídos no período analisado.

Figura 17 - Dashboard com os resultados de OEE da prensa principal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro painel relevante é o do plano de produção da linha de blanks, que organiza em tempo real as ordens ativas, o status de execução, o código da bobina associada, a quantidade planejada e o rastreamento do lote de entrada e de saída. O plano é gerado automaticamente com base em múltiplos critérios, como demanda, disponibilidade de painéis e condição das ferramentas, permitindo acionar a ferramentaria sempre que uma determinada ferramenta estiver indisponível. Esse recurso conecta o planejamento de produção com a manutenção técnica, alinhando fluxos de trabalho. A Figura 18 mostra o painel em operação.

Figura 18 - Dashboard: Plano de produção da linha de blanks

PLAN DATE	ORDER NO	PLAN SEQ	PLAN QTY	PART NO	PART NAME	COIL NO	COIL BATCH NO	WORK STATUS	PLC NO	DATE	ACTIONS
20250729	112507290010	0010	813	B76111BW000	BLK SU2b FRT DR OTR LH/RH	AM913202102180002	A55JM0837	COMPLETE	80	29/07/2025 00:26:13	
20250729	112507290020	0020	1141	B66411BX500	BLK SU2b FL HOOD OTR	AM913202406170005	A56JM0402	COMPLETE	98	29/07/2025 06:38:49	
20250729	112507290030	0030	1022	B72811BX500	BLK SU2b FL TAIL GATE OTR	AM913202406170007	A54JM0911	COMPLETE	99	29/07/2025 07:09:20	
20250729	112507290040	0040	508	B66411R1500	BR2 FL HOOD OTR	AM913202203180004	A57JM0711	COMPLETE	92	29/07/2025 07:55:51	
20250729	112507290050	0050	886	B76111R1000	BR2 FRT DR OTR L/R (GH)	AM913201903010009	A57JM0041	COMPLETE	65	29/07/2025 09:56:23	
20250729	112507290060	0060	1293	B77111R1000	BR2 RR DR OTR L/R (GH)	AM913201903010011	A56JM0574	COMPLETE	66	29/07/2025 09:56:53	
20250729	112507290070	0070	835	B77111BX000	BLK SU2b RR DR OTR LH/RH	AM913202102180007	A55JM0984	Common,producing	82	29/07/2025 10:36:54	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na gestão da qualidade, um dos principais instrumentos criados foi o painel de não conformidades, que resume o histórico por status da reclamação (aberta, em andamento, concluída), tipo de defeito, peça afetada, modelo de veículo, turno e causa raiz.

Os dados são registrados via tablets com *interlocks* que impedem o envio de informações incompletas. Além disso, o painel organiza rankings por frequência de falhas e por área responsável, permitindo direcionar ações corretivas com maior assertividade. A Figura 19 apresenta o resumo visual desse dashboard.

Figura 19 - Dashboard: Lista de não conformidades da qualidade

DIE IMG	Claim ID	CLAIM STATUS	OPEN DATE	Shift	RESR	MODEL	PART NAME	OP	CLAIM TYPE	Total Wtg	DETECTION LOC	DETECTION	CRITICALITY	ACTIONS
	31	Aguardando	22/07/2025 13:00:10	1 Shift	Maicon Willian Santos Soares de Azevedo	GH	PNL-BR2 SIDE OTR LH 4DR	OP10	Processo	39	STP: Quality Inspection	Undefined	Baixa	
	33	Aguardando	22/07/2025 23:19:24	2 Shift	Cícero Carlos da Silva	JB	PNL SU2B FL TAILGATE INR	Press Line	Máquina	0			Média	
	34	Concluído	22/07/2025 23:45:16	2 Shift	Patrick Pereira dos Santos Barbosa	GH	BR2 PNL-RR DR OTR,RH	OP20	Ferramentaria	18	STP: Quality Inspection	Undefined	Média	
	35	Aguardando	22/07/2025 23:59:45	2 Shift	Pedro Henrique Bernardes da Silva	JB	PNL-SU2B ROOF	Blank Line	Máquina	0			Média	
	36	Fechado	23/07/2025 09:28:34	3 Shift	Richard Adriano	JB	PNL-SU2B TAILGATE INR	OP10	Ferramentaria	1000	Paint Shop	Instrução de Trabalho (Method)	Alta	
	38	Aguardando	23/07/2025 14:32:20	1 Shift	Maicon Willian Santos Soares de Azevedo	GH	PNL-BR2 FR DR OTR RH	OP30	Processo	26	STP: Quality Inspection	Undefined	Média	
	39	Concluído	23/07/2025 23:47:01	2 Shift	Patrick Pereira dos Santos Barbosa	GH	PNL-BR2 ROOF SDR	OP20	Ferramentaria	15	STP: Quality Inspection	Undefined	Média	
	40	Aguardando	23/07/2025 23:58:03	2 Shift	Patrick Pereira dos Santos Barbosa	JB	PNL-SU2B ROOF	OP10	Processo	15	STP: Quality Inspection	Undefined	Média	
	41	Fechado	24/07/2025 00:06:07	2 Shift	Patrick Pereira dos Santos Barbosa	JB	PNL-SU2B ROOF	OP10	Processo	37	STP: Quality Inspection	Undefined	Média	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses três exemplos ilustram como a coleta automática de dados, a rastreabilidade digital e a padronização das entradas operacionais foram integradas à rotina fabril, produzindo informações confiáveis e acionáveis.

Conforme Upadhyay et al. (2023), essa visibilidade em tempo real fortalece cadeias produtivas ao reduzir perdas e alinhar o planejamento à demanda. Do mesmo modo, Lo e Lin (2024) ressaltam que fábricas inteligentes dependem de sistemas digitais que transformam dados em informação prática, aumentando a produtividade e a confiabilidade operacional.

Assim, os dashboards desenvolvidos na estamparia deixam de ser apenas ferramentas visuais e passam a exercer papel ativo na adoção da I4.0, conectando objetivos estratégicos às decisões operacionais e contribuindo para a elevação do nível de maturidade digital da planta.

4.2.4 Ações conclusivas: validação técnica e testes em ambiente fabril

As ações conclusivas concentraram-se na fase final da implantação e contemplaram testes práticos conduzidos diretamente no ambiente fabril, com o objetivo de verificar o funcionamento dos módulos desenvolvidos em condições reais de operação. Essa etapa ocorreu entre março e abril de 2025 e envolveu a atuação conjunta do time técnico responsável pela implementação do sistema e dos operadores das áreas de produção, manutenção e qualidade.

Durante os testes, foram identificadas falhas pontuais relacionadas à estabilidade dos apontamentos, à sincronização de dados entre dispositivos e à visualização das informações em tempo real. Tais inconsistências foram analisadas e corrigidas de forma interativa, com ajustes aplicados diretamente nos componentes de coleta, no banco de dados e nos dashboards web.

A literatura demonstra que esse processo de validação em ambiente fabril é fundamental para consolidar ganhos de eficiência, uma vez que a confiabilidade das informações depende da integração contínua entre dispositivos digitais e sistemas de gestão. Jaskó et al. (2020) destacam que a integração entre MES e ERP garante rastreabilidade completa e decisões mais precisas, enquanto Ferrari et al. (2021) reforçam que a conectividade com sistemas corporativos amplia a capacidade de resposta a desvios operacionais.

A correção iterativa das falhas também se alinha ao que apontam Upadhyay et al. (2023), ao evidenciarem que a coleta de dados em tempo real só se traduz em melhoria efetiva quando os processos de ajuste são incorporados ao ciclo operacional. Além disso, Ageed et al. (2021) ressaltam que a confiabilidade das análises baseadas em *Big Data* depende da estabilidade do fluxo de dados entre sensores, dispositivos móveis e sistemas de armazenamento.

A conclusão dessa etapa permitiu a liberação gradual dos módulos para uso regular, marcando a transição da implantação para a operação contínua com dados reais. A integração completa entre PLC, MES e ERP foi validada com testes de funcionamento em condições reais, confirmando a viabilidade da operação digital integrada. Esse resultado é coerente com Lo e Lin (2024), que apontam o conceito de *smart manufacturing* como dependente de ciclos fechados de coleta, análise e resposta em tempo real, e com Veile et al. (2020), que destacam a infraestrutura digital estável como condição determinante para alcançar maturidade em ambientes produtivos.

4.3 Avaliação dos Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos após a implementação das iniciativas da I4.0 na estamparia. A análise foi construída a partir de três pilares metodológicos da pesquisa-ação.

O primeiro corresponde à observação participante combinada com a análise documental, que possibilitou registrar comparações entre práticas anteriores e atuais, apoiadas pelos dashboards operacionais e demais evidências visuais coletadas no período.

O segundo pilar refere-se ao questionário aplicado a 75 respondentes, cujas respostas revelam percepções dos operadores e demais usuários sobre os efeitos da digitalização no cotidiano produtivo.

O terceiro pilar contempla os resultados das entrevistas realizadas com 12 profissionais de diferentes níveis hierárquicos, organizadas por blocos temáticos de acordo com os eixos analíticos definidos no estudo.

A seção se encerra com a reaplicação do modelo de maturidade digital proposto por Schuh et al. (2020), o que permite avaliar a evolução da planta em relação ao diagnóstico inicial e verificar em que medida os avanços identificados pelos diferentes instrumentos de coleta são consistentes com a adoção da I4.0.

4.3.1 Comparativo entre os métodos anteriores e os processos digitalizados

A implantação das tecnologias digitais na estamperia modificou de forma significativa a coleta, a organização e o uso dos dados operacionais no processo decisório. A análise apresentada nesta seção baseia-se na observação participante e na análise documental, permitindo estabelecer comparativos visuais entre os métodos utilizados antes da digitalização e os processos atualmente estruturados em sistemas integrados.

As mudanças identificadas incluem a reformulação dos fluxos de informação, com destaque para o fortalecimento da rastreabilidade, da padronização e da disponibilidade de dados em tempo real.

4.3.1.1 Coleta de dados relacionados ao controle de produção.

A digitalização da coleta de dados no controle de produção modificou a forma de registro e acompanhamento das informações operacionais. A Figura 20 apresenta o comparativo entre o processo anterior, baseado em registros manuais, e o processo atual, com integração digital aos sistemas MES e ERP. A mudança resultou na eliminação de etapas intermediárias, na padronização dos dados e na possibilidade de acompanhamento das movimentações em tempo real.

Figura 20 - Coleta de dados do controle da produção: Código, quantidade, lotes e datas



Fonte: Elaborado pelo autor

No processo anterior, os dados de produção eram registrados manualmente pelos operadores em quadros físicos e formulários impressos. Em seguida, essas informações eram transferidas para planilhas eletrônicas, o que exigia retrabalho e criava riscos de inconsistência nos dados. Esse fluxo impedia a atualização em tempo real e dificultava a consolidação das informações para tomada de decisão.

Com a digitalização, a coleta passou a ser realizada por meio de dispositivos PDA, com leitura de QR Code diretamente no ponto de operação. As informações são capturadas automaticamente e integradas ao sistema MES, que, por sua vez, sincroniza os dados com o ERP. Esse fluxo elimina a necessidade de registros manuais e permite o registro imediato de variáveis como código do produto, quantidade, data e lote.

A transição reflete um avanço nos níveis de maturidade digital, conforme o modelo proposto por Schuh et al. (2020), saindo do estágio de Computação, caracterizado por uso isolado de ferramentas, para os níveis de Conectividade e Visibilidade, nos quais os dados são estruturados e acessíveis em tempo real. Segundo Jaskó et al. (2020), a integração entre MES e ERP viabiliza o controle contínuo das operações de produção. Ferrari et al. (2021) reforçam que essa integração reduz falhas operacionais e melhora a consistência das informações utilizadas nos processos de gestão

4.3.1.2 Controle dos eventos de produção: Gestão da qualidade dos produtos

A digitalização do processo de registro das não conformidades alterou a forma de controle dos eventos de qualidade no chão de fábrica. A Figura 21 apresenta o comparativo entre o método manual anteriormente utilizado e o fluxo atual, realizado por meio de interface digital com integração direta ao sistema de acompanhamento.

A mudança reduziu etapas redundantes e permitiu a atualização das informações em tempo real.

Figura 21 - Controle dos eventos da produção: Gestão da qualidade de produtos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anteriormente, os registros de inspeção e não conformidades eram realizados manualmente em formulários físicos e planilhas Excel, com preenchimento de dados como código da peça, lote, resultado da inspeção, imagens e descrição da anomalia. Os dados eram transcritos mais de uma vez e consolidados em apresentações para acompanhamento das ações e das prioridades definidas.

No processo atual, a coleta das informações passou a ser realizada por meio de tablets, com menus estruturados e campos obrigatórios. O operador registra o evento diretamente no sistema, marcando a localização da falha sobre o desenho técnico da peça e classificando a criticidade do defeito. As informações são armazenadas e atualizadas em um dashboard, permitindo o monitoramento das ocorrências e o controle das ações corretivas em tempo real.

Essa transformação está associada à elevação do nível de maturidade digital da organização, promovendo a visibilidade estruturada dos eventos e a rastreabilidade dos dados. De acordo com Schuh et al. (2020), o avanço da maturidade exige a integração e o uso efetivo das informações no processo de gestão.

Esse tipo de aplicação se alinha ao uso dos Sistemas Ciberfísicos para monitoramento de condições operacionais, conforme discutido por Castaño et al.

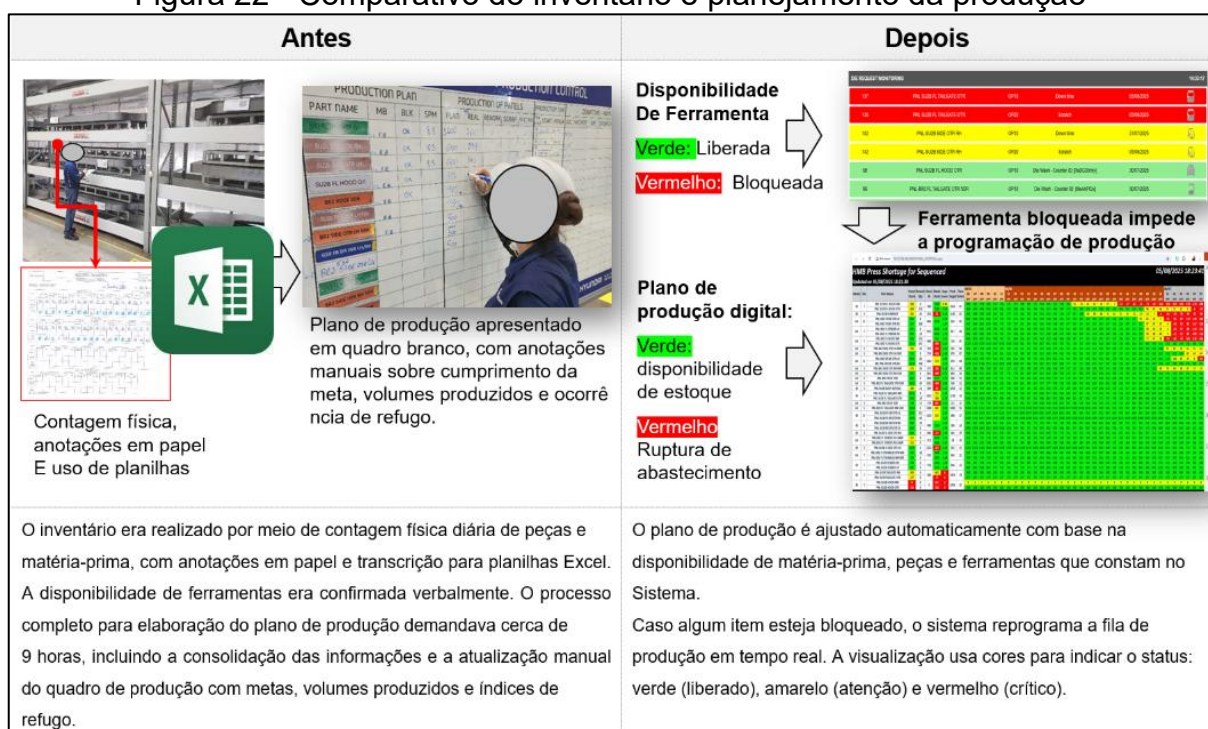
(2019), e fortalece o papel do MES como plataforma de controle e análise da qualidade no contexto da I 4.0 (Jaskó et al., 2020).

4.3.1.3 Gestão de inventários e planejamento da programação de produção

A digitalização dos inventários e do planejamento de produção modificou a forma como as informações eram consolidadas e utilizadas para definição da sequência produtiva.

A Figura 22 apresenta o comparativo entre o modelo anterior, baseado em contagem física e registros manuais, e o modelo atual, com integração digital entre os dados de estoque, disponibilidade de ferramentas e a programação das ordens de produção.

Figura 22 - Comparativo do inventário e planejamento da produção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes da digitalização, o inventário era realizado por meio de contagem física diária de peças e matéria-prima, com anotações em papel e posterior transcrição para planilhas Excel. A confirmação da disponibilidade de ferramentas ocorria verbalmente, o que exigia checagem manual.

O processo completo de apuração e elaboração do plano de produção consumia aproximadamente nove horas por dia, incluindo a consolidação dos dados,

verificação dos insumos e atualização manual do quadro com metas, volumes produzidos e índices de refugo.

No modelo digital, o plano de produção é ajustado automaticamente com base nas informações de disponibilidade de peças, matéria-prima e ferramentas registradas no sistema. A visualização adota codificação por cores, indicando em tempo real a situação dos itens: verde (liberado), amarelo (atenção) e vermelho (crítico).

Caso algum recurso esteja bloqueado, o sistema reprograma a fila de produção conforme a disponibilidade dos demais insumos.

Essa evolução está associada aos avanços na integração de sistemas digitais para coordenação da produção, o que permite ajustes dinâmicos baseados na disponibilidade real de materiais e recursos. Segundo Ghobakhloo (2018), a digitalização dos processos operacionais contribui para reduzir atrasos e ampliar a flexibilidade da programação, ao disponibilizar dados em tempo real para apoiar decisões. Frank et al. (2019) complementam que a interligação entre sistemas produtivos e logísticos fortalece a capacidade de resposta das fábricas, promovendo maior alinhamento entre planejamento e execução.

4.3.2 Avaliação dos impactos percebidos pelos usuários após a digitalização

Com o objetivo de mensurar a percepção da equipe da estamperia sobre as mudanças associadas à adoção da I4.0, foi aplicado um questionário eletrônico em março de 2025, logo após a implementação das primeiras aplicações previstas nas ações de implementação.

O instrumento foi elaborado no Microsoft Forms e enviado para os 110 colaboradores do departamento, abrangendo todos os níveis hierárquicos. Ao todo, 75 funcionários responderam ao questionário, representando um índice de participação de 68%. O questionário foi estruturado em quatro blocos:

- Caracterização dos respondentes: identificação de função, tempo de empresa e familiaridade com sistemas digitais;
- Avaliação do sistema: questões em escala Likert de cinco pontos, abordando apontamento de produção, gestão de inventário, controle de paradas de máquina, e percepções do processo de implantação;

- Pergunta aberta: espaço para relatar percepções sobre o impacto das tecnologias na rotina de trabalho;

- Satisfação geral: medição por escala Net Promoter Score (NPS).

A aplicação eletrônica permitiu a coleta padronizada e o processamento automático dos dados, reduzindo erros de tabulação e agilizando a análise inicial.

Os resultados obtidos forneceram informações para avaliar a aceitação das soluções implementadas, identificar pontos de melhoria e ajustar as estratégias de treinamento e suporte, assegurando que a transição tecnológica estivesse alinhada às necessidades do chão de fábrica.

4.3.3.1 Perfil dos respondentes

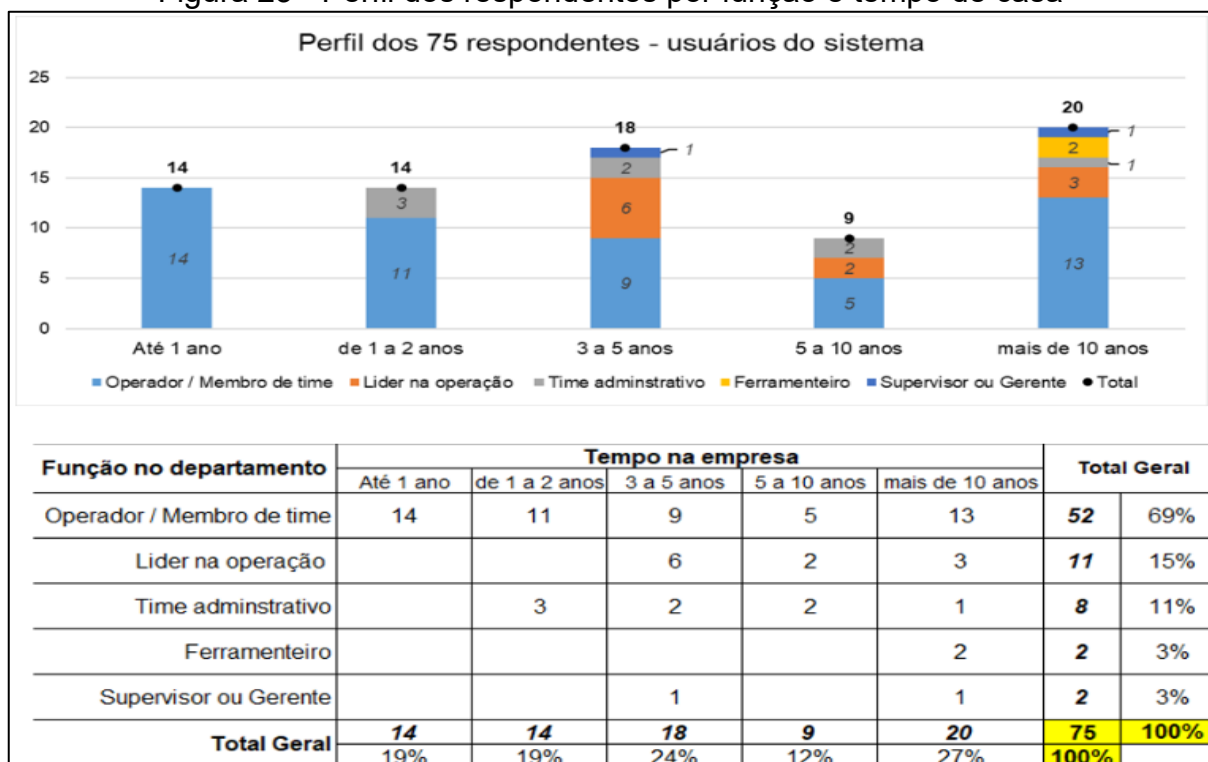
O questionário aplicado após a implementação inicial das soluções digitais contou com a participação de 75 colaboradores da estamperia, abrangendo diferentes funções, tempos de atuação no departamento, turnos de trabalho e níveis de familiaridade com sistemas digitais.

Essa caracterização foi elaborada com o objetivo de contextualizar as respostas e possibilitar uma leitura mais precisa dos resultados subsequentes.

A Figura 23 apresenta a distribuição dos respondentes por função no departamento e tempo de empresa. Observa-se que a maioria atua como operador ou membro de time (69%), seguida por líderes de operação (15%) e integrantes do time administrativo (11%). Funções especializadas, como ferramenteiro, e cargos de supervisão ou gerência representaram 3% cada.

Em relação ao tempo de casa, 38% possuem até dois anos de atuação, enquanto 27% têm mais de dez anos de empresa. Os demais grupos estão distribuídos entre 24% com três a cinco anos e 12% com cinco a dez anos de experiência.

Figura 23 - Perfil dos respondentes por função e tempo de casa

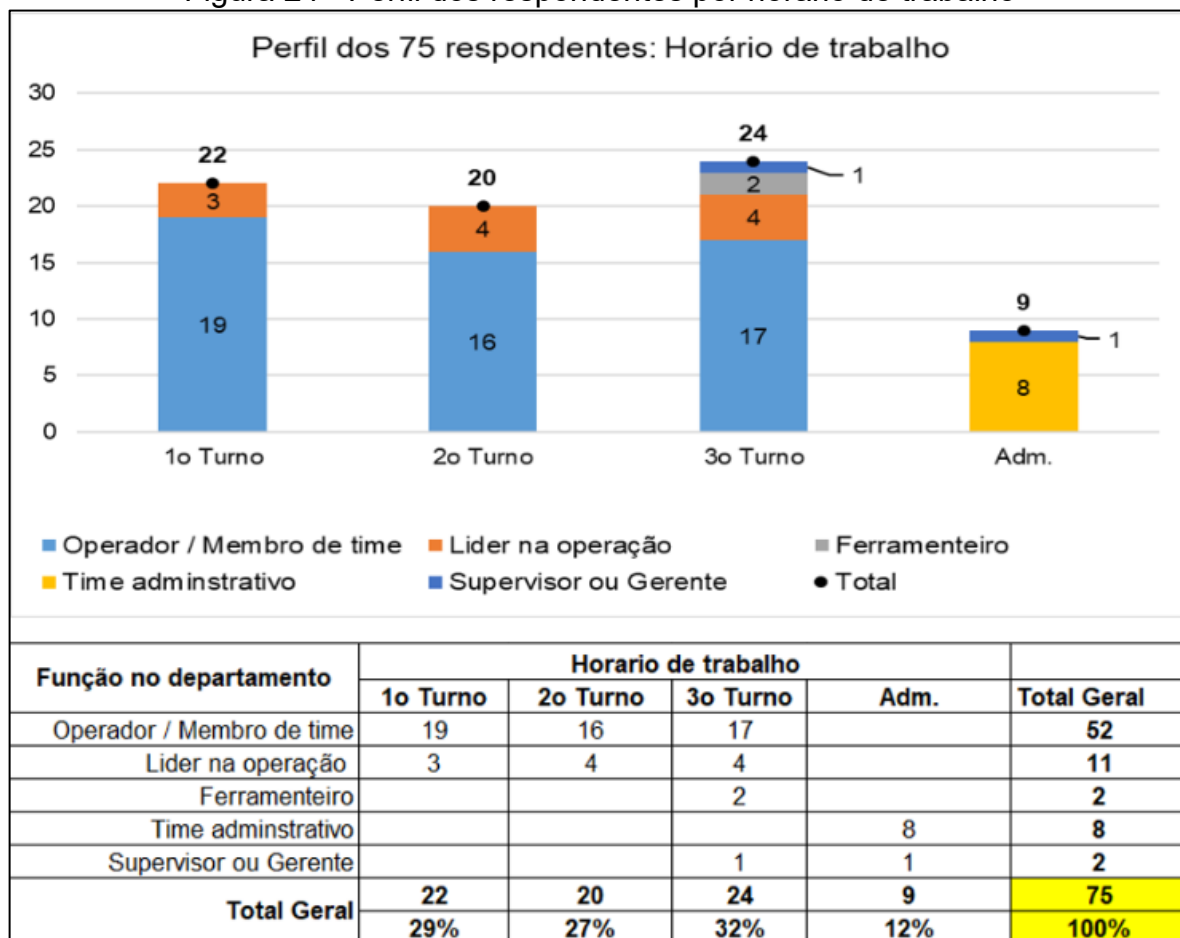


Fonte: Elaborado pelo autor

A predominância de operadores e a presença de colaboradores em diferentes estágios de tempo de casa indicam uma amostra que combina profissionais com trajetória consolidada e recém-integrados, permitindo captar percepções de perfis variados quanto ao uso das tecnologias implantadas.

A Figura 21 mostra a relação entre função no departamento e horário de trabalho. Nota-se que 32% dos respondentes estão alocados no 3º turno, seguidos pelo 1º turno (29%) e pelo 2º turno (27%), enquanto 12% trabalham em horário administrativo. Entre os operadores, há maior concentração no 3º turno, enquanto o time administrativo, como esperado, atua integralmente no expediente administrativo.

Figura 24 - Perfil dos respondentes por horário de trabalho



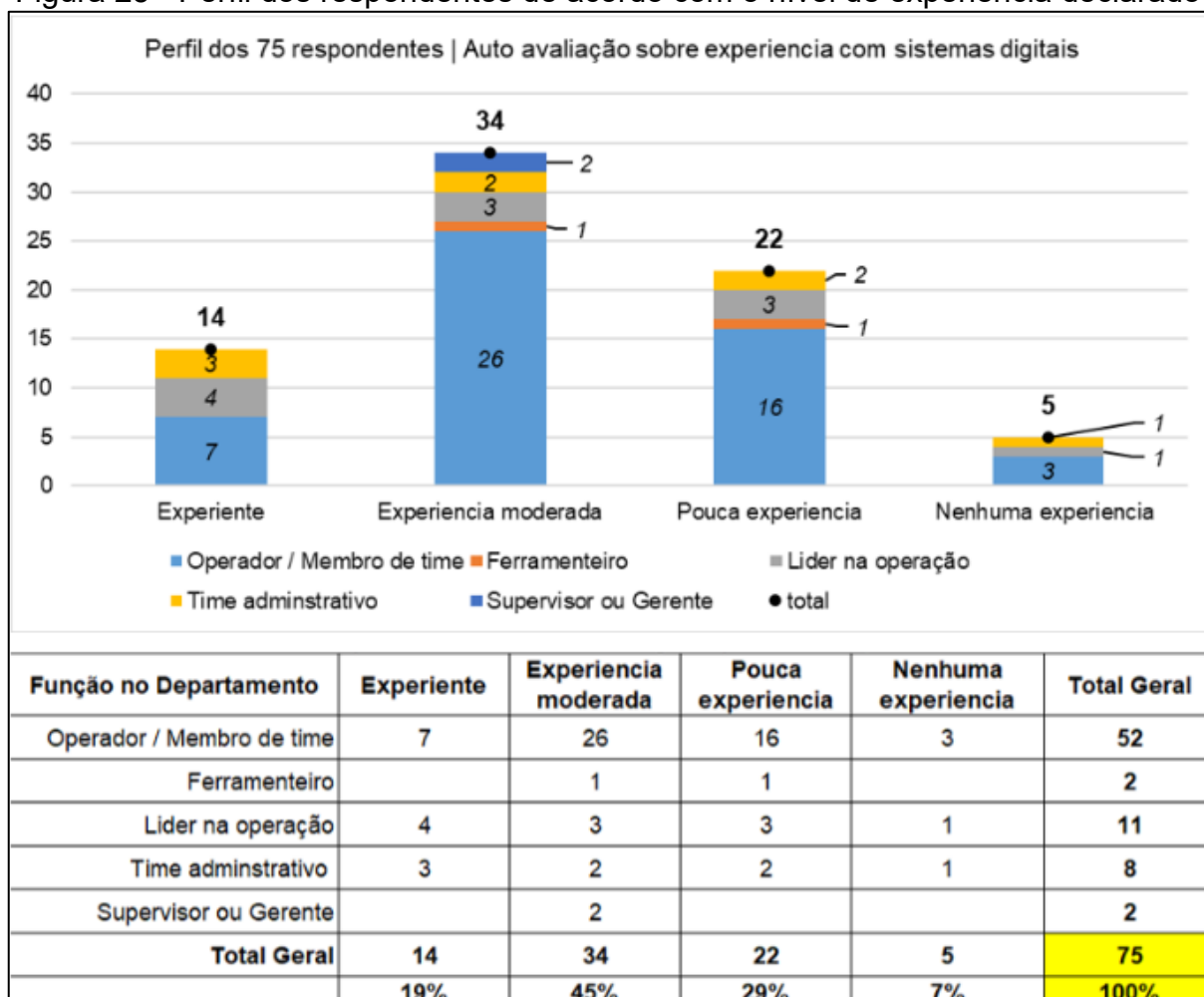
Fonte: Elaborado pelo autor

Essa distribuição reforça a representatividade de todos os turnos na pesquisa, fator relevante para compreender possíveis variações na percepção do sistema, considerando que demandas e fluxos produtivos podem diferir entre os períodos.

Por fim, a Figura 25 apresenta o cruzamento entre função no departamento e nível de familiaridade com sistemas digitais, conforme autoavaliação dos participantes. Constatou-se que 45% declararam experiência moderada, 29% relataram pouca experiência, 19% afirmaram ser experientes e 7% não possuíam experiência prévia com sistemas digitais de monitoramento da produção.

Entre os operadores, a maior parte encontra-se na categoria de experiência moderada (26 respondentes), enquanto a ausência de experiência é restrita a um grupo reduzido.

Figura 25 - Perfil dos respondentes de acordo com o nível de experiência declarado



Fonte: Elaborado pelo autor

A predominância de respondentes com experiência moderada ou alta sugere que a maioria já possuía algum contato prévio com ferramentas digitais, o que tende a facilitar a adaptação às mudanças implantadas. Ainda assim, a presença de indivíduos com pouca ou nenhuma experiência reforça a necessidade de ações de treinamento e acompanhamento contínuo, especialmente em funções operacionais, para garantir que todos consigam explorar plenamente os recursos do sistema

4.3.3.2 Avaliação das funcionalidades e impactos percebidos

Para aprofundar a análise dos impactos percebidos pelos usuários após a implementação das tecnologias digitais, foi elaborado um questionário estruturado com 12 afirmações avaliadas segundo a escala Likert de cinco pontos, variando de “Discordo totalmente” a “Concordo totalmente”.

As questões buscaram mensurar aspectos relacionados à acessibilidade e à confiabilidade das informações, à agilidade na identificação de problemas, à qualidade da comunicação entre setores, à disponibilidade de dados em tempo real e ao suporte e treinamento para o uso das novas ferramentas, entre outros pontos associados à adoção da I4.0.

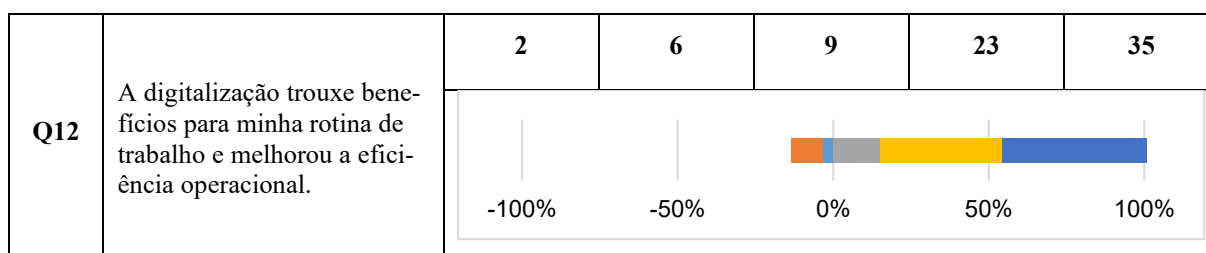
As respostas foram tabuladas e representadas no Quadro 24, que combina para cada questão: (i) o texto da afirmação; (ii) a distribuição numérica das respostas em cada categoria; e (iii) um gráfico de barras balanceadas, que possibilita visualizar a intensidade e a direção das percepções dos participantes.

Quadro 24 -Distribuição das respostas ao questionário de avaliação (escala Likert)

Questões / Avaliação		Total de Respostas e Legenda do gráfico				
		Discordo Totalmente	Discordo Parcialmente	Neutro	Concordo Parcialmente	Concordo Totalmente
Q1	As informações sobre a produção, como quantidade produzida e status das máquinas, estão mais acessíveis após as mudanças <i>(coleta de dados usando tablets, monitores, kiosques e PDAs)</i> .	1	7	8	26	33
Q2	A precisão e confiabilidade dos dados de produção melhoraram com a adoção das tecnologias da I4.0.	1	6	6	29	33
Q3	Os problemas nas máquinas ou nos processos podem ser identificados e registrados com mais rapidez do que antes.	1	5	11	18	40
Q4	As informações sobre o desempenho da produção estão disponíveis no momento necessário para a execução do trabalho.	1	9	8	26	31
Q5		4	3	14	27	27

(Continua)

	A comunicação e troca de informação entre setores melhorou após a implementação das novas tecnologias.					
Q6	A disponibilidade de dados em tempo real facilitou a resolução de problemas operacionais.	1	8	14	25	27
Q7	As mudanças implementadas reduziram a necessidade de registros manuais e retrabalho nas informações.	4	2	7	28	34
Q8	A tomada de decisão ficou mais rápida e eficiente com a nova forma de coleta de dados.	1	8	6	30	30
Q9	As novas tecnologias são fáceis de usar e foram bem explicadas em treinamento.	6	7	5	23	34
Q10	Sinto-me confortável utilizando os novos sistemas no meu dia a dia.	3	5	9	24	34
Q11	Recebi suporte adequado para aprender a usar as ferramentas digitais implementadas.	7	6	9	20	33



Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise do quadro revela que, para a maioria das questões, as respostas se concentram nas opções “Concordo parcialmente” e “Concordo totalmente”, evidenciando uma percepção positiva predominante em relação aos efeitos da digitalização. Observa-se também que, embora existam respostas neutras e de discordância, estas são menos frequentes, o que indica que eventuais resistências ou dificuldades não constituem o padrão geral das percepções.

As questões Q1 a Q4 abordam acesso, precisão e disponibilidade das informações de produção. Em todas elas, a soma das respostas “Concordo parcialmente” e “Concordo totalmente” supera 70%, indicando que a digitalização aumentou a confiabilidade e a disponibilidade das informações no momento necessário. Na Q3, 40 respostas em “Concordo totalmente” destacam percepção positiva sobre a agilidade para identificar e registrar problemas.

As questões Q5 e Q6 tratam da comunicação entre setores e da resolução de problemas com base em dados em tempo real. Aproximadamente três quartos dos respondentes relataram melhorias nessas áreas, reforçando o papel das tecnologias digitais na integração de fluxos de informação e na agilidade de ações corretivas. A presença moderada de respostas neutras sugere que, em determinados contextos ou funções, a percepção de ganho é menos evidente.

As questões Q7 e Q8 avaliam a redução de registros manuais e o efeito da nova coleta de dados na tomada de decisão. Em ambas, a concordância supera 75%, confirmando que a substituição de registros manuais por digitais contribui diretamente para a eficiência operacional e para a gestão.

As questões Q9 a Q11 abordam usabilidade das tecnologias, conforto no uso e suporte ao aprendizado. Embora a concordância predomine, as Q9 e Q11 apresentam percentuais mais elevados de discordância total ou parcial, variando de 17% a 17,3%. Isso indica a necessidade de atenção contínua ao treinamento e ao

suporte técnico para que todos os usuários alcancem níveis semelhantes de familiaridade e confiança.

A Q12, que avalia de forma global os benefícios da digitalização na rotina de trabalho e na eficiência operacional, apresenta um dos maiores índices de concordância total, com 35 respostas, reforçando a percepção positiva identificada nas demais questões.

Esses achados estão alinhados à literatura que aponta a importância da facilidade de uso, da clareza na apresentação das informações e da disponibilidade de suporte contínuo para consolidar a adoção de sistemas digitais (Jaskó et al., 2020; Ferrari et al., 2021).

Treinamentos bem estruturados e canais de *feedback* favorecem a integração das tecnologias às rotinas produtivas e aumentam a satisfação dos usuários (Möhring et al., 2020; Santos; Marinho, 2020).

No contexto industrial, o engajamento da força de trabalho nas fases iniciais da implementação está associado à manutenção de ganhos no longo prazo (Teixeira et al., 2021; Sunder; Prashar, 2024).

Além das questões fechadas, o questionário incluiu três perguntas abertas para registrar percepções espontâneas sobre as novas tecnologias.

A Figura 26 apresenta a nuvem de palavras gerada a partir das respostas à Q13, que solicitou uma palavra ou expressão para descrever a experiência com as novas tecnologias.

Figura 26 - Percepção da experiência das tecnologias aplicadas na produção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a predominância dos termos “Agilidade”, “Boa” e “Facilidade”, indicando que a percepção geral está associada a maior rapidez, simplicidade e confiabilidade no uso dos sistemas.

A Figura 27 mostra a nuvem de palavras referente à Q14, que questionou o principal benefício percebido com a digitalização.

Figura 27 - Benefícios percebidos pela digitalização



Fonte: Elaborado pelo autor.

O termo mais citado foi “Rapidez”, seguido por “Maior eficiência” e “Fácil acesso”. Esses resultados reforçam que os ganhos de tempo e a facilidade de acesso às informações são aspectos valorizados pelos usuários.

A Figura Z apresenta a nuvem de palavras obtida na Q15, que investigou o principal desafio enfrentado após a implementação das novas tecnologias.

Figura 28 - Desafios percebidos no processo de implantação das tecnologias



Fonte: Elaborado pelo autor.

O termo “Aprendizado” foi o mais recorrente, acompanhado de “Adaptação” e “Treinamento adequado”, sugerindo que, embora a receptividade seja positiva, ainda há espaço para aprimorar a capacitação e uniformizar o nível de domínio das ferramentas.

Para completar a avaliação do questionário aplicado aos usuários, foi mensurado o nível geral de satisfação com as novas tecnologias implementadas na produção por meio do indicador *Net Promoter Score* (NPS), gerado pelo Microsoft Forms.

A Figura W apresenta a distribuição dos respondentes entre promotores, passivos e detratores, permitindo quantificar a percepção global sobre as mudanças.

Figura 29 - Indicador *Net Promoter Score (NPS)*



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado obtido foi um NPS de 28 pontos, composto por 37 promotores, 22 passivos e 16 detratores. Esse índice revela uma tendência positiva na aceitação das tecnologias, mas também evidencia oportunidades de aprimoramento, especialmente na conversão de usuários neutros ou insatisfeitos em promotores.

Essa condição reforça a importância de ações contínuas de capacitação, suporte técnico e refinamento das funcionalidades para consolidar os ganhos percebidos.

4.3.3 Análise dos Resultados de Entrevistas com os Grupos Estratégico, Técnico e Operacional

As entrevistas foram realizadas nos meses de junho e julho de 2025, contemplando três grupos de perfil definidos na pesquisa: estratégico, técnico e operacional com um total de 12 profissionais entrevistados presencialmente em vários níveis hierárquicos. Todas as entrevistas foram gravadas em áudio na íntegra para posterior transcrição na plataforma *Whisper Transcribe* e analisadas no software Atlas.ti.

Essa etapa buscou compreender, de forma comparativa, as percepções e experiências relacionadas às iniciativas da I4.0 na estampa automotiva, desde a maturidade inicial até os resultados pós-projeto.

A análise foi conduzida com base nos onze eixos temáticos definidos na metodologia e aplicados no Atlas.ti, permitindo organizar e interpretar os relatos

segundo categorias consistentes com o modelo de maturidade proposto por Schuh et al. (2020).

Além de identificar padrões comuns, buscou-se destacar diferenças entre grupos e relacionar as falas à literatura revisada, de modo a integrar evidências qualitativas à discussão dos resultados.

4.3.3.1 Perfil dos entrevistados

Participaram desta etapa 12 profissionais, sendo 2 do grupo estratégico, 4 do grupo técnico e 6 do grupo operacional. O tempo de vínculo com a empresa variou entre 2 e 14 anos. A escolaridade incluiu desde ensino médio técnico até pós-graduação, com predominância de formações em Engenharia, Administração e áreas ligadas à gestão e operação industrial.

As funções exercidas abrangem posições de gerência, supervisão, desenvolvimento de software, análise de processos, liderança de grupo e operação de máquinas.

O Quadro 25 apresenta o perfil detalhado dos entrevistados, considerando grupo, função, tempo de empresa, formação e experiência prévia com processos de digitalização.

Quadro 25 - Perfil dos entrevistados

Código	Grupo	Função / Tempo de casa	Formação	Experiência com o processo de digitalização
E1	Estratégico	Gerente Geral de TI Grupo Autoever 9 anos	Análise sistemas, e especializações em Microsoft, Cisco. MBA Gestão Empre- sarial FGV	Infraestrutura, MES, <i>Software Analysts</i> , ERP.
E2	Estratégico	Gerente de Produção 13 anos	Engenheiro de con- trole e automação.	Participação da definição do escopo, Sistema MES.
T1	Técnico	Expatriado sul coreano, atua como consultor e desenvolvedor do MES 6 anos no Brasil e 15 anos na matriz coreana	Ciência da Computa- ção, universidade na Coreia do sul	Projeto de base de dados, desenvolvimento MES, Nvi- dea

(Continua)

T2	Técnico	Analista de sistema sênior no departamento de TI 3 anos e 6 meses	Análise e desenvolvimento de sistemas pelo Instituto Federal de São Paulo Especialização em administração e engenharia e administração de banco de dados na Unicamp	Implantação de sistema em outros departamentos da empresa
T3	Técnico	Analista Sênior da Estamparia 4 anos e 6 meses	Engenharia de Produção Pós-graduado em Engenharia de Processos e Qualidade e Gestão pela PUC Rio Grande do Sul.	Estudo do escopo, gerenciamento no geral dos módulos, análise e gestão do projeto MES, integração entre os sistemas e treinamento operacional
T4	Técnico	Supervisor da Manutenção 13 anos e 7 meses	Engenheiro de controle automação pela Unimep. Especialização em administração industrial pela Poli-USP	Coordenação ou como suporte na área técnica para fornecer os dados para que os projetos sejam desenvolvidos. Suportar o time que fez o desenvolvimento com base na integração dos controladores de chão de fábrica, PLCs, com as tecnologias da informação.
O1	Operacional	Lider de Grupo Sênior na estamparia, 1º Turno 14 anos	Técnico em mecatrônica. Engenharia mecânica. Pós-graduação de produtividade e qualidade.	Pouco experiência com processo de digitalização, ajudou a promover e disseminar a informação e suporte para treinar o time de usuários.
O2	Operacional	Lider de Time no 1.o Turno 12 anos	Administração de empresas	Pouco experiência com processo de digitalização, ajudou a promover e disseminar a informação e suporte para testar e implantar o sistema.
O3	Operacional	Lider de ferramentaria no 2º Turno 5 anos	Engenharia mecânica	Pouco experiência com processo de digitalização, ajudou a promover e disseminar a informação e suporte para testar e implantar o sistema.

O4	Operacional	Lider de time no 2.o turno 4 anos	Cursando gestão da qualidade	Pouco experiencia com processo de digitalização, ajudou a promover e disseminar a informação e suporte para testar e implantar o sistema.
O5	Operacional	Operador de Máquinas 2 anos	Curso de montador de automóveis pelo SENAI	Sem experiencia com processo de digitalização em geral, ajudou a promover e disseminar a informação e suporte para testar e implantar o sistema
O6	Operacional	Operador de máquinas no 1.o turno 2 anos	Operador de maquinas de usinagem – Senai Montador de auto-móveis – Senai.	Sem experiencia com processo de digitalização em geral, ajudou a promover e disseminar a informação e suporte para testar e implantar o sistema

Fonte: Elaborado pelo autor

A diversidade de perfis contemplados na amostra permite uma análise comparativa entre diferentes perspectivas organizacionais. A presença de profissionais com ampla experiência na empresa, bem como de colaboradores mais recentes, favorece a identificação de percepções distintas sobre a maturidade digital e os impactos da implementação.

Da mesma forma, a variedade de formações acadêmicas e de experiências prévias com processos de digitalização contribui para compreender como o conhecimento técnico e organizacional influencia as respostas apresentadas.

4.3.3.2 Apresentação dos resultados no Atlas.ti

A análise das entrevistas foi conduzida no software Atlas.ti, com aplicação de um sistema de codificação estruturado a partir de onze eixos temáticos definidos na metodologia.

Esses eixos foram construídos com base nos objetivos específicos da pesquisa, nas questões de investigação e no modelo proposto por Schuh et al. (2020), permitindo organizar e interpretar os relatos de forma sistemática.

O Quadro 26 apresenta a lista completa dos códigos e eixos temáticos utilizados, acompanhados de suas respectivas definições. Essa estrutura possibilitou a classificação dos trechos das entrevistas de forma consistente e comparável entre os diferentes grupos de perfil (estratégico, técnico e operacional).

Quadro 26 - Eixos temáticos das entrevistas

Código/ eixo temático	Significado
1. Maturidade Inicial	Relatos sobre o nível de digitalização anterior à intervenção, percepção inicial sobre a necessidade do projeto e limitações operacionais enfrentadas antes da implementação.
2. Concepção da Solução	Informações sobre como a solução técnica foi desenhada, quais premissas orientaram o desenvolvimento e de que forma os engenheiros da área contribuíram.
3. IoT e Coleta de Dados	Trechos que tratam da coleta automática de dados via sensores IoT, tipos de dados capturados, conectividade e como essas informações são utilizadas nas decisões operacionais.
4. Integração de Sistemas	Comentários sobre a integração entre MES, sensores, ERP e demais sistemas; troca automática de dados e setores que acessam essas informações em tempo real.
5. Qualidade e CPS	Registros sobre a digitalização de dados de qualidade (rejeições, não conformidades etc.), uso de gráficos, relatórios e possibilidade de respostas automáticas com base em dados em tempo real (sistemas ciberfísicos)
6. Estoque e Planejamento	Fala sobre mudanças no rastreamento de estoques e nos processos de replanejamento da produção a partir da digitalização e maior transparência dos dados.
7. Barreiras e Desafios	Relatos de dificuldades técnicas ou estruturais enfrentadas na implementação, como falta de infraestrutura, limitações de equipe ou problemas organizacionais.
8. Integração com Operação	Percepções sobre a aceitação do sistema no chão de fábrica, resistência dos operadores, usabilidade da interface e ajustes feitos para facilitar o uso.
9. Validação e Feedback	Descrição de como os feedbacks do time operacional foram coletados, incorporados ao sistema e se resultaram em mudanças ou adaptações.
10. Maturidade Pós-Projeto	Avaliação dos avanços concretos em termos de digitalização, integração entre áreas, tomada de decisão baseada em dados e autonomia dos sistemas após a implementação.
11. Recomendações Finais	Sugestões dos entrevistados sobre boas práticas, lições aprendidas e conselhos para replicação das tecnologias da I4.0 em outras áreas ou empresas.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dessa codificação, foi possível quantificar a distribuição das citações por eixo e por grupo, bem como identificar padrões e contrastes nas percepções dos participantes.

Esses resultados iniciais, organizados no Quadro 27, servem como base para as análises qualitativas detalhadas que serão apresentadas nos subitens seguintes.

Quadro 27 - Análises quantitativa detalhadas por grupo

	Estratégico	Operações	Técnico
1. Maturidade Inicial	6	7	10
10. Maturidade Pós-Projeto	13	26	22
11. Recomendações Finais	6	6	6
2. Concepção da Solução	13	7	20
3. IoT e Coleta de Dados	4	15	17
4. Integração de Sistemas	8	20	19
5. Qualidade e CPS	1	7	10
6. Estoque e Planejamento	1	4	10
7. Barreiras e Desafios	11	12	25
8. Integração com Operação	15	34	24
9. Validação e Feedback	9	21	15

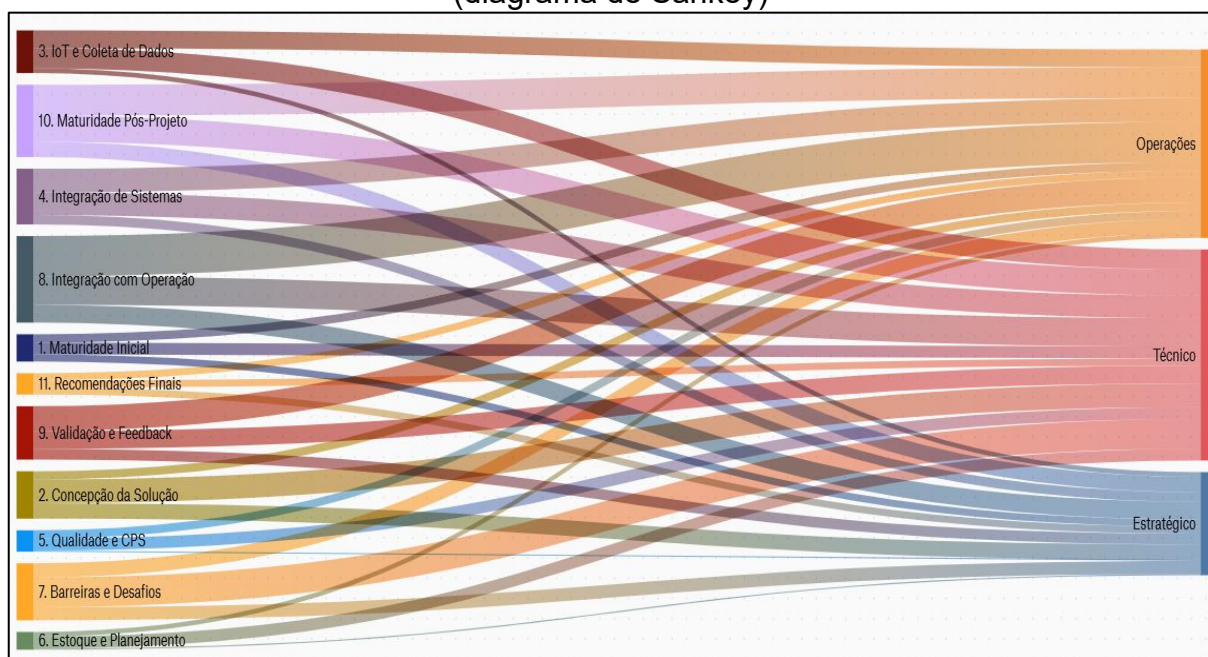
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que “Integração com Operação” e “Maturidade Pós-Projeto” concentram o maior número de registros no conjunto das entrevistas, com participação expressiva de todos os grupos. O grupo técnico apresentou maior número de menções em “Barreiras e Desafios” e “Concepção da Solução”, enquanto o grupo operacional se destacou em “Integração com Operação” e “Validação e Feedback”. Já o grupo estratégico enfatizou “Concepção da Solução” e “Maturidade Pós-Projeto”.

Essa distribuição sugere que, embora haja convergências em alguns temas, a ênfase dada a determinados eixos varia de acordo com o papel desempenhado por cada grupo na organização.

Para complementar a análise, a Figura 30 apresenta o diagrama de Sankey relacionando os onze eixos temáticos aos três grupos de entrevistados. A visualização permite observar a frequência e a intensidade dos vínculos entre cada eixo e grupo, destacando de forma clara os temas mais relevantes para cada perfil.

Figura 30 - Distribuição das citações por eixo temático e grupo de entrevistados (diagrama de Sankey)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A visualização evidencia que “Integração com Operação” e “Maturidade Pós-Projeto” concentram fluxos mais expressivos para os grupos operacional e técnico, confirmando a predominância observada na contagem numérica das citações. O eixo “Barreiras e Desafios” apresenta forte ligação com o grupo técnico, enquanto “Concepção da Solução” é mais associado aos grupos estratégico e técnico, sugerindo sua participação direta na definição do escopo e nas decisões de projeto.

O grupo operacional mantém conexões relevantes com “Validação e Feedback” e “IoT e Coleta de Dados”, refletindo seu papel ativo na aplicação prática e nos testes das soluções digitais. Esses padrões reforçam que a contribuição de cada grupo está alinhada às responsabilidades e atribuições de seu nível hierárquico.

4.3.3.3 Exame analíticos dos eixos temáticos das entrevistas.

A análise das entrevistas foi realizada com apoio do software Atlas.ti, no qual os relatos foram codificados segundo os onze eixos temáticos definidos metodologicamente. Esse procedimento permitiu organizar os dados de forma estruturada e comparativa entre os três grupos de entrevistados (estratégico, técnico e operacional).

A apresentação dos resultados está organizada em três etapas. Primeiro, apresenta-se um quadro-síntese que resume, por eixo temático, os principais focos identificados em cada grupo, destacando convergências e especificidades entre os níveis hierárquicos.

Na sequência, são expostos os achados qualitativos, com trechos selecionados das falas mais relevantes registradas no Atlas.ti. A escolha dessas citações considerou sua relação com as questões de pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos e as hipóteses formuladas. Dessa forma, os depoimentos funcionam como evidências empíricas que retratam a experiência dos participantes da estampa.

Por fim, os resultados são discutidos em comparação com a revisão de literatura, para relacionar os achados empíricos às contribuições já apresentadas por estudos anteriores. Essa análise comparativa busca evidenciar em que medida os resultados da pesquisa confirmam, ampliam ou contrastam com a literatura, sempre com foco nos objetivos da investigação.

- **Análise dos eixos temáticos**

Com o objetivo de oferecer uma visão consolidada das percepções registradas nas entrevistas, elaborou-se um quadro-síntese que organiza os principais focos de cada grupo de respondentes (estratégico, técnico e operacional) em relação aos onze eixos temáticos definidos metodologicamente.

Esse recurso permite observar, de forma comparativa, como diferentes níveis hierárquicos compreenderam os mesmos aspectos associados às iniciativas da I4.0.

O Quadro 28 apresenta essa síntese, destacando convergências e especificidades entre os grupos analisados.

Quadro 28 - Sínteses dos eixos temáticos por grupo de entrevistas

Eixo temático	Grupo entrevistado		
	Estratégico	Técnico	Operacional
1. Maturidade Inicial	Destacou ausência de integração de dados e baixa confiabilidade para decisões estratégicas.	Ressaltou atraso nos apontamentos e registros fragmentados.	Relatou controles manuais em cadernos, perda de documentos e dificuldades no rastreamento.
2. Concepção da Solução	Priorizou alinhamento ao ERP e integração corporativa.	Enfaticizou premissas técnicas de coleta em tempo real e conectividade.	Participou em testes, sugerindo ajustes de usabilidade e fluxos práticos.
3. IoT e Coleta de Dados	Valoriza visibilidade de indicadores em tempo real para gestão.	Relatou conectividade via PLCs, tablets e painéis, eliminando registros manuais.	Destacou facilidade no uso dos tablets e rapidez para registrar falhas.
4. Integração de Sistemas	Apontou importância da integração MES-ERP e uso estratégico dos dados.	Enfaticizou troca automática entre MES, sensores e ERP, reduzindo redundâncias.	Relatou acesso direto às tags e dados de produção via tablet, eliminando papel.
5. Qualidade e CPS	Reforçou necessidade de decisões baseadas em dados de qualidade online.	Citou disparo automático de alertas e relatórios (e-mails, dashboards).	Destacou praticidade no registro de peças NG e acompanhamento de rejeições.
6. Estoque e Planejamento	Destacou maior transparência do inventário para decisões produtivas.	Ressaltou uso de layout vivo e dashboards para bobinas e blanks.	Relatou abandono da contagem manual e maior confiabilidade dos estoques.
7. Barreiras e Desafios	Apontou limitações organizacionais e resistência cultural.	Citou problemas de infraestrutura de rede, conectividade e treinamento.	Relatou dificuldades iniciais no uso de tablets e gaps de sistema.
8. Integração com Operação	Enfaticizou importância da adesão dos operadores ao novo sistema.	Relatou ajustes de interface e coleta de feedbacks para aceitação.	Destacou adaptação rápida da equipe após treinamento inicial.
9. Validação e Feedback	Reconheceu relevância do ciclo de feedback para consolidação do projeto.	Citou envolvimento ativo em testes e incorporações de melhorias.	Relatou participação direta nos testes e sugestões implementadas.
10. Maturidade Pós-Projeto	Ressaltou maior confiabilidade nos indicadores estratégicos e decisões baseadas em dados.	Enfaticizou avanços na integração entre áreas e automação dos registros.	Relatou ganho de agilidade no acesso à informação e maior autonomia no dia a dia.
11. Recomendações Finais	Indicou necessidade de consolidar boas práticas e expandir digitalização.	Recomendou intensificação dos testes e treinamentos técnicos.	Sugeriu ampliar uso em outras áreas e reforçar travas automáticas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A síntese apresentada no Quadro 28 confirma a existência de perspectivas distintas entre os grupos, mas também evidencia pontos de convergência em torno da necessidade de maior confiabilidade e integração dos dados.

Esses achados estão em linha com a literatura sobre maturidade digital, que destaca a importância de superar práticas manuais e fragmentadas para avançar na direção de processos interconectados e decisões baseadas em dados (Schuh et al., 2020).

A evolução depende da capacidade de integrar informações de diferentes áreas e de promover o uso efetivo de dados em tempo real, aspectos observados nos relatos de todos os grupos (Schuh et al., 2020).

Na sequência, são apresentados trechos selecionados das entrevistas, organizados por eixo temático. Esses registros qualitativos permitem aprofundar a compreensão dos achados, ilustrando de forma direta como os entrevistados vivenciaram a transição da estampa no processo de digitalização.

- Análise de co-ocorrência dos eixos temáticos.

Além da análise individual de cada eixo, foi realizada uma avaliação de co-ocorrência entre os códigos aplicados no Atlas.ti. O objetivo deste procedimento foi identificar como os diferentes temas apareceram de forma associada nos relatos dos entrevistados, evidenciando relações de proximidade entre aspectos técnicos, organizacionais e operacionais. Essa etapa complementa a leitura qualitativa, ao permitir compreender as iniciativas da I4.0 como um processo interdependente.

O Quadro 29 apresenta a matriz de co-ocorrência entre os onze eixos temáticos. Os números indicam a quantidade de vezes em que dois códigos foram citados conjuntamente no mesmo trecho das entrevistas, revelando os vínculos mais fortes percebidos pelos participantes.

Quadro 29 - Matriz de co-ocorrência entre os eixos temáticos das entrevistas

Eixo Temático	Maturidade Inicial	Concepção da solução	IoT e Coleta de Dados	Integração de sistemas	Integração de sistemas	Qualidade e CPS	Estoque e Planejamento	Barreiras e desafios	Integração com Operação	Validação e Feedback	Recomendações Finais
1 Maturidade Inicial		8	0	1	0	0	10	3	1	3	0
2 Concepção da solução	8		16	18	6	5	11	23	2	16	0
3 IoT e Coleta de Dados	0	16		25	16	13	0	26	4	26	0
4 Integração de sistemas	1	18	25		13	11	7	32	7	31	0
5 Qualidade e CPS	0	6	16	13		13	0	13	1	13	0
6 Estoque e Planejamento	0	5	13	11	13		0	11	2	12	0
7 Barreiras e desafios	10	11	0	7	0	0		11	9	6	4
8 Integração c/ Operação	3	23	26	32	13	11	11		24	41	1
9 Validação e Feedback	1	2	4	7	1	2	9	24		18	7
10 Maturidade Pós- Projeto	3	16	26	31	13	12	6	41	18		2
11 Recomendações Finais	0	0	0	0	0	0	4	1	7	2	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise do Quadro 29 mostra que os vínculos mais expressivos se concentraram em quatro eixos: Integração de Sistemas, Integração com a Operação, Maturidade Pós-Projeto e IoT e Coleta de Dados. Esses resultados sugerem que a percepção dos entrevistados sobre o avanço da maturidade digital esteve fortemente associada à capacidade de integrar dados de diferentes áreas e de utilizá-los de forma prática no dia a dia da produção.

O cruzamento entre Integração de Sistemas e Maturidade Pós-Projeto (31 registros), bem como entre Integração com a Operação e Maturidade Pós-Projeto (41 registros), indica que o progresso percebido na estampa dependeu da consolidação das integrações tecnológicas e da adesão dos operadores. Essa interpretação converge com Schuh et al. (2020), ao destacar que a evolução para estágios superiores de maturidade digital exige tanto a infraestrutura técnica quanto a incorporação dos dados na rotina organizacional.

Outro ponto de destaque foi a associação entre IoT e Coleta de Dados e Integração de Sistemas (25 registros). Esse resultado reforça o papel central da captura automática de dados para sustentar a confiabilidade das informações, aspecto

discutido por Bueno et al. (2020) e Jaskó et al. (2020). A relação com Qualidade e CPS (13 registros) também se mostrou significativa, evidenciando que os sistemas ciberfísicos funcionaram como instrumentos de monitoramento imediato e redução de defeitos, em linha com as análises de Möhring et al. (2020) e Ikumapayi et al. (2024).

As dificuldades apareceram de forma associada principalmente a Integração de Sistemas (32 registros) e Concepção da Solução (23 registros). Esse padrão revela que as barreiras técnicas e organizacionais não foram tratadas isoladamente, mas surgiram no mesmo contexto em que se buscava unificar plataformas e definir parâmetros de projeto. Os relatos confirmam os entraves identificados por Veile et al. (2020), que apontam a coexistência de infraestrutura limitada, máquinas legadas e resistência cultural como fatores que retardam a evolução digital.

Por fim, a co-ocorrência entre Integração com a Operação e Validação e Feedback (41 registros) evidencia que a aceitação das soluções digitais esteve diretamente ligada ao envolvimento dos operadores e à incorporação de suas sugestões. Esse resultado reforça os achados de Wang et al. (2018) e Upadhyay et al. (2023), que destacam a importância da participação do time de chão de fábrica para consolidar a adoção da I4.0.

Em conjunto, os resultados da co-ocorrência confirmam que a maturidade alcançada na estamparia não foi resultado isolado de avanços tecnológicos, mas de uma rede de fatores interligados. A confiabilidade dos dados, a integração entre sistemas e a participação ativa dos usuários operacionais formaram a base sobre a qual se sustentou a percepção de maior maturidade digital.

- Trechos selecionados das entrevistas

A seguir, são apresentados trechos selecionados das entrevistas, organizados segundo os onze eixos temáticos definidos na metodologia. As citações foram escolhidas por sua relevância em relação às questões de pesquisa e aos objetivos do estudo, funcionando como evidências diretas das percepções dos diferentes grupos de entrevistados. A identificação de cada respondente já inclui seu cargo ou função, o que permite reconhecer a qual grupo pertence (estratégico, técnico ou operacional).

Eixo 1 – Maturidade Inicial:

“[...] era difícil entender o que acontecia no chão de fábrica em tempo real. A gente dependia de ligações, relatórios manuais e muita tentativa e erro. A gestão era reativa” (E2, gerente de produção).

“[...] não existia banco de dados consolidado. A produção era registrada no papel ou em planilhas isoladas” (T1, consultor expatriado).

“[...] não tinha painel, nem tela. Só papel e conversa” (O6, operador de máquina).

Eixo 2 – Concepção da Solução

“[...] a ideia era ter um sistema que desse previsibilidade e dados confiáveis. A gente começou definindo o que precisava ser medido de forma automática” (E2, gerente de produção).

“[...] criamos uma base de dados unificada, ligada aos sensores e aos PLCs. Foi desenhado tudo com foco na rastreabilidade e uso posterior dos dados” (T1, especialista desenvolvedor de software – Autoever).

“[...] no começo tinha muita coisa que a gente não entendia no sistema. Fomos dando ideia, tipo colocar nome da máquina, hora certinha, facilitar os campos” (O1, líder de grupo da produção).

Eixo 3 – IoT e Coleta de Dados

“[...] o objetivo principal era eliminar a subjetividade e garantir rastreabilidade. A partir do momento que o dado é capturado automaticamente, conseguimos confiar e reagir rápido” (E1, gerente geral de TI).

“[...] colocamos sensores de ciclo, sensores de presença de peça, sensores de batida, além dos contadores de produção. Tudo isso foi conectado aos PLCs, que mandam as informações para o banco de dados” (T1, especialista desenvolvedor de software – Autoever).

“[...] agora tem tela na linha, que mostra quantas peças saíram, quanto tempo está parada, se bateu ou não. A gente consegue ver na hora” (O1, líder de grupo da produção).

Eixo 4 – Integração de Sistemas

“[...] a principal limitação era que cada área tinha seu sistema, sem conversa entre eles. A produção tinha um controle, a manutenção outro, a qualidade outro. A gente precisava juntar tudo no Excel” (E1, gerente geral de TI).

“[...] criamos uma base comum para integrar produção, qualidade e manutenção. Isso facilitou muito os alertas automáticos e os relatórios” (T2, especialista desenvolvedor – Autoever).

“[...] agora a gente sabe quando o problema foi de máquina ou de material, porque tudo aparece no sistema. Antes era só suposição” (O1, líder de grupo da produção).

Eixo 5 – Qualidade e CPS

“[...] com os dashboards de qualidade, conseguimos enxergar em tempo real as taxas de rejeição. Antes, o relatório chegava no dia seguinte, hoje a decisão é imediata” (E1, gerente de produção).

“[...] os CPS foram programados para capturar os dados de defeitos em tempo real. Assim o operador não precisa mais preencher planilhas, o próprio sistema gera o gráfico de rejeições” (T1, especialista desenvolvedor de software – Autoever).

“[...] antes a gente descobria os defeitos só no fim do turno, agora já aparece na hora e conseguimos ajustar a máquina. Isso diminuiu bastante o retrabalho” (O3, líder de chão de fábrica).

Eixo 6: Estoque e planejamento

“[...] antes, a atualização de estoques dependia de registros manuais e demorava para refletir no sistema. Agora temos dados quase instantâneos, o que permite reagir mais rápido quando há desvios ou falta de material” (E2, gerente de produção).

“[...] os dashboards mostram em tempo real o nível de blanks, peças em processo e inventário de bobinas. Isso facilita tanto o replanejamento da produção quanto o acompanhamento das ordens abertas” (T3, analista de processos da estamparia).

“[...] com o sistema novo, conseguimos saber na hora quando uma peça vai para reparo ou quando falta material para a próxima etapa. Antes precisávamos esperar o apontamento manual do operador” (O2, líder de chão de fábrica).

Eixo 7: Barreiras e desafios

“[...] tivemos problemas de infraestrutura no início, principalmente rede e conectividade dentro da fábrica. Isso atrasou a integração de alguns módulos do sistema” (E2, gerente de produção).

“[...] tivemos dificuldade em integrar os sensores instalados nas prensas mais antigas. As máquinas não estavam preparadas para esse nível de conectividade” (T4, supervisor de manutenção).

“[...] no começo houve resistência dos operadores. Muitos tinham medo de que o sistema fosse usado para controlar o ritmo de trabalho, e não para ajudar na produção” (O1, líder de grupo da produção).

Eixo 8: Integração com a operação

“[...] percebemos que a aceitação só ocorreu quando os operadores viram que os dados coletados facilitavam o trabalho deles, reduzindo a necessidade de registros manuais” (E1, gerente técnico da Autoever).

“[...] um dos pontos mais importantes foi adaptar o sistema às rotinas dos operadores. Não adiantava impor uma lógica só de TI; precisávamos ouvir quem estava na linha” (T1, especialista em software).

“[...] agora consigo ver na tela se a produção está dentro da meta ou não. Isso ajuda a gente a se organizar melhor durante o turno” (O5, operador de máquina)

Eixo 9: Validação e *feedback*

“[...] foi essencial ouvir o time do chão de fábrica. As telas e relatórios que temos hoje nasceram de várias sugestões que eles mesmos trouxeram” (E2, gerente de produção).

“[...] recebemos relatórios e comentários dos operadores quase toda semana no início. Isso foi muito útil para ajustar dashboards e melhorar a precisão dos indicadores” (T3, analista de processos da estamparia).

“[...] a gente dava sugestões nas reuniões de turno, e depois de algumas semanas já via mudanças na tela. Isso mostrava que nossa opinião era levada em conta” (O1, líder de grupo da produção).

Eixo 10: Maturidade Pós-Projeto

“[...] agora temos muito mais segurança para tomar decisões rápidas. Antes esperávamos relatórios no dia seguinte, hoje as informações já estão na tela em tempo real” (E2, gerente de produção).

“[...] no início, o sistema era usado apenas para monitorar dados. Agora já fazemos previsões e conseguimos antecipar problemas de produção. Isso mostra maturidade maior” (T2, especialista expatriado – Autoever).

“[...] não usamos mais planilhas manuais. O sistema dá o status de estoque e ritmo de produção na hora, isso facilita muito a rotina” (O2, líder de chão de fábrica).

Eixo 11: Recomendações Finais

“[...] para outras áreas, o segredo é começar pequeno, com projetos-piloto bem definidos, antes de expandir. Isso reduz riscos e aumenta a confiança da equipe” (E2, gerente de produção).

“[...] não adianta pensar só em tecnologia, é preciso padronizar processos e criar disciplina no uso do sistema. Sem isso, o ganho não se sustenta” (T2, especialista expatriado – Autoever).

“[...] quanto mais simples for a interface, melhor. Se complicar, a gente perde tempo tentando achar o que precisa” (O5, operador de máquina).

- Análise dos resultados das entrevistas comparados a literatura

Os relatos obtidos nas entrevistas evidenciam um percurso que confirma, em grande medida, as etapas de evolução da maturidade digital descritas por Schuh et al. (2020).

A fase inicial, marcada pela ausência de dados consolidados e pela dependência de registros manuais, corresponde ao estágio de visibilidade limitada, no qual as decisões são reativas e pouco fundamentadas em informações confiáveis.

A dificuldade relatada pelos gestores e operadores em compreender o desempenho do processo produtivo em tempo real reforça essa interpretação, indicando que, sem sistemas integrados, a organização permanece em patamar reduzido de maturidade digital.

O avanço observado com a adoção de dispositivos conectados, citado especialmente pelo grupo técnico, converge com o que descrevem Bueno et al. (2020) ao tratarem da importância da coleta em tempo real para reduzir erros manuais e aumentar a confiabilidade dos registros. Essa mesma linha é reforçada por Jaskó et al. (2020), que apontam a integração de dispositivos digitais como base para conectar o chão de fábrica aos sistemas de gestão e garantir rastreabilidade.

O uso de sensores integrados aos controladores, relatado por engenheiros e operadores, traduz-se na criação de uma infraestrutura que sustenta não apenas o monitoramento imediato, mas também a análise posterior dos processos. Esse movimento encontra respaldo em Castaño et al. (2019), que enfatizam o papel dos sistemas CPS no monitoramento contínuo e no ajuste automático de parâmetros.

A integração entre sistemas de produção, manutenção e qualidade, apontada como conquista relevante, corresponde ao avanço descrito por Ferrari et al. (2021), ao tratarem da interligação entre MES e ERP como fator determinante para decisões mais rápidas e fundamentadas. Nas entrevistas, ficou evidente que a utilidade prática dessa integração só foi reconhecida quando os dados passaram a simplificar rotinas que anteriormente eram feitas de forma manual.

Na área da qualidade, a captura de dados em tempo real e a atuação dos CPS foram apontadas como avanços que reduziram retrabalho e aumentaram a velocidade na tomada de decisão. Esse resultado confirma o argumento de Möhring et al. (2020), segundo o qual os CPS permitem integrar monitoramento e controle imediato em operações fabris. De modo semelhante, Ikumapayi et al. (2024) discutem como a associação entre IoT, big data e CPS possibilita a redução de defeitos e a sustentabilidade da produção, aspectos que dialogam com os ganhos relatados na estamparia.

A menção recorrente à rastreabilidade e ao replanejamento dinâmico reforça a relevância da coleta em tempo real para o estoque e o planejamento da

produção. O acompanhamento instantâneo de blanks, bobinas e peças em reparo está em sintonia com Wang et al. (2018), que demonstraram como sensores IoT reduziram o tempo de inserção de dados em inventários, tornando o planejamento mais preciso. Essa relação também se confirma em Upadhyay et al. (2023), que apontam a visibilidade contínua como alicerce para cadeias produtivas sustentáveis.

As dificuldades relatadas pelos entrevistados alinham-se aos obstáculos discutidos por Veile et al. (2020). O estudo desses autores destaca que a presença de máquinas legadas, limitações de infraestrutura e barreiras culturais são fatores que retardam o avanço da maturidade digital. Essa análise se confirma nos depoimentos dos operadores, que demonstraram preocupação de que o sistema fosse utilizado como mecanismo de controle excessivo sobre o ritmo de trabalho.

A maturidade pós-projeto, caracterizada pela substituição de planilhas manuais por dashboards, pela antecipação de problemas e pela maior confiança nas decisões, corresponde à evolução prevista por Schuh et al. (2020) nos estágios superiores do modelo de maturidade.

Já a ênfase dos entrevistados em recomendações como iniciar com projetos-piloto, padronizar processos e simplificar interfaces dialoga com a análise de Oludapo *et al.*, (2024), que destacam a importância da clareza estratégica e da usabilidade para evitar falhas em projetos associados à adoção da I4.0.

Em síntese, os resultados das entrevistas mostram convergência com a literatura revisada. A aplicação de tecnologias habilitadoras da I4.0 contribuiu diretamente para a eficiência operacional da estamparia automotiva.

As evidências reforçam as hipóteses do estudo e indicam que o avanço da I4.0 depende da combinação entre infraestrutura tecnológica, alinhamento organizacional e participação ativa dos operadores.

4.3.4 Nova medição da maturidade digital

A segunda avaliação da maturidade digital da estamparia foi conduzida a partir dos resultados consolidados da pesquisa-ação. Para esta etapa, foram considerados três pilares metodológicos: a observação participante associada à análise documental, o questionário aplicado a 75 respondentes e as entrevistas realizadas com 12 profissionais dos grupos estratégico, técnico e operacional. Cada instrumento gerou evidências específicas, que foram posteriormente trianguladas para ampliar a confiabilidade da análise e reduzir possíveis vieses.

A avaliação foi estruturada segundo as quatro dimensões propostas por Schuh et al. (2020): recursos, sistemas de informação, estrutura organizacional e cultura organizacional. Em cada dimensão, os resultados obtidos pelos três pilares foram examinados de forma articulada, permitindo identificar avanços em relação à medição anterior, bem como a permanência de limitações ainda presentes.

Esse procedimento possibilitou compreender o estágio atual de maturidade digital da estamparia e a maneira como diferentes atores percebem e validam a transformação em curso. Nos tópicos seguintes, cada dimensão é apresentada individualmente, contemplando a análise documental e observacional, os resultados do questionário e as percepções qualitativas das entrevistas, seguidas da triangulação que fundamenta a conclusão sobre o novo nível de maturidade alcançado.

4.3.4.1 Avaliação da maturidade digital: Observação participante e análise documental

A análise da maturidade digital a partir da observação participante e da documentação interna mostrou que a digitalização alterou significativamente a forma de coleta, organização e uso das informações na estamparia. A comparação entre os métodos anteriores e os processos atualmente estruturados em sistemas integrados permitiu avaliar os efeitos em cada uma das quatro dimensões propostas por Schuh et al. (2020).

- **Recursos**

A substituição de registros manuais por dispositivos digitais marcou um avanço relevante. A coleta de dados passou a ser feita com PDAs equipados para leitura de QR Codes, enquanto eventos de qualidade são registrados em tablets com interfaces estruturadas. O uso desses recursos tecnológicos ampliou a precisão e assegurou atualização em tempo real das variáveis operacionais.

- **Sistemas de informação**

A integração entre MES e ERP eliminou redundâncias e assegurou consistência dos registros. Dashboards digitais passaram a concentrar dados de produção, qualidade e inventário, garantindo rastreabilidade e padronização. Esse

cenário contrasta com o modelo anterior, baseado em planilhas fragmentadas e suscetíveis a erros de transcrição.

- Estrutura organizacional

O fluxo de informações deixou de depender de transcrições sucessivas e de checagens verbais para se apoiar em registros automáticos. O planejamento da produção, que demandava cerca de nove horas diárias, passou a ser atualizado dinamicamente a partir da disponibilidade real de materiais e ferramentas. Essa reorganização fortaleceu a coordenação entre setores e reduziu gargalos de comunicação.

- Cultura organizacional

O uso de campos obrigatórios e de codificação visual em dashboards induziu maior disciplina nos registros e ampliou a transparência do processo produtivo. A observação direta mostrou que os operadores assumiram maior responsabilidade pela qualidade das informações, sinalizando uma mudança gradual na mentalidade digital e no engajamento com os sistemas integrados.

4.3.4.2 Avaliação da maturidade: resultado do questionário aos usuários

A aplicação do questionário aos colaboradores permitiu avaliar a percepção da equipe em relação às mudanças decorrentes da digitalização. Com 75 respondentes, abrangendo operadores, líderes e profissionais administrativos, os resultados revelaram como os diferentes grupos vivenciaram a transição para sistemas digitais de coleta e análise de dados. A análise foi estruturada segundo as quatro dimensões propostas por Schuh et al. (2020), considerando os aspectos técnicos e organizacionais captados no instrumento.

- Recursos

As questões relativas ao acesso às informações de produção (Q1 e Q2) indicaram que a maioria dos respondentes percebeu ganhos de precisão e confiabilidade com o uso de tablets, PDAs e kiosques digitais. Mais de 80% concordaram que a coleta se tornou mais ágil e consistente, confirmando a eficácia dos novos dispositivos. A percepção reforça que a infraestrutura tecnológica instalada

atende às demandas operacionais, reduzindo a dependência de formulários manuais e planilhas.

- Sistemas de informação

As respostas às Q3, Q4, Q6 e Q7 destacaram melhorias na identificação de problemas, na disponibilidade de dados em tempo real e na redução de retrabalho. Em todas essas questões, o índice de concordância superou 70%, demonstrando que a integração MES–ERP passou a ser reconhecida pelos usuários como fonte de dados confiável. A usabilidade das ferramentas (Q9) também foi considerada adequada pela maior parte dos participantes, embora cerca de 17% tenham relatado dificuldades, sinalizando necessidade de reforço em treinamento e suporte.

- Estrutura organizacional

Questões relacionadas à tomada de decisão (Q8) e à comunicação entre setores (Q5) revelaram percepção positiva, com mais de 70% dos respondentes concordando que as mudanças favoreceram maior agilidade e clareza nos fluxos de trabalho. A presença de respostas neutras em parte das questões sugere, contudo, que nem todos os setores experimentaram os mesmos ganhos, possivelmente em função de diferenças entre turnos ou funções. Ainda assim, a reorganização dos fluxos de informação aparece como um avanço reconhecido pelos usuários.

- Cultura organizacional

A análise das Q10, Q11 e Q12 mostrou que a maioria dos colaboradores se sente confortável no uso das novas ferramentas e percebe benefícios diretos na rotina de trabalho. O termo mais citado nas respostas abertas para benefícios foi “Rapidez”, seguido de “Eficiência” e “Acesso fácil”, confirmando que a digitalização é vista como elemento facilitador. Por outro lado, termos como “Aprendizado” e “Adaptação” indicam que a mudança também trouxe desafios, reforçando a necessidade de ações contínuas de capacitação para consolidar a cultura digital. O resultado do NPS, com 28 pontos, mostra prevalência de promotores, mas também a existência de passivos e detratores, o que evidencia espaço para aprimoramento da adesão cultural.

4.3.4.3 Avaliação da Maturidade: Resultado das entrevistas

As entrevistas realizadas com representantes dos grupos estratégico, técnico e operacional forneceram uma visão detalhada sobre como as iniciativas da I4.0 foram percebidas nos diferentes níveis da estamperia. A diversidade de perfis contemplou desde gestores e engenheiros responsáveis pelo desenho das soluções até operadores que vivenciaram a aplicação prática no chão de fábrica. Essa pluralidade permitiu avaliar os efeitos da digitalização a partir das quatro dimensões propostas por Schuh et al. (2020) no modelo de maturidade digital.

- Recursos

Os relatos apontaram avanços significativos na disponibilidade de equipamentos e dispositivos digitais. O grupo técnico destacou a instalação de sensores de ciclo, presença e contagem, conectados aos controladores lógicos programáveis, garantindo coleta automática e contínua dos dados. Operadores relataram que tablets e painéis passaram a exibir em tempo real o status das máquinas e a quantidade produzida, substituindo o uso de formulários e planilhas manuais. Essa mudança reforçou a confiabilidade das informações e reduziu o tempo gasto em registros repetitivos.

- Sistemas de informação

Gestores e especialistas técnicos ressaltaram a importância da integração entre MES, ERP e sistemas de qualidade. Essa interligação eliminou a necessidade de consolidação manual e passou a disponibilizar relatórios automáticos e alertas de anomalias. O grupo operacional reconheceu o benefício dessa integração ao acessar diretamente as informações em dashboards, que agora permitem identificar falhas de máquina ou de material de forma imediata. Os relatos confirmam que a estamperia avançou do uso isolado de sistemas para uma estrutura integrada, na qual os dados circulam entre diferentes áreas em tempo real.

- Estrutura organizacional

A reorganização dos processos foi evidenciada nos depoimentos dos três grupos. Antes da digitalização, a dependência de relatórios impressos e comunicação verbal gerava atrasos na tomada de decisão. Com a adoção de fluxos digitais, o

planejamento de produção e a gestão da qualidade passaram a ser conduzidos em plataformas únicas, reduzindo gargalos e assegurando maior coordenação entre áreas. O grupo estratégico ressaltou a confiabilidade dos indicadores para decisões táticas, enquanto os operadores relataram maior autonomia no acompanhamento de metas diárias, o que evidencia um alinhamento mais consistente entre níveis hierárquicos.

- Cultura organizacional

Os relatos também destacaram mudanças no comportamento e na mentalidade dos colaboradores. Inicialmente, parte dos operadores demonstrou resistência, receando que os sistemas fossem usados para controle do ritmo de trabalho. Com o tempo, a aceitação aumentou à medida que os ganhos práticos se tornaram visíveis, como a redução de registros manuais e a agilidade para resolver problemas. O ciclo de feedback, citado de forma recorrente, consolidou a percepção de que a participação dos usuários foi valorizada, já que sugestões resultaram em melhorias efetivas nas interfaces e nos relatórios. Essa prática fortaleceu a confiança no sistema e promoveu maior engajamento com a digitalização.

4.3.4.4 Consolidação da nova medição de maturidade digital

A triangulação dos dados obtidos a partir da observação participante com análise documental, do questionário aplicado aos colaboradores e das entrevistas com os grupos estratégico, técnico e operacional permitiu consolidar uma visão abrangente sobre a evolução da maturidade digital da estampa. O Quadro 30 sumariza os principais achados, estruturados nas quatro dimensões propostas por Schuh et al. (2020).

Quadro 30 - Sumario dos resultados da nova maturidade I4.0

Dimensão ACATECH Schuh et al. (2020).	Resultados		
	Observação Participante e análise documental	Questionário (75 respondentes)	Entrevistas (12 profissionais)
Recursos	Substituição de registros manuais por PDAs e tablets; sensores e leitura por QR Codes;	+80% confirmaram maior precisão e confiabilidade; dispositivos	Técnicos relataram uso de sensores e CLPs; operadores destacaram

(Continua)

	atualização em tempo real.	considerados ágeis e consistentes.	tablets/painéis em tempo real.
Sistema de informações	Integração MES–ERP eliminou redundâncias; dashboards centralizam dados de produção, qualidade e inventário.	>70% reconheceram melhorias na identificação de problemas e dados em tempo real; usabilidade positiva, mas 17% citaram dificuldades.	Gestores e técnicos apontaram integração entre MES, ERP e qualidade; operadores relataram acesso direto via dashboards.
Estrutura Organizacional	Planejamento passou a ser dinâmico; redução de nove horas diárias de trabalho para atualização de planos; maior coordenação entre setores.	>70% perceberam maior agilidade e clareza; parte neutra sugere ganhos desiguais entre setores/turnos.	Estratégico: confiabilidade dos indicadores; operadores: autonomia nas metas diárias; técnicos: redução de gargalos.
Cultura organizacional	Campos obrigatórios e codificação visual induziram disciplina; operadores assumiram maior responsabilidade.	Maioria confortável com novas ferramentas; termos citados: “rapidez”, “eficiência”, mas também “aprendizado” e “adaptação”; NPS 28 (prevalência de promotores, mas presença de detratores).	Inicial resistência dos operadores; aceitação após ganhos práticos; ciclo de feedback valorizado, gerando engajamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na dimensão Recursos, houve convergência dos três pilares metodológicos ao confirmar a ampliação da infraestrutura tecnológica. A substituição dos registros manuais por dispositivos digitais, a instalação de sensores e a integração com controladores lógicos programáveis resultaram em maior precisão e disponibilidade de dados em tempo real. Essa constatação dialoga com a literatura, que destaca a digitalização dos recursos físicos como passo inicial e fundamental para a construção de sistemas inteligentes na manufatura (Schuh et al., 2020).

Em relação aos Sistemas de informação, a análise documental evidenciou a integração entre MES e ERP, eliminando redundâncias e consolidando os dados em dashboards digitais. O questionário confirmou essa percepção, com mais de 70% dos respondentes reconhecendo melhorias na confiabilidade das informações e na usabilidade das ferramentas, embora parte dos usuários ainda reporte dificuldades.

As entrevistas reforçaram esses resultados ao apontar benefícios da integração em tempo real entre áreas de produção, qualidade e planejamento. Esses achados são consistentes com o que Veile et al. (2019) e Oztemel e Gursev (2020) descrevem como etapas centrais da I4.0, nas quais a integração de sistemas promove maior visibilidade e padronização dos fluxos de dados.

Na dimensão estrutura organizacional, a triangulação confirmou ganhos relevantes na coordenação entre setores. A observação direta mostrou que o tempo dedicado ao planejamento diário foi reduzido e passou a se apoiar em dados atualizados automaticamente. O questionário reforçou essa percepção ao apontar maior agilidade e clareza nos fluxos de trabalho, enquanto as entrevistas destacaram maior autonomia dos operadores e maior confiabilidade para decisões gerenciais. A literatura indica que a reorganização dos fluxos de informação a partir de plataformas digitais constitui um dos marcos da consolidação da I4.0, pois fortalece a cooperação interna e reduz gargalos decisórios (Ghobakhloo, 2018).

Por fim, a Cultura organizacional revelou um processo de transformação em andamento. A análise documental indicou maior disciplina no registro das informações, induzida por campos obrigatórios e codificação visual nos dashboards.

O questionário evidenciou que a maioria dos colaboradores se sente confortável com o uso das ferramentas digitais, embora ainda haja desafios relacionados à adaptação e à capacitação contínua, refletidos no NPS de 28 pontos.

As entrevistas demonstraram que a aceitação dos operadores evoluiu de uma resistência inicial para um engajamento progressivo, apoiado pela incorporação de feedbacks práticos no desenho das interfaces. A literatura reforça que a dimensão cultural representa um dos maiores desafios na transição digital, pois depende da confiança dos colaboradores e da assimilação de novas rotinas de trabalho (Frank et al., 2019).

De forma integrada, a triangulação mostra que a estamparia avançou de maneira consistente nas quatro dimensões do modelo de maturidade. Os resultados apontam que a organização superou o estágio de Computação (nível 1) e consolidou

o estágio de Visibilidade (nível 3), no qual os dados são coletados em tempo real, integrados em sistemas e disponibilizados em dashboards acessíveis a diferentes níveis hierárquicos. Além disso, há indícios iniciais de evolução em direção ao nível de Transparência (nível 4), sobretudo na medida em que os dados começam a ser contextualizados para apoiar decisões.

Esse diagnóstico, fundamentado no manual ACATECH (Schuh et al., 2020), indica que a maturidade digital da estamperia se encontra atualmente no nível 3, com progressos pontuais em direção ao nível 4.

5 CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido teve como propósito central avaliar de que maneira a aplicação estruturada das tecnologias da I4.0, em especial IoT, CPS e MÊS, poderiam revitalizar a eficiência operacional em uma estamparia automotiva, por meio de uma pesquisa-ação fundamentada no modelo de maturidade de Schuh et al. (2020).

O percurso metodológico seguiu ciclos de diagnóstico, intervenção e avaliação, permitindo a construção de evidências em diferentes frentes: observação participante associada à análise documental, aplicação de questionário a 75 respondentes e realização de entrevistas com 12 profissionais distribuídos entre os grupos estratégico, técnico e operacional.

A estamparia analisada apresentava um quadro inicial marcado por registros manuais, sistemas fragmentados e baixa integração entre áreas. Esse cenário comprometia a confiabilidade das informações, ampliava o tempo de resposta e dificultava a gestão de inventário, planejamento de produção e controle de qualidade. A pesquisa buscou enfrentar essas limitações a partir da introdução progressiva de soluções digitais e da mensuração de seu impacto na maturidade digital da unidade.

De acordo com a avaliação realizada com base no manual de Schuh et al., (2020), a estamparia evoluiu do estágio de Computação para o nível de Conectividade ao final do processo. O avanço foi mais perceptível nas dimensões Recursos e Sistemas de Informação, refletindo a integração de dados e o uso de informações em tempo real.

Já nas dimensões de Estrutura Organizacional e Cultura, embora tenham ocorrido progressos, os resultados indicam que ainda há necessidade de consolidação de práticas e de fortalecimento das competências digitais.

Essa evolução evidencia que as intervenções realizadas resultaram em um avanço mensurável no nível de maturidade digital da unidade analisada.

5.1 Alcance dos objetivos

O objetivo geral foi cumprido ao demonstrar que a introdução coordenada de IoT, CPS e MES contribuiu para ampliar a rastreabilidade, aumentar a

confiabilidade dos dados e oferecer suporte direto às decisões operacionais. Os objetivos específicos também foram atingidos:

- A IoT possibilitou a coleta e o controle contínuo de dados operacionais, com reflexos imediatos na visibilidade do processo e na redução da dependência de formulários manuais.
- Os CPS mostraram relevância no monitoramento de variáveis críticas, na integração entre máquinas e sistemas digitais e na rastreabilidade de eventos de produção, fortalecendo o controle de qualidade e a detecção de não conformidades.
- A integração via MES e a disponibilização de dados em tempo real contribuíram para maior acurácia na gestão de inventário e no replanejamento da produção, reduzindo atrasos e aumentando a confiabilidade do fluxo de materiais.
- Foram identificados obstáculos técnicos, organizacionais e culturais, destacando-se a necessidade de padronização de processos, os desafios de integração entre sistemas legados e novas soluções, bem como a resistência inicial de parte da equipe operacional.

5.2 Respostas às questões de pesquisa

A primeira questão buscava compreender como as tecnologias habilitadoras da I4.0 podem ser aplicadas para resolver problemas específicos de eficiência operacional.

Os resultados mostraram que a combinação de IoT e CPS contribuiu diretamente para reduzir falhas de comunicação, eliminar redundâncias e ampliar a rastreabilidade. A aplicação prática dessas tecnologias fortaleceu a base de dados utilizada para decisões de produção e manutenção, o que elevou a confiabilidade e reduziu perdas decorrentes de registros manuais inconsistentes.

A segunda questão investigava o papel dos dados em tempo real na gestão de inventário e planejamento de produção. A implantação de *dashboards* dedicados ao inventário de bobinas, *blanks* e peças em reparo, somada ao painel de programação da linha de blanks, evidenciou que o acesso imediato às informações

tornou o processo de planejamento mais dinâmico, reduziu desvios e facilitou ajustes de curto prazo.

Essa evolução foi reconhecida tanto por gestores quanto por operadores, confirmando a relevância da digitalização para melhorar a gestão de recursos.

A terceira questão examinava os principais desafios enfrentados pela estamperia na transição para a I4.0. As evidências apontaram barreiras técnicas relacionadas à integração entre sistemas heterogêneos, barreiras organizacionais associadas à coordenação entre áreas e aos fluxos de informação, além de barreiras culturais ligadas à adaptação dos trabalhadores a novos métodos de coleta e análise de dados. Essas dificuldades reforçaram a necessidade de alinhar o avanço tecnológico a programas de capacitação e estratégias de mudança organizacional.

5.3 Verificação das hipóteses

As hipóteses formuladas no início da pesquisa foram examinadas à luz dos resultados obtidos ao longo da investigação. A primeira hipótese, que associava a baixa maturidade digital da estamperia à ausência de integração entre sistemas de gestão e processos operacionais, foi confirmada. O diagnóstico inicial evidenciou falhas significativas na comunicação entre áreas e na consistência dos registros, o que se mostrou determinante para os problemas de confiabilidade e rastreabilidade identificados.

A segunda hipótese, que defendia que a adoção coordenada de IoT, CPS e MES contribuiria para a melhoria da confiabilidade dos dados e da rastreabilidade dos processos, também foi corroborada. A implantação das tecnologias permitiu ampliar a consistência das informações coletadas e assegurar o acompanhamento em tempo real dos eventos produtivos, fortalecendo os mecanismos de controle e de análise.

Por fim, a terceira hipóteses, conforme a disponibilidade de dados em tempo real favoreceria decisões operacionais mais ágeis e precisas, foi igualmente confirmada. Os dashboards implementados ampliaram a visibilidade sobre inventário e produção, reduziram falhas de planejamento e possibilitaram maior rapidez na resposta a desvios, evidenciando ganhos concretos em termos de agilidade e confiabilidade operacional.

5.4 Considerações finais

A pesquisa indicou que o avanço da I4.0 em uma estamparia automotiva requer uma abordagem integrada que considere recursos técnicos, sistemas de informação, estrutura organizacional e aspectos culturais. A maturidade digital avançou de forma mensurável com a introdução das tecnologias e com o uso de ciclos de pesquisa-ação, o que evidencia que ganhos de eficiência só se consolidam quando tecnologia, gestão e pessoas são tratadas de maneira conjunta.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo contribui ao oferecer evidências empíricas sobre a aplicação da I4.0 em um setor industrial tradicional, utilizando a pesquisa-ação como instrumento metodológico para associar diagnóstico, intervenção prática e avaliação. Do ponto de vista prático, a pesquisa apresenta um modelo técnico-organizacional capaz de orientar empresas do setor automotivo em etapas iniciais ou intermediárias de sua jornada de digitalização, com recomendações claras sobre uso de IoT, CPS e MES, além de gestão da mudança organizacional.

Entre as limitações, destaca-se a análise concentrada em uma única unidade fabril e a impossibilidade de avaliar plenamente os efeitos de longo prazo das iniciativas implantadas. Pesquisas futuras podem expandir a abordagem para outras áreas de manufatura, integrar indicadores financeiros e ambientais e analisar a sustentabilidade das práticas digitais no horizonte de médio e longo prazo.

Conclui-se que a digitalização, quando conduzida de maneira planejada e apoiada em metodologias participativas, constitui caminho consistente para elevar a eficiência operacional da estamparia e consolidar avanços em direção à I4.0.

REFERÊNCIAS

- ADMAS, W. S.; MUNAYE, Y. Y.; DIRO, A. A. Cyber security: state of the art, challenges and future directions. **Cyber Security and Applications**, Amsterdam, v. 2, p. 1-9, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csa.2023.100031>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- AGEED, Z. S. *et al.* A comprehensive survey of big data mining approaches in cloud systems. **Qubahan Academic Journal**, Iraque, v. 1, n. 2, p. 29-38, abr.2021. Disponível em: <http://www.journal.qubahan.com/index.php/qaj/article/view/46/30>. Acesso em: 12 out. 2025.
- ALZUBAIDI, L. *et al.* Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. **Journal of Big Data**, Londres, v. 8, n. 53, p. 1-74, mar. 2021. Disponível em: <http://www.pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8010506/>. Acesso em: 12 out. 2025.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da indústria automobilística brasileira 2024**. São Paulo: ANFAVEA, 2024. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wpcontent/uploads/2024/05/anfavea-anuario-digital-2024-novoatualizadoalta_compressed.pdf. Acesso em: 24 ago.2024.
- AWASTHI, A.; SAXENA, K. K.; ARUN, V. Sustainable and smart metal forming manufacturing process. **Materials Today Proceedings**, Berlim, v. 44, n. 1, p. 2069-2079, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.177>. Acesso em: 12 out. 2025.
- BALASHOV, V. M. *et al.* Improvement of operational management of innovative production processes-based on the implementation of MES. **Problems and Perspectives in Management**, Ucrânia, v. 16, n. 4, p. 1-12, out. 2018. Disponível em: [researchgate.net/publication/328148608_Improvement_of_operational_management_of_innovative_production_processes_based_on_the_implementation_of_MES](https://www.researchgate.net/publication/328148608_Improvement_of_operational_management_of_innovative_production_processes_based_on_the_implementation_of_MES). Acesso em: 12 out. 2025.
- BASRI, A. Q. *et al.* SMED Simulation in optimising the operating output of tandem press line in the automotive industry using Witness Software. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, Pahang, v. 18, n. 3, p. 8895-8906, set. 2021. Disponível em: <http://www.journal.ump.edu.my/ijame/article/view/6513/1509>. Acesso em: 12 out.2025.
- BHAT, S. *et al.* Lean Six Sigma competitiveness for micro, small and medium enterprises (MSME): action research in the Indian context. **TQM Journal**, Leeds-Inglaterra, v. 33, n. 2, p. 379-406, 9 fev. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343655439_Lean_Six_Sigma_competitiveness_for_micro_small_and_medium_enterprises_MSME_an_action_research_in_the_Indian_context. Acesso em: 12 out. 2025.

BORANGIU, T. *et al.* Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. **Computers in Industry**, Gangtok, v. 108, s.n., p. 150-162, jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361519300107>. Acesso em: 12 out. 2025.

BORANGIU, T. *et al.* Digital transformation of manufacturing. Industry of the future with cyber-physical production systems. **Romanian Journal of Information Science and Technology**, Bucureste, v.23, n.1, p.3-37, 2020. Disponível em: <https://www.romjist.ro/full-texts/paper635.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRUNO, G.; LOMBARDI, F.; ORLANDO, M. Implementation and evaluation of MES in one-of-a-kind production. **International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics**. Torino, p. 117-123, jan. 2020. Disponível em: https://researchgate.net/publication/346824576_Implementation_and_Evaluation_of_MES_in_One-of-a-Kind_Production. DOI: 10.5220/0010173601170123. Acesso em: 12 out. 2025.

BUENO, A.; GODINHO FILHO, M.; FRANK, A. G. Smart production planning and control in the industry 4.0 context: a systematic literature review. **Computers and Industrial Engineering**, Elmsford, NY, v. 149, p. 106774, nov. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343846496_Smart_Production_Planning_and_Control_in_the_Industry_40_context_A_systematic_literature_review. DOI:10.1016/j.cie.2020.106774. Acesso em: 12 out. 2025.

CAÑAS, H. *et al.* A conceptual framework for smart production planning and control in Industry 4.0. **Computers and Industrial Engineering**, Elmsford, NY, v. 173, p. 1-12, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108659>. Acesso em: 06 set. 2025.

CASTAÑO, F. *et al.* Sensor reliability in cyber-physical systems using internet-of-things data: a review and case study. **Remote Sensing**, Basel-Suíça, v. 11, n. 19, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11192252>. Acesso em: 12 out. 2025.

CAVONE, G. *et al.* MPC based process control of deep drawing: an industry 4.0 case study in automotive. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, Nova Iorque, v. 19, n. 3, p. 1-13, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3177362>. Acesso em: 12 out. 2025.

CLAUSEN, P.; MATHIASSEN, J. B.; NIELSEN, J. S. Smart manufacturing through digital shop floor management boards. **Wireless Personal Communications**, Dordrecht, Holanda, v. 115, n. 2, p. 3261-3274, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07379-y>. Acesso em: 06 out. 2025.

COLANGELO, E. *et al.* Maturity model for AI in smart production planning and Control System. *In: CIRP CONFERENCE ON MANUFACTURING SYSTEMS*, 55, 2022, Budapeste. **Anais [...]**. Budapeste: Elsevier, 2022, v. 107, p. 493-498. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122002980>. Acesso em: 12 out. 2025.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations and Production Management**, Bradford, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/01443570210417515>. Acesso em: 06 out. 2025.

DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v. 133, p. 285-296, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>. Acesso em: 12 out. 2025.

DUTTA, G. *et al.* Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Berlim, v. 32, n. 6, p. 1679-1698, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01783-2>. Acesso em: 12 out. 2025.

ERIKSSON, K. M.; CARLSSON, L.; OLSSON, A. K. To digitalize or not? Navigating and merging human- and technology perspectives in production planning and control. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlim, v. 122, n. 8, p. 4365-4373, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09874-x>. Acesso em: 12 out. 2025.

FERRARI, A. M. *et al.* Dynamic life cycle assessment (LCA) integrating life cycle inventory (LCI) and enterprise resource planning (ERP) in an industry 4.0 environment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 286, n. 8, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125314>. Acesso em: 12 out. 2025.

FIESC - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Indústria 4.0 tem menor custo e mais eficiência e produtividade**. Florianópolis: [s.n.], mar. 2022. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/industria-40-tem-menor-custo-e-mais-eficiencia-e-produtividade>. Acesso em: 7 out. 2024.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 210, n. 3, p. 15-26, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>. Acesso em: 12 out. 2025.

FULLER, A. *et al.* Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. **IEEE Access**, Nova Jersey, v. 8, p. 108952-108971, ago. 2020. Disponível em: <https://www.arxiv.org/pdf/1911.01276>. Acesso em: 12 out. 2025.

GHADGE, A. *et al.* The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Leeds-Inglaterra, v. 31, n. 4, p. 669-686, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>. Acesso em: 12 out. 2025.

GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 252, n. 1, p. 119869, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>. Acesso em: 12 out. 2015.

GROOSS, O. F. Digitalization of maintenance activities in small and medium-sized enterprises: a conceptual framework. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 154, n. 4, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104039>. Acesso em: 12 out. 2025.

HASEEB, M. *et al.* Industry 4.0: A solution to technology challenges of sustainable business performance. **Social Sciences**, Basileia-Suíça, v. 8, n. 5, mai. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/socsci8050154>. Acesso em: 06 out. 2025.

HAVINGA, J.; MANDAL, P. K.; BOOGAARD, T. V. Exploiting data in smart factories: real-time state estimation and model improvement in metal forming mass production. **International Journal of Material Forming**, Paris, v. 13, n. 3, p. 663-673. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01495-2>. Acesso em: 06 out. 2025.

HOPKINS, J. L. An investigation into emerging industry 4.0 technologies as drivers of supply chain innovation in Australia. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 125, n. 103323, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103323>. Acesso em: 06 out. 2025.

HU, J. Augmented-reality based brain-computer interface of robot control. **Heliyon**, Londres, v. 10, n. 5, p. 26255, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26255>. Acesso em: 06 out. 2025.

IKUMAPAYI, O. M.; LASEINDE, O. T.; AKINLABI, E. T. Roles of IoT, big data analytics and cyber-physical systems in sustainable manufacturing. **E3S Web of Conferences**, Les Ulis, França, v. 552, n. 01046, jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201046>. Acesso em: 12 out. 2025.

ISA - INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ANSI/ISA-95.00.01**: Enterprise: Control System Integration: Part 1: Models and Terminology. North Carolina: ISA, 2010.

JABBAR, S. *et al.* Blockchain-enabled supply chain: analysis, challenges, and future directions. **Multimedia Systems**, Nova Iorque, v. 27, n. 4, p. 787-806, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00530-020-00687-0>. Acesso em: 1 ago. 2021.

JANCZEWSKI, J. Reverse logistics from the perspective of the circular economy. **Zarządzanie Innowacyjne W Gospodarce I Biznesie**, Łódź-Polónia, v. 1, n. 28, p. 143-155, dez. 2019. Disponível em: http://www.ziwgib.ahe.lodz.pl/en/system/files/ZI-wGiB28_10%20JANCZEWSKI%20Reverse%20logistics.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

JANG, I.; BAE, G.; KIM, H.. Metal forming defect detection method based on recurrence quantification analysis of time-series load signal measured by real-time monitoring system with bolt-type piezoelectric sensor. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Londres, v.180, n. 3, p. 109457, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109457>. Acesso em: 10 out. 2025.

JASKÓ, S. *et al.* Development of manufacturing execution systems in accordance with industry 4.0 requirements: a review of standard- and ontology-based methodologies and tools. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 123, n. 103300, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103300>. Acesso em: 12 out. 2025.

JAVAID, M. *et al.* Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. **Cognitive Robotics**, Beijing, v. 1, p. 58-75, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2021.06.001>. Acesso em: 12 out. 2025.

KERN, M. *et al.* A logging maturity and decision model for the selection of intrusion detection cyber security solutions. **Computers and Security**, Amsterdam, v. 141, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103844>. Acesso em: 12 out. 2025.

KHAN, W. Z. *et al.* Industrial internet of things: recent advances, enabling technologies and open challenges. **Computers and Electrical Engineering**, Amsterdam, v. 81, n. 2, nov.2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>. Acesso em: 12 out. 2025.

KIM, M.; LIM, C.; HSUAN, J. From technology enablers to circular economy: data-driven understanding of the overview of servitization and product-service systems in Industry 4.0. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 148, n. 12, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103908>. Acesso em: 12 out. 2025.

KONSTANTINIDIS, F. K.; MOUROUTSOS, S. G.; GASTERATOS, A. The role of machine vision in industry 4.0: an automotive manufacturing perspective. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGING SYSTEMS AND TECHNIQUES (IST), 2021, Kaohsiung. **Proceedings [...]**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., ago. 2021. p. 1 - 6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IST50367.2021.9651453>. Acesso em: 12 out. 2025.

KUMAR, D. *et al.* Applications of the internet of things for optimizing warehousing and logistics operations: a systematic literature review and future research directions. **Computers and Industrial Engineering**, Elmsford, NY, v. 171, n.1, set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108455>. Acesso em: 12 out. 2025.

KUMAR, N.; KUMAR, G.; SINGH, R. K. Big data analytics application for sustainable manufacturing operations: analysis of strategic factors. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Berlim, v. 23, n. 3, p. 965-989, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-02008-5>. Acesso em: 12 out. 2025.

KUMAR, V.; SHANKAR, R.; VRAT, P. An analysis of industry 4.0 implementation-variables by using SAP-LAP and e-IRP approach. **Benchmarking an International Journal**, West Yorkshire, v. 29, n. 5, p. 1606-1639, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2021-0153>. Acesso em: 12 out. 2025.

LEI, Z.; WANG, D. Digital transformation and total factor productivity: empirical evidence from China. **PLoS ONE**, Cagliari-Itália, v. 18, n. 10, out. 2023. Disponível

- em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292972>. Acesso em 12 out. 2025.
- LIETZ, P. Research into questionnaire design: a summary of the literature. **International Journal of Market Research**, Reino Unido, v. 52, n. 2, p. 249-272, mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2501/S147078530920120X>. Acesso em: 12 out. 2025.
- LLOPIS-ALBERT, C.; RUBIO, F.; VALERO, F. Impact of digital transformation on the automotive industry. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 162, jan. 2021. Disponível em: DOI:10.1016/j.techfore.2020.120343. Acesso em: 12 out. 2025.
- LO, C. M.; LIN, T. Y. Automated optical inspection based on synthetic mechanisms combining deep learning and machine learning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Amsterdam, v. 36, n.7, p. 4769-4783, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02474-4>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MAHMOUD, M. I. *et al.* Production operation management using Manufacturing Execution Systems (MES). In: INTERNATIONAL COMPUTER ENGINEERING CONFERENCE (ICENCO), 11., 2015, Gizé. **Anais [...]**. Gizé-Egito, dez. 2015. p. 111-116. Disponível em: <http://www.doi.org/10.1109/ICENCO.2015.7416334>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MAHMUD, B. Internet of things (IoT) for manufacturing logistics on SAP ERP applications. **Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)**, Malásia, v. 9, n.2-6, p. 43-47, 2017. Disponível em: <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/2432>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MARIANI, M. M.; MACHADO, I.; NAMBIAN, S. Types of innovation and artificial intelligence: a systematic quantitative literature review and research agenda. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v. 155, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113364>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MASHAYEKHY, Y. *et al.* Impact of Internet of Things (IoT) on inventory management: a literature survey. **Logistics (MDPI)**, Basel, v. 6, n. 2, p. 33, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/logistics6020033>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MODAD, O. A. A., Revolutionizing sheet metal stamping through industry 5.0 digital twins: a comprehensive review. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Amsterdam, v. 36, n. 6, p. 3717-3739, ago. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02453-9>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. **Revista Espanola de Nutricion Humana y Dietetica**, Navarra-Espanha, v. 20, n. 2, p. 148-160, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>. Acesso em: 12 out. 2025.
- MÖHRING, H. C.; WERKLE, K.; MAIER, W. Process monitoring with a cyber- physical cutting tool. **Engineering, Computer Science. Procedia CIRP**, Amsterdam, v.

93, n. 2, p. 1466-1471, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.034>. Acesso em: 12 out. 2025.

NAKANO, D. N.; MUNIZ JR., J. Writing the literature review for empirical papers. **Production**, Los Angeles, v. 28, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20170086>. Acesso em 12 out. 2025.

NEVES, J. M. S. DAS *et al.* Deployment the MES (Manufacturing Execution System) aiming to improve competitive priorities of manufacturing. **Independent Journal of Management & Production**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 449-463, jun. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.14807/ijmp.v6i2.233>. Acesso em: 12 out. 2025.

OLSEN, T. L.; TOMLIN, B. Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management. **Manufacturing and Service Operations Management**, Maryland, v. 22, n. 1, p. 113-122, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0796>. Acesso em: 12 out. 2025.

OLUDAPO, S.; CARROLL, N.; HELFERT, M. Why do so many digital transformations fail? a bibliometric analysis and future research agenda. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v.174, n. 114528, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114528>. Acesso em: 12 out. 2025.

O'NEILL, M.; MORGAN, J.; BURKE, K. Process visualization of manufacturing execution system (MES) data. In: SMARTWORLD, UBIQUITOUS INTELLIGENCE AND COMPUTING, ADVANCED AND TRUSTED COMPUTING, SCALABLE COMPUTING AND COMMUNICATIONS, INTERNET OF PEOPLE, AND SMART CITY INNOVATIONS, SMARTWORLD/SCALCOM/UIC/ATC/IOP/SCI, 2021, Atlanta. **Proceedings [...]**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. p. 659-664. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SWC50871.2021.00098>. Acesso em: 12 out. 2025.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Helderberg, v. 31, n. 4, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>. Acesso em: 12 out. 2025.

PSAROMMATIS, F. *et al.* Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper. **International Journal of Production Research**, Pensilvânia, v. 60, n. 1, p. 73-91, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551>. Acesso em 12 out. 2025.

RYALAT, M.; ELMOAQET, H.; ALFAOURI, M. Design of a smart factory based on cyber-physical systems and internet of things towards industry 4.0. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 13, n. 4, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13042156>. Acesso em: 12 out. 2025.

SANTOS, R. C.; MARTINHO, J. L. An industry 4.0 maturity model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Leeds, v. 31, n. 5, p. 1023-1043, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/jmtm-09-2018-0284>. Acesso em: 12 out. 2025.

SCHUH, G. *et al.* **Industrie 4.0 maturity index**: managing the digital transformation of companies UPDATE 2020. Munich: Acatech – National Academy of Science and Engineering, abr. 2020. Disponível em: <http://www.acatech.de/publikationen>. Acesso em: 20 set. 2024.

SIDDAWAY, A. P.; WOOD, A. M.; HEDGES, L. V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. **Annual Review of Psychology**, v. 70, n. 1, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>. Acesso em: 12 out. 2025.

SILVA, F. *et al.* Entrevista como técnica de pesquisa qualitativa. **Online Brazilian Journal of Nursing**, Niterói, v. 5, n. 2, p. 246-257, 2006. Disponível em: <http://www.redalyc.org/pdf/3614/361453972028.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

SIMEONE, A.; DENG, B.; CAGGIANO, A. Resource efficiency enhancement in sheet metal cutting industrial networks through cloud manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Reino Unido, v. 107, n.3-4, p.1345-1365, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06389-1>. Acesso em: 12 out. 2025.

SINGH, M.; GOYAT, R.; PANWAR, R. Fundamental pillars for industry 4.0 development: implementation framework and challenges in manufacturing environment. **TQM Journal**, Leeds, v. 36, n. 1, p. 88-309, abr.2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/tqm-07-2022-0231>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SOORI, M.; AREZOO, B.; DASTRES, R. Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. **Internet of Things and Cyber-Physical Systems**, s. n., abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>. Acesso em: 12 out. 2025.

SUNDER M, V.; PRASHAR, A. The interplay of lean practices and digitalization on organizational learning systems and operational performance. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 270, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109192>. Acesso em: 12 out. 2025.

TADDEI, E. *et al.* Circular supply chains in the era of industry 4.0: a systematic literature review. **Computers and Industrial Engineering**, Nova Iorque, v. 170, s.n., mai. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108268>. Acesso em: 12 out. 2025.

TAO, F. *et al.* Digital twins and cyber_physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: correlation and comparison. **Engineering**, Leeds, v. 5, n. 4, p. 653-661, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>. Acesso em: 12 out. 2025.

TEIXEIRA, P. *et al.* Connecting lean and green with sustainability towards a conceptual model. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 322, n.4, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129047>. Acesso em: 12 out. 2025.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. Sao Paulo: Cortez Editora, 2022.

TIAN, M. *et al.* The role of digital transformation practices in the operations improvement in manufacturing firms: a practice-based view. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 262, n.7, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108929>. Acesso em: 12 out. 2024.

TORTORELLA, G. L.; GIGLIO, R.; VAN DUN, D. H. Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement. **International Journal of Operations and Production Management**, West Yorkshire, v. 39, n. 6-8, p. 860-886, nov.2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2019-0005>. Acesso em: 12 out. 2025.

TULI, N. T.; KHATUN, S.; RASHID, A. B. Unlocking the future of precision manufacturing: a comprehensive exploration of 3D printing with fiber-reinforced composites in aerospace, automotive, medical, and consumer industries. **Heliyon**, Londres, v. 10, n. 5, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27328>. Acesso em: 12 out. 2025.

UGOCHUKWU, N. A.; GOYAL, S. B.; ARUMUGAM, S. Blockchain based IoT-enabled system for secure and efficient logistics management in the era of industry 4.0. **Journal of Nanomaterials**, London, v. 2022, n. 1, p. 1-10, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/7295395>. Acesso em: 12 out. 2024.

UPADHYAY, A. *et al.* Implementing industry 4.0 in the manufacturing sector: circular economy as a societal solution. **Computers and Industrial Engineering**, Marmara-Turquia, v. 177, n. 3, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109072>. Acesso em: 12.out. 2025.

VEILE, J. W. *et al.* Lessons learned from industry 4.0 implementation in the german manufacturing industry. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Reino Unido, v. 31, n. 5, p. 977-997, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0270>. Acesso em: 12.out.2024.

WANG, L. C. *et al.* Framework and deployment of a cloud-based advanced planning and scheduling system. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Amsterdam, v. 70, n. 8, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102088>. Acesso em: 12 out. 2024.

WANG, M. *et al.* IoT based inventory control system framework for panelized construction. **Journal Industrialized Construction**, Hollywood, mai. 2018. Disponível em: <http://www.journalofindustrializedconstruction.com/index.php/mocs/article/view/37/37>. Acesso em: 12 out. 2025.

WESTBROOK, R. Action research: a new paradigm for research in production and operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, West Yorkshire, v. 15, n. 12, p. 6-20, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/01443579510104466>. Acesso em: 12 out. 2025.

XU, S.; LU, Y.; YU, C. Augmented reality-assisted cloud additive manufacturing with digital twin technology for multi-stakeholder value co-creation in product innovation. **Heliyon**, Londres, v. 10, n. 4, fev. 2024. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024017535>. Acesso em: 12.out.2025.

YIXIONG, F. *et al.* Optimization of variable blank holder force in deep drawing based on support vector regression model and trust region. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlim, v.105, n.10, p.4265-4278, dez.2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04477-5>. Acesso em 12 out. 2025.

ZHANG, Y. *et al.* Precision control and parameter optimization in screw extrusion 3D printing of polypropylene materials. **Heliyon**, Londres, v. 10, n. 12, 30 jun. 2024. Disponível em: <http://www.pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11233890/pdf/main.pdf>. Acesso em: 12.out.2025.

ZHOU, C. *et al.* Digital twin-based stamping system for incremental bending. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlim, v. 116, p. 389-401, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00170-021-07422-7>. Acesso em: 12 out. 2025.

APÊNDICE A – ENTREVISTA FASE DIAGNOSTICO

A) Entrevista

Objetivo: Coletar percepções do time especializado sobre os desafios operacionais, a maturidade digital atual e as expectativas para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 na estamparia automotiva.

1. Perfil do Entrevistado

1. Nome:
2. Qual é a sua função na empresa?
3. Em qual setor você atua atualmente?
4. Há quanto tempo você trabalha na empresa e na sua função atual?
5. Você já participou de projetos de implementação de tecnologias na produção?
Se sim, quais?

Perguntas da entrevista

1. Como os dados da produção ou da sua área são coletados atualmente?
2. Quais são os maiores desafios enfrentados na coleta desses dados?
3. Quanto tempo normalmente leva para que as informações aplicáveis ao seu trabalho sejam coletadas e analisadas?
4. Em quais momentos você percebe que a falta de dados em tempo real mais prejudica a operação?
5. Você observa falhas ou inconsistências nos dados coletados manualmente?
Como essas falhas impactam a operação?
6. Como a ausência de integração entre diferentes sistemas ou processos impacta a coordenação da produção?
7. Quais setores ou etapas do processo de produção apresentam mais dificuldades relacionadas à coleta de dados?
8. Existem problemas recorrentes na comunicação entre operadores e gestores durante o controle de produção?

9. Quais dificuldades você enxerga em implementar um sistema que colete e monitore dados automaticamente?
10. Quais medidas ou mudanças você acredita que ajudariam a resolver os problemas identificados nos processos atuais?

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO AOS USUÁRIOS

B) Questionário Estruturado (Após a Implementação das Ações)

Objetivo: Avaliar as percepções do time da estamparia sobre os impactos da adoção da I4.0 na rotina produtiva.

- **Escala Likert de 5 pontos**

Os participantes devem indicar o grau de concordância com cada afirmativa, utilizando a seguinte escala:

1. Discordo totalmente
2. Discordo parcialmente
3. Neutro
4. Concordo parcialmente
5. Concordo Totalmente

Termo de Consentimento para Participação na Pesquisa

Caro(a) colaborador(a),

Estamos avaliando as novas tecnologias implementadas na produção e queremos ouvir sua opinião. Sua participação ajudará a identificar melhorias e aprimorar os processos.

A pesquisa é **anônima**, e suas respostas serão usadas apenas para análise interna.

O tempo estimado para resposta é de **5 minutos**.

Sua colaboração é muito importante!

Caracterização do Respondente

2. Qual sua função na empresa

- Operador/ Membro de time
- Ferramenteiro
- Líder na operação (T/L, G/L, Líder técnico).
- Time administrativo ("Office")
- Supervisor ou Gerente

3. Há quanto tempo trabalha no departamento da estamparia da Hyundai?

- Menos de 1 ano
 - De 1 a 2 anos
 - 3 a 5 anos
 - a 10 anos
 - Mais de 10 anos
4. Qual seu horário de trabalho?
- 1º Turno
 - 2º Turno
 - 3º Turno
 - Administrativo
5. Qual seu nível de familiaridade com sistemas digitais de monitoramento da produção?
- Nenhuma experiencia
 - Pouca experiencia
 - Experiencia moderada
 - Experiente

Acesso e Uso de Dados Operacionais

6. As informações sobre a produção, como quantidade produzida e status das máquinas, estão mais acessíveis após as mudanças.
7. A precisão e confiabilidade dos dados de produção melhoraram com a digitalização.
8. Os problemas nas máquinas ou nos processos podem ser identificados com mais rapidez do que antes.
9. As informações sobre o desempenho da produção estão disponíveis no momento necessário para a execução do trabalho.

Impacto na Eficiência e Tomada de Decisão

10. A comunicação entre setores melhorou após a implementação das novas tecnologias.
11. A disponibilidade de dados em tempo real facilitou a resolução de problemas operacionais.
12. As mudanças implementadas reduziram a necessidade de registros manuais e retrabalho nas informações.
13. A tomada de decisão ficou mais rápida e eficiente com a nova forma de coleta de dados.

Facilidade de Adaptação e Usabilidade

14. As novas tecnologias são fáceis de usar e foram bem explicadas no treinamento.
15. Sinto-me confortável utilizando os novos sistemas no meu dia a dia.
16. Recebi suporte adequado para aprender a usar as ferramentas digitais implementadas.
17. A digitalização trouxe benefícios para minha rotina de trabalho e melhorou a eficiência operacional.
18. Qual palavra ou expressão melhor descreve sua experiência com as novas tecnologias implementadas na produção? (escreva em poucas palavras - Desejável até 2 palavras)
19. Qual o maior benefício que você percebeu com a digitalização da produção? (escreva uma expressão usando poucas palavras - Desejável até 2 palavras)
20. Qual o maior desafio encontrado no uso das novas tecnologias? (Escreva em forma de expressão, com poucas palavras, desejável até 2 palavras).
21. De maneira geral, como você avalia sua satisfação com as novas tecnologias implementadas na produção?

APÊNDICE C – ENTREVISTA POS IMPLEMENTAÇÃO
TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO – ENTREVISTA
INFORMED CONSENT FORM – INTERVIEW

Título da pesquisa / Research title:

Aplicação da Tecnologias Habilitadoras da I4.0 para Impulsionar a Eficiência Operacional em uma Estamparia Automotiva: Uma Pesquisa-Ação

Enabling Technologies of I4.0 to Improve Operational Efficiency in an Automotive Stamping Plant: An Action Research Study

Pesquisador responsável / Principal investigator:

Fagner Asbahr de Oliveira

Mestrado em Engenharia de Produção – [UNESP] | Master in Science (MsC) – Production Engineering

E-mail: Fagner.asbahr@unesp.br

1. Apresentação da pesquisa / Study overview

Você está sendo convidado(a) a participar, de forma voluntária, de uma entrevista individual vinculada a uma dissertação de mestrado.

You are being invited to voluntarily participate in an individual interview as part of a master's thesis.

O objetivo do estudo é investigar como tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, CPS e MES, podem melhorar a eficiência da produção em uma estamparia automotiva.

The objective of this study is to investigate how Industry 4.0 technologies, such as IoT, CPS, and MES, can improve production efficiency in an automotive stamping plant.

2. Procedimentos / Procedures

A entrevista terá duração de 30 a 60 minutos e poderá ser gravada em áudio ou vídeo, com sua autorização.

The interview will last between 30 and 60 minutes and may be audio- or video-recorded with your authorization.

Serão coletadas informações como nome, área de atuação, cargo e tempo de experiência, apenas para controle interno da pesquisa.

Information such as your name, area of activity, position, and experience will be collected for internal research control only.

3. Garantia de anonimato e confidencialidade / Confidentiality and anonymity

Nenhuma informação pessoal será divulgada na dissertação ou publicações futuras.

No personal information will be disclosed in the thesis or any future publications.

As entrevistas serão transcritas com uso de códigos, preservando sua identidade.

The interviews will be transcribed using codes to ensure anonymity.

4. Riscos e benefícios / Risks and benefits

Não há riscos físicos, morais ou legais associados à sua participação.

There are no physical, moral, or legal risks associated with your participation.

Os benefícios são indiretos, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre a adoção das tecnologias habilitadoras da I4.0 na indústria.

The benefits are indirect, contributing to the advancement of knowledge on the adoption of I4.0 enabling technologies in industry

5. Liberdade de participação / Voluntary participation

Sua participação é totalmente voluntária. Você pode se recusar a responder qualquer pergunta ou desistir a qualquer momento.

Your participation is entirely voluntary. You may decline to answer any question or withdraw at any time.

6. Consentimento / Consent

Declaro que fui informado(a) sobre os objetivos e procedimentos da pesquisa, que minha identidade será preservada, e autorizo minha participação na entrevista.

I declare that I have been informed about the objectives and procedures of this research, that my identity will be protected, and I authorize my participation in the interview.

Participante / Participant:

Nome completo / Full name:

Cargo / Position:

Assinatura / Signature:

Data / Date:

Pesquisador / Researcher:

Assinatura / Signature:

Data / Date:

Roteiro de Registro do Perfil do Entrevistado

Interviewee Profile Registration Script

Tecnologias Habilitadoras da I4.0 para Impulsionar a Eficiência Operacional em uma Estamparia Automotiva: Uma Pesquisa-Ação

Enabling Technologies of I4.0 to Improve Operational Efficiency in an Automotive Stamping Plant: An Action Research Study

1. Data/ Date: Hora/ Hour: Local/ Place:

2. Qual seu Nome/ What is your name: Claudio Ebling Sanchez

3. Qual é o seu cargo ou função atual na empresa?

What is your current position or role in the company? Audit Specialist

4. Em qual área da empresa você atua? (Ex Estamparia, T.I, Etc)

Which department or area do you work in? (e.g., Stamping, IT, etc.)

5. Há quanto tempo você ocupa essa função? (Meses ou anos)

How long have you been in this role? (months or years)

6. Qual é a sua formação acadêmica? (Indique o curso e instituição, se desejar)

What is your academic background? (Please indicate the course and institution, if desired)

7. Você já havia participado de projetos de digitalização antes deste?

Have you previously participated in digitalization projects before this one?

() Não/ No () Sim/ Yes Se sim, Descreva/ Discribe:

8. Qual foi o seu papel ou nível de envolvimento na implementação deste projeto?

(Exemplos: Planejamento técnico, desenvolvimento de sistema, apoio na integração com a operação, usuário de testes, operador impactado, etc.)

What was your role or level of involvement in the implementation of this project?

9. Qual é o seu nível de interação atual com os sistemas implantados (como MES, sensores IoT, dashboards etc.)?

What is your current level of interaction with the implemented systems (such as MES, IoT sensors, dashboards, etc.)?

- ☐ () Alto (uso frequente e com autonomia) / High
- ☐ () Médio (uso regular com apoio) / Medium
- ☐ () Baixo (uso ocasional ou apenas consulta) / Low

10. Você participa da tomada de decisão com base nos dados coletados pelos sistemas digitais?

Do you participate in decision-making based on data collected by the digital systems?

- ☐ () Sim / Yes ☐ () Parcialmente / Partial ☐ () Não / No

11. Você leu e assinou o Termo de Consentimento para participar desta pesquisa?

Have you read and signed the Informed Consent Form to participate in this research?

- ☐ () Sim / Yes ☐ () Não/ No

Questões – Grupo Estratégico:

1. Quais fatores motivaram a decisão de digitalizar a estampa? Como essa iniciativa se alinha aos objetivos estratégicos da empresa?
2. Como foi estruturado o alinhamento entre as áreas de produção, TI e fornecedores? Houve dificuldades de coordenação?
3. Por que as tecnologias como IoT, CPS e MES foram priorizadas? Que critérios guiaram a escolha dessas soluções?
4. Quais ganhos operacionais ou organizacionais eram esperados com o projeto? Alguma métrica foi definida para avaliar o sucesso da adoção da I4.0?
5. Houve preocupação com os riscos técnicos ou financeiros do projeto? Como a empresa avaliou o retorno ou os benefícios esperados?
6. Como a liderança atuou para engajar as equipes na mudança? Houve resistência à implementação das tecnologias da I4.0 nas áreas envolvidas?
7. Ao longo do projeto, foi necessário adaptar a abordagem ou revisar escopos? Que aprendizados emergiram nesse processo?

8. Quais ações foram ou serão tomadas para garantir a continuidade e evolução dos sistemas implantados? Há planos de expansão para outras áreas?
9. Após a implementação, como a maturidade digital da estamperia é percebida pela liderança? Quais mudanças são mais visíveis?
10. Que recomendações você faria para outras áreas ou empresas que desejam iniciar projetos relacionados à adoção das tecnologias habilitadoras da I4.0?

Questões: Grupo Técnico

1. Como a necessidade de digitalização foi percebida pela equipe técnica e quais limitações operacionais motivaram o projeto?
2. Quais foram as premissas técnicas que guiaram o desenvolvimento da solução, e como os engenheiros da estamperia contribuíram?
3. Quais dados passaram a ser coletados automaticamente e como são usados nas decisões operacionais?
4. Os sistemas implantados (MES, sensores, ERP) trocam dados automaticamente? Quais setores acessam essas informações em tempo real?
5. Como os dados relacionados à qualidade (como rejeições, não conformidades e segregados) passaram a ser registrados, analisados e utilizados após a digitalização, e até que ponto o sistema permite respostas automáticas ou decisões baseadas nesses dados em tempo real?
6. Houve mudanças no rastreamento de estoques e replanejamento da produção após a digitalização?
7. Quais desafios técnicos e de infraestrutura precisaram ser superados durante a implementação?
8. Houve resistência de operadores ou necessidade de adaptação das interfaces técnicas?
9. Os feedbacks do chão de fábrica foram incorporados no sistema?
10. Que tipo de ajustes foram feitos com base nesses retornos?
11. Após a implementação, quais avanços concretos você percebe em termos de digitalização, integração e autonomia dos sistemas implantados?
12. Com base na sua experiência, que recomendações você daria para projetos futuros relacionados à adoção das tecnologias habilitadoras da I4.0, seja em outras áreas da empresa ou em outros contextos industriais?

Questões – Grupo Operacional

1. Como era feito o controle da produção e dos problemas no processo antes do novo sistema digital?
2. O que mudou no seu trabalho depois da instalação do sistema (como tablets, sensores, painéis)?
3. Você consegue consultar dados de produção ou alertas com facilidade? Isso ajuda nas decisões do dia a dia?
4. Como você registra uma falha ou um problema de produção hoje? Isso melhorou com o novo sistema?
5. O sistema é fácil de usar? Você se sente confortável operando ou preenchendo as informações?
6. Você recebeu algum treinamento para usar o sistema? Isso foi suficiente?
7. A equipe teve dificuldade para se adaptar ao novo sistema? Como foi no começo?
8. Você foi chamado para testar ou dar opinião sobre o sistema? Alguma sugestão sua foi considerada?
9. O que melhorou na sua rotina com a implantação do sistema digital? E o que ainda pode melhorar?
10. Que conselhos você daria para outras áreas da empresa que vão começar a usar esse tipo de sistema?

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	FAGNER ASBAHR DE OLIVEIRA 15/11/1981
Nacionalidade	Brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Oliveira, Fagner OLIVEIRA, F. A.
Currículo Lattes	https://lattes.cnpq.br/1232768191980184
ORCID	https://orcid.org/0009-0000-6145-0935
outro identificador	-
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2001/2006	Curso de Graduação (Engenharia Mecânica) Escola de engenharia de Piracicaba (FUMMEP/ EEP)
2014/2015	Pós-graduação Lato Sensu (Especialização) MBA em Gestão de Projetos Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP)
2018/2019	Pós-graduação Lato Sensu (Especialização) MBA em Gestão de Negócios Universidade de São Paulo (ESALQ).
2023/2025	Pós-graduação Lato Sensu (Especialização) MBA em Economia Brasileira para Negócios Universidade de São Paulo (FEA).
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
OLIVEIRA, F. A.; SANTOS, D. F. L. Avaliação estratégica de investimentos em equipamentos: o processo de decisão entre manutenção, reforma ou aquisição. In: <i>Congresso de Administração, Sociedade e Inovação (CASI)</i>, XVI, 2024, Niterói, RJ. Anais [...]. Niterói: CASI, 2025. OLIVEIRA, Fagner Asbahr de; BATISTELA, Gislaine Cristina; FACIN, Ana Lucia Figueiredo. Pesquisa-ação aplicada ao diagnóstico da maturidade digital em uma estampa: propostas com base nas tecnologias da Indústria 4.0. In: <i>Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)</i>, 2025, Natal, RN. Anais [...]. Natal: ABEPRO, 2025.	

DOI: 10.14488/enegep2025_tn_wpg_424_2073_50218.

DE OLIVEIRA, Fagner Asbahr; BENITE, Maurílio; FACIN, Ana Lucia Figueiredo; BATISTELA, Gislaine Cristina. **Programa MOVER e a transformação digital: oportunidades na capacitação da força de trabalho nas indústrias de ferramentaria brasileiras.** In: *2025 16th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2025, São Sebastião, SP. Anais [...]. Piscataway: IEEE, 2025.

DOI: 10.1109/INDUSCON66435.2025.11241568.

OLIVEIRA, F. A.; FACIN, A. L. F.; BATISTELA, G. C. **Indústria 4.0 e a eficiência operacional na manufatura: uma revisão de literatura sobre a transformação digital e seus desafios.** In: *Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção (CONBREPRO)*, XIV, 2024, Ponta Grossa, PR. Anais [...]. Ponta Grossa: CONBREPRO, 2024.