



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

João Pedro Carvalho dos Santos

Indústria 4.0 em Empresas Engineer-to-Order: Avaliação de Maturidade Digital e
Proposta de Arquitetura de Digitalização

Blumenau
2025

João Pedro Carvalho dos Santos

**Indústria 4.0 em Empresas Engineer-to-Order: Avaliação de Maturidade Digital e
Proposta de Arquitetura de Digitalização**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Moratelli, Dr.

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Santos, João Pedro Carvalho dos
Indústria 4.0 em empresas engineer-to-order : avaliação
de maturidade digital e proposta de arquitetura de
digitalização / João Pedro Carvalho dos Santos ;
orientador, Carlos Roberto Moratelli, 2025.
76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Indústria 4.0.
3. Maturidade Digital. 4. Engineer-to-Order. 5.
Arquitetura Digital. I. Moratelli, Carlos Roberto. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

João Pedro Carvalho dos Santos

Indústria 4.0 em Empresas Engineer-to-Order: Avaliação de Maturidade Digital e
Proposta de Arquitetura de Digitalização

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
“Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de
Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 16 de julho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Roberto Moratelli
Universidade Federal de Santa Catarina

Profª. Dra. Franciely Veloso Aragão
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Guilherme Brasil Pintarelli
Universidade Federal de Santa Catarina

*Este trabalho é dedicado aos meus amados pais,
que sempre me apoiaram incondicionalmente.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha graduação e para a realização deste trabalho:

Da mesma forma que dedico, gostaria de agradecer do fundo do coração, aos melhores pais do mundo, Pedro e Mônica. Seu carinho, dedicação, educação e suporte são a razão central para que toda a minha graduação tenha sido possível.

Aos meus avós, Célia e Gabriel, José, e em especial à minha eterna melhor amiga, Maria Wanda, por toda a educação e carinho, ensinando-me o valor e o sentido de fazer as coisas com amor.

À minha irmã, Júlia, e às minhas lindas sobrinhas, Maria Júlia e Sophia: sua espontaneidade e afeto sempre me reconectaram ao que realmente importava.

Ao meu amor, Lauriana, por estar ao meu lado e me dar todo o suporte para que meus sonhos se tornem realidade. Seu amor e carinho não podem ser expressados em palavras, você me permitiu ver o mundo e a vida de outra forma. Obrigado por me apresentar à sua maravilhosa família, a quem também agradeço imensamente.

A toda a minha extensa e amada família — primos e primas, tios e tias — é um prazer ter pessoas tão carinhosas, que me dão tanto suporte e confiança, além de permitirem que eu me sentisse presente mesmo após minha mudança para Blumenau.

Aos irmãos que fiz ao longo do caminho, Pablo, Marcos e Bruno; e à família que Blumenau me trouxe, Guilherme, Augusto, Gabriel, Francisco e Ariane: obrigado por todo o companheirismo e por fazerem com que eu me sentisse em casa.

Ao meu grande orientador, Carlos, pela confiança, disponibilidade e valiosos ensinamentos. Agradeço também à UFSC e aos professores, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação pessoal, acadêmica e profissional. A cada um de vocês, minha eterna gratidão.

A única constante do universo é a mudança.
(HERÁCLITO, 500 a.C.)

RESUMO

A busca por maior competitividade, eficiência e sustentabilidade tem impulsionado indústrias a modernizarem seus processos e estruturas informacionais. Nesse cenário, a Indústria 4.0 emerge como um referencial estratégico para promover a digitalização e a integração dos sistemas produtivos. Este trabalho propõe uma estratégia para o início da transição digital em uma indústria hipotética que fabrica equipamentos elétricos sob o modelo *Engineer-to-Order* (ETO), concebida com base em características observadas em empresas brasileiras com baixo grau de maturidade digital. Foram apresentadas duas metodologias complementares para o diagnóstico de maturidade digital: o modelo proposto por Santos (2018), focado em aspectos organizacionais e humanos, e uma proposta de abordagem para a metodologia Acatech, voltada à avaliação da maturidade dos processos produtivos. A partir do diagnóstico, foi definida uma estratégia de digitalização com foco na obtenção de visibilidade operacional, incluindo a modelagem de uma arquitetura digital conceitual alinhada aos princípios da Indústria 4.0, com a proposta de um modelo de banco de dados e dois aplicativos para coleta de dados de produtividade e qualidade. A proposta desenvolvida busca demonstrar como deve ser conduzida a avaliação do nível de maturidade digital e como a digitalização pode ser implementada em cenários pouco padronizados. O trabalho contribui ao apresentar uma metodologia estruturada, aplicável a empresas que pretendem iniciar sua transição digital e avançar em sua jornada rumo à Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Digitalização; Índice de Maturidade; Engineer-to-Order; Integração de Sistemas; Arquitetura Digital; Indicadores de Desempenho.

ABSTRACT

The pursuit of greater competitiveness, efficiency, and sustainability has driven industries to modernize their processes and information structures. In this context, Industry 4.0 emerges as a strategic framework to foster the digitalization and integration of production systems. This work proposes a strategy for initiating the digital transition in a hypothetical industry that manufactures electrical equipment under the Engineer-to-Order (ETO) model, conceived based on characteristics observed in Brazilian companies with a low degree of digital maturity. Two complementary methodologies were presented for diagnosing digital maturity: the model proposed by Santos (2018), focused on organizational and human aspects, and an adapted approach to the Acatech methodology, aimed at assessing the maturity of production processes. Based on the diagnosis, a digitalization strategy was defined with a focus on achieving operational visibility, including the modeling of a conceptual digital architecture aligned with the principles of Industry 4.0, comprising a database model and two applications for collecting productivity and quality data. The proposed solution aims to demonstrate how the assessment of digital maturity levels should be conducted and how digitalization can be implemented in unstandardized production environments. This work contributes by presenting a structured methodology applicable to companies that intend to start their digital transition and advance on their journey toward Industry 4.0.

Keywords: Industry 4.0; Digitalization; Maturity Index; Engineer-to-Order; Systems Integration; Digital Architecture; Performance Indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes da Indústria 4.0.	17
Figura 2 – Representação dos seis níveis do Índice de Maturidade da Indústria 4.0 segundo a metodologia da Acatech.	20
Figura 3 – Empresas por média geral de nível de maturidade; n=70.	21
Figura 4 – Exemplo de eventos na notação BPMN.	24
Figura 5 – Exemplo de atividades na notação BPMN.	24
Figura 6 – Exemplo de <i>gateway</i> na notação BPMN.	25
Figura 7 – Exemplo de raias na notação BPMN.	25
Figura 8 – Exemplo de conectores na notação BPMN.	25
Figura 9 – Exemplo de modelagem conceitual da relação entre turmas e professores.	26
Figura 10 – Exemplo de modelagem lógica de um banco de dados relacional.	27
Figura 11 – Exemplo de QR Code que leva ao site da UFSC.	31
Figura 12 – Etapas da estratégia proposta para a Transformação Digital.	33
Figura 13 – Modelagem BPMN completa da Indústria ETO Hipotética.	42
Figura 14 – Fluxograma representando o procedimento de análise do nível de ma- tutidade digital das atividades.	46
Figura 15 – Radar de maturidade criado para representar o grau de maturidade digital da empresa hipotética.	49
Figura 16 – Arquitetura digital proposta para a empresa hipotética.	55
Figura 17 – Interface de exemplo para o aplicativo RDA de geração das etiquetas de identificação.	56
Figura 18 – Diagrama de casos de uso do aplicativo de preenchimento de <i>Check Lists</i>	58
Figura 19 – Diagrama de atividades do aplicativo de preenchimento de <i>Check Lists</i>	59
Figura 20 – Diagrama de classes do aplicativo de preenchimento de <i>Check Lists</i>	60
Figura 21 – Diagrama de casos de uso do aplicativo de registro da produtividade.	61
Figura 22 – Diagrama de atividades do aplicativo de registro da produtividade.	62
Figura 23 – Diagrama de classes do aplicativo de registro da produtividade.	63
Figura 24 – Modelo conceitual do banco de dados proposto para a digitalização dos processos da empresa hipotética.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Descrições das dimensões do modelo de maturidade digital proposto por Santos (2018).	39
Tabela 2 –	Critérios de avaliação dos níveis de maturidade digital adaptados para atividades.	45
Tabela 3 –	Resultado da avaliação de maturidade digital segundo o modelo de Santos (2018).	48
Tabela 4 –	Resultado da avaliação de maturidade digital observacional aplicada aos processos produtivos.	50
Tabela 5 –	Descrição das entidades do modelo de dados.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACID	Atomicidade, Consistência, Isolamento e Durabilidade
BI	<i>Business Intelligence</i>
BOM	<i>Bill of Materials</i>
BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ETO	<i>Engineer-to-Order</i>
IA	Inteligência Artificial
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTO	<i>Make-to-Order</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NIB	Nova Indústria Brasil
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OMG	<i>Object Management Group</i>
POP	Procedimento Operacional Padrão
PPCP	Planejamento, Programação e Controle da Produção
QR Code	<i>Quick Response Code</i>
RDA	<i>Robotic Desktop Automation</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
ROI	<i>Return On Investment</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SQL	<i>Structured Query Language</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	INDÚSTRIA 4.0: CONCEITOS E ESTRUTURA	17
2.1.1	Digitalização vs. Automação: Uma Dicotomia Estratégica . .	19
2.2	ÍNDICE DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0	20
2.3	DIGITALIZAÇÃO DE LINHAS DE PRODUÇÃO ARTESANAIS . .	23
2.4	MODELAGEM DE PROCESSOS COM BPMN	23
2.5	BANCOS DE DADOS RELACIONAIS NA INDÚSTRIA	26
2.5.1	Modelagem Conceitual vs. Lógica	26
2.5.2	Integração entre Sistemas de Gestão e o Chão de Fábrica . .	27
2.6	REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMAS UML	28
2.6.1	Principais Diagramas UML aplicáveis na Arquitetura Digital	28
2.7	MÉTRICAS DE PRODUÇÃO EM PROCESSOS NÃO-AUTOMATIZADOS	29
2.7.1	OEE Adaptado para Operações Manuais	29
2.8	QR CODE COMO TECNOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DIGITAL	30
3	UMA ESTRATÉGIA PARA O DIAGNÓSTICO DA MATU- RIDADE DIGITAL E INÍCIO DA TRANSFORMAÇÃO DI- GITAL	32
3.1	EXPECTATIVAS EM RELAÇÃO À IMPLANTAÇÃO DA ESTRATÉ- GIA	32
3.2	ETAPAS DA ESTRATÉGIA	32
3.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	35
4	DIAGNÓSTICO DA MATURIDADE DIGITAL DA EMPRESA HIPOTÉTICA	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E OBJETO DE ESTUDO . . .	36
4.2	PROPOSIÇÃO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DIGITAL . . .	38
4.2.1	Procedimento de Aplicação do Modelo de Santos (2018) . . .	38
4.2.2	Proposta de Classificação de Processos com Base na Metodo- logia Acatech	41
<i>4.2.2.1</i>	<i>Mapeamento dos Processos Produtivos</i>	<i>41</i>
<i>4.2.2.2</i>	<i>Análise do Nível Digital das Atividades</i>	<i>44</i>
<i>4.2.2.3</i>	<i>Cálculo da Maturidade por Macroetapa</i>	<i>47</i>
4.3	RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DE MATURIDADE DIGITAL PARA A EMPRESA HIPOTÉTICA	48
4.3.1	Resultados da Avaliação Organizacional — Modelo de Santos (2018)	48

4.3.2	Resultados da Avaliação Observacional — Metodologia Aca-	
	tech Aplicada aos Processos	49
4.3.3	Análise dos Resultados dos Modelos	49
5	ESTRATÉGIA DE DIGITALIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DA	
	ARQUITETURA DIGITAL	52
5.1	DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE DIGITALIZAÇÃO	52
5.2	PROPOSIÇÃO DA ARQUITETURA DIGITAL CONCEITUAL . . .	53
5.2.1	Fluxo de Dados e Camada de Governança da Informação . . .	54
5.2.2	Modelo Conceitual dos Dados	56
5.2.3	Aplicativos de Coleta de Dados	56
5.2.3.1	<i>Aplicativo de Preenchimento dos Check Lists de Qualidade</i>	<i>57</i>
5.2.3.2	<i>Aplicativo de Registro da Produtividade</i>	<i>60</i>
5.2.4	Proposta de Monitoramento dos Dados e Gestão dos Indicadores	63
6	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A – Questionário de Avaliação de Maturidade	
	Organizacional para a Indústria 4.0	71
	APÊNDICE B – Modelo Conceitual do Banco de Dados Pro-	
	posto	75

1 INTRODUÇÃO

O setor de fornecimento, distribuição e transmissão de energia elétrica atravessa uma fase de transição estratégica em escala global, marcada pela busca por confiabilidade, sustentabilidade e digitalização (International Energy Agency, 2021). A crescente demanda por equipamentos customizados, aliados à pressão por maior rastreabilidade e eficiência operacional, impõe desafios significativos às fabricantes de equipamentos elétricos.

Segundo o relatório *World Energy Outlook 2024* da IEA (*International Energy Agency*), a demanda energética global continua em trajetória de crescimento, impulsionada por fatores como recuperação econômica pós-pandemia, desenvolvimento acelerado de economias emergentes e crescente demanda industrial, especialmente em setores como mobilidade elétrica, *data centers* e IA (International Energy Agency, 2024). A IEA projeta uma taxa de crescimento próxima a 4% ao ano até 2027, com 85% desse aumento concentrado em países fora da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), como os da Ásia-Pacífico e África.

O documento ainda destaca que, até 2030, aproximadamente 85% do aumento da demanda por eletricidade virá de países fora da OCDE, impulsionado principalmente pelo crescimento industrial e urbano nas regiões citadas. Essa tendência reforça a necessidade de maior eficiência nas cadeias produtivas, para que essa demanda possa ser atendida. Neste contexto, a digitalização dos processos produtivos torna-se uma condição essencial para atender às exigências do mercado, reduzir falhas e melhorar a capacidade de resposta frente às variações de demanda. A Indústria 4.0, ao integrar sistemas físicos e digitais por meio de tecnologias como IoT (*Internet of Things*), computação em nuvem e sistemas ciberfísicos, oferece os fundamentos para essa transformação, permitindo que empresas avancem rumo a operações mais inteligentes, conectadas e sustentáveis.

Nesse cenário de crescente demanda energética e transformação digital, a presente pesquisa adota como base uma empresa hipotética, representativa do segmento de equipamentos elétricos que operam sob o modelo ETO. Nesse contexto, cada produto é projetado e fabricado sob demanda, conforme requisitos técnicos específicos do cliente. Os processos produtivos são marcados por envolver operações manuais especializadas, com baixa padronização e forte dependência do conhecimento tácito dos operadores, o que dificulta a implantação de soluções automatizadas e o monitoramento em tempo real (Oliveira Júnior, 2018).

Além dos desafios intrínsecos ao modelo produtivo ETO, é necessário considerar o contexto específico da indústria brasileira no que se refere à adoção da Indústria 4.0. No Brasil, foram estabelecidas iniciativas institucionais para fomentar a transformação digital no setor industrial, como a criação do Grupo de Trabalho da Indústria 4.0, conduzido pelo MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio) e pelo MCTIC (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações), com a participação da

CNI (Confederação Nacional da Indústria) e de outras entidades relevantes. O objetivo dessas iniciativas é elaborar diretrizes e planos de ação para acelerar a implementação da manufatura avançada no país (Santos, 2018).

A indústria brasileira caracteriza-se por elevado grau de heterogeneidade, tanto em termos de porte das empresas quanto de capacidade tecnológica, o que impõe desafios adicionais à adoção de tecnologias digitais, pois essa realidade exige que as estratégias de transformação digital sejam customizadas, levando em conta as diferentes velocidades, capacidades e condições de cada setor e de cada organização. Empresas de menor porte, ou que operam com processos sob encomenda — como é o caso da organização hipotética estudada neste trabalho — enfrentam desafios ainda mais expressivos, devido à predominância de processos manuais, baixa integração digital, carência de infraestrutura tecnológica e dificuldade no acesso a conhecimento técnico especializado (Santos, 2018).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a transformação digital, além de ser uma necessidade imposta pelas dinâmicas globais de mercado, enfrenta no contexto brasileiro barreiras estruturais que exigem abordagens progressivas, realistas e alinhadas à capacidade de assimilação tecnológica das empresas. Este trabalho, portanto, considera esses aspectos como elementos fundamentais para a construção de uma proposta de digitalização aplicável e aderente à realidade da indústria nacional.

Diante desse contexto, este trabalho propõe uma abordagem estruturada para o início da transição digital em uma indústria hipotética de materiais elétricos ETO, caracterizada por processos manuais, ausência de sistemas integrados e baixo nível de maturidade digital. O trabalho foi, portanto, desenvolvido em quatro etapas principais: inicialmente, foi realizada a caracterização de um cenário industrial hipotético representativo de empresas ETO brasileiras; em seguida, foi proposta uma abordagem para avaliação da maturidade digital, fundamentada em dois referenciais: o modelo de Santos (2018), baseado em critérios organizacionais e estruturais, e uma adaptação da metodologia Acatech (Schuh et al., 2020a), que incorpora uma análise detalhada dos processos produtivos, usando a modelagem BPMN (*Business Process Model and Notation*), e de suas interações com a tecnologia.

A partir do diagnóstico de maturidade digital, definiu-se uma estratégia de digitalização orientada à obtenção de visibilidade operacional como etapa inicial da transformação digital. Essa estratégia prioriza a digitalização da coleta de dados como pré-requisito para avanços futuros em automação e inteligência analítica. Por fim, foi projetada uma arquitetura digital conceitual capaz de viabilizar essa estratégia, estruturada em três pilares: o modelo de dados, os aplicativos de coleta e a camada de monitoramento dos indicadores.

A proposta desenvolvida busca responder o seguinte problema: como estruturar uma arquitetura digital conceitual replicável a indústrias com processos manuais, de forma a permitir o registro sistemático dos dados operacionais e a geração de indicadores confiáveis para a gestão da produção e da qualidade?

Como delimitação, este trabalho não se propõe a implementar a arquitetura em um ambiente real, mas sim a modelá-la conceitualmente, com base em uma hipótese de empresa e utilizando ferramentas de modelagem, prototipação e simulação. A solução proposta contempla o desenvolvimento do modelo conceitual de dados, a modelagem dos aplicativos de coleta com uso de diagramas UML (*Unified Modeling Language*) e a definição dos indicadores a serem monitorados por meio de *dashboards* integrados ao banco de dados.

Dessa forma, o trabalho busca contribuir com uma abordagem sistematizada e acessível para a digitalização progressiva de ambientes fabris pouco estruturados, respeitando as limitações reais dessas organizações e alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0 adaptados à realidade nacional.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é propor uma estratégia estruturada de avaliação de maturidade digital e uma arquitetura conceitual de digitalização para empresas que operam sob o modelo ETO, com foco na visibilidade operacional.

A partir desse objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar um cenário industrial hipotético típico de empresas ETO com baixo grau de maturidade digital;
2. Propor uma abordagem estruturada para avaliação da maturidade digital, fundamentada na metodologia de Santos (2018) e na metodologia de Schuh et al. (2020a);
3. Definir uma estratégia de digitalização com foco na obtenção de visibilidade operacional, como etapa inicial da transformação digital;
4. Projetar uma arquitetura digital conceitual, composta por modelo de dados, fluxos de informação, e mecanismos de rastreabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo estabelecer os fundamentos teóricos que embasam a proposta de digitalização e integração de sistemas em ambientes industriais com baixa maturidade digital. Serão explorados os principais conceitos relacionados à Indústria 4.0, métodos para avaliação de maturidade digital, estratégias de digitalização de processos manuais, modelagem de processos com BPMN, representação de sistemas em diagramas UML, estruturação de bancos de dados relacionais e uso de métricas operacionais em contextos artesanais. Essa base teórica orienta o desenvolvimento metodológico e prático deste trabalho.

2.1 INDÚSTRIA 4.0: CONCEITOS E ESTRUTURA

A Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial, caracterizada pela digitalização e integração inteligente dos sistemas de produção. Seu objetivo principal é promover a interconectividade e a automação descentralizada por meio de tecnologias como IoT (*Internet of Things*), computação em nuvem, *big data* e inteligência artificial (Schuh et al., 2020a). Essa revolução é impulsionada pela necessidade de atender à crescente demanda por personalização em massa, eficiência operacional e sustentabilidade.

Tecnicamente, a Indústria 4.0 se estabelece a partir da interconexão de máquinas, sensores, sistemas e pessoas por meio de redes digitais, com capacidade de coleta, armazenamento e análise massiva de dados. Essa infraestrutura habilita a digitalização integral da cadeia de valor, permitindo que os sistemas industriais evoluam de operações isoladas para redes integradas, dinâmicas e inteligentes. O conceito central é a criação de CPSs (*Cyber-Physical Systems*), onde os ativos físicos — como máquinas, ferramentas, linhas de produção e produtos — são estendidos com sensores, microcontroladores e interfaces de rede que os conectam a sistemas digitais.

Figura 1 – Componentes da Indústria 4.0.



Fonte: O Autor.

Segundo Rüßmann et al. (2015), os pilares tecnológicos que sustentam a Indústria 4.0, representados na Figura 1, incluem:

- **Sensores inteligentes e dispositivos IoT (*Internet of Things*):** responsáveis pela aquisição contínua de variáveis críticas do processo (temperatura, pressão, vibração, posição, entre outras), possibilitando a criação de gêmeos digitais (*digital twins*) dos sistemas físicos;
- ***Big Data* e análise de dados:** capacidade de coletar e analisar grandes volumes de dados heterogêneos em tempo real, otimizando a qualidade da produção, economizando energia e melhorando a manutenção dos equipamentos. Essa análise intensiva de dados – muitas vezes associada a algoritmos de IA (Inteligência Artificial) – permite tomada de decisão em tempo real baseada em informações abrangentes do chão de fábrica e dos sistemas de gestão;
- **Sistemas de computação em nuvem e em borda (*cloud* e *edge computing*):** utilização de infraestruturas de *cloud computing* para expandir a capacidade de armazenamento e processamento de dados das operações industriais. Na Indústria 4.0, cada vez mais dados de produção e informações corporativas são compartilhados via nuvem, muitas vezes entre diferentes plantas ou empresas parceiras. Isso permite escalabilidade, acesso remoto a serviços (como plataformas de projeto e colaboração) e análises integradas de dados em múltiplos locais, ao mesmo tempo em que avanços reduzem a latência de comunicação a níveis de milissegundos;
- **Integração horizontal e vertical de dados:** consiste em integrar todos os níveis da cadeia de valor e os diversos departamentos da empresa em uma única rede de informação. Na integração vertical, máquinas, linhas de produção, sistemas de controle e níveis gerenciais dentro da fábrica comunicam-se de forma contínua; na integração horizontal, essa comunicação se estende ao longo da cadeia produtiva, ligando fornecedores, fábrica, distribuidores e clientes em redes de valor automatizadas. Essa integração ampla permite cadeias de suprimentos altamente coordenadas e flexíveis, eliminando silos de informação e aumentando a agilidade do negócio;
- **Simulação (*Digital Twins*):** aplicação de modelos virtuais para simular produtos, processos e operações em ambiente digital. Com dados em tempo real dos sensores, é possível espelhar o mundo físico no virtual, testando e otimizando configurações de máquinas ou linhas de produção antes de mudanças no mundo real. Essa prática reduz tempos de setup, melhora a qualidade e antecipa problemas, aumentando a eficiência dos processos;
- **Automação autônoma:** com máquinas adaptativas, robôs colaborativos (*co-bots*) e sistemas auto-organizáveis, capazes de tomar decisões locais com base

em dados contextuais. Diferentemente da robótica tradicional, esses robôs inteligentes podem ajustar seu funcionamento de forma dinâmica e segura ao lado de trabalhadores humanos, aprendendo com as interações e tornando a produção mais eficiente;

- **Segurança cibernética e interoperabilidade:** com a crescente conectividade das fábricas inteligentes, aumenta-se exponencialmente a exposição a ameaças digitais. A cibersegurança torna-se pilar essencial para proteger sistemas industriais críticos e dados sensíveis. Protocolos robustos de comunicação segura, controle de acesso e mecanismos de proteção contra ataques são necessários para assegurar comunicações confiáveis e íntegras entre máquinas e sistemas. Sem estratégias de cibersegurança, os benefícios da Indústria 4.0 ficariam comprometidos frente aos riscos de interrupções ou invasões maliciosas;
- **Manufatura aditiva:** uso de tecnologias de impressão 3D para fabricação de peças e produtos. Inicialmente empregada para prototipagem, na Indústria 4.0 a manufatura aditiva é aplicada em escala maior para produzir pequenos lotes de componentes customizados, com geometrias complexas e designs otimizados (por exemplo, peças mais leves e resistentes). Sistemas de manufatura aditiva descentralizados podem reduzir distâncias de transporte e estoques, permitindo produção sob demanda e personalização em massa com eficiência;
- **Realidade aumentada:** integração do mundo virtual e físico por meio de dispositivos que apresentam informações digitais sobre o ambiente real. Aplicações de realidade aumentada auxiliam operadores e técnicos com instruções em tempo real, visualização de dados operacionais e suporte à tomada de decisão durante tarefas de manutenção, montagem ou treinamento. Embora ainda emergente, essa tecnologia tende a ampliar-se para aprimorar a capacitação de funcionários e a prestação de serviços, elevando a eficácia e a rapidez com que humanos interagem com sistemas complexos.

Esses pilares tecnológicos, atuando de forma convergente, formam a estrutura básica da Indústria 4.0. Em suma, a estrutura da Indústria 4.0 é caracterizada por uma conectividade ubíqua e pela integração inteligente de todos os elementos da cadeia produtiva, do chão de fábrica aos sistemas de gestão, habilitando novos patamares de eficiência e flexibilidade (Rodrigues; Fernandes; Sanjulião, s.d.).

2.1.1 Digitalização vs. Automação: Uma Dicotomia Estratégica

A visão futura da Indústria 4.0 prevê a criação de ecossistemas digitais, com integração horizontal entre empresas e vertical entre sistemas. Nesse contexto, emergem os *Smart Services*, ou serviços baseados em dados, como próxima fronteira da transformação digital. Esses serviços são estruturados a partir da maturidade digital prévia das organizações, e

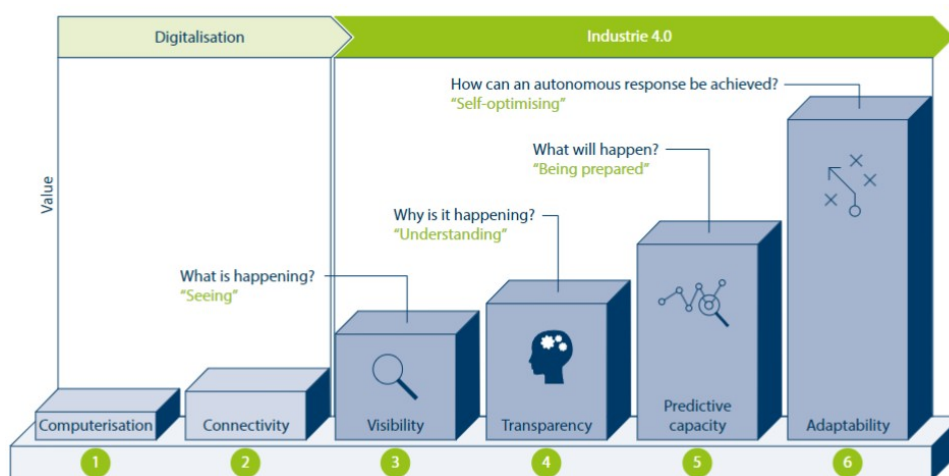
representam novas formas de geração de valor (Dumitrescu; Riemensperger; Schuh, 2023). PwC (2016) argumenta que saltos prematuros para automação robótica sem maturidade digital geram “fábricas obscuras” (*dark factories*), onde sistemas automatizados operam sem visibilidade analítica. A opção por priorizar digitalização, como adotado neste trabalho, corrobora as estratégias de Porter e Heppelmann (2015) para evolução industrial faseada.

2.2 ÍNDICE DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0

A Acatech, Academia Nacional de Ciências da Alemanha, desenvolveu um modelo de maturidade para servir de ferramenta prática para diagnosticar a situação digital de empresas e traçar estratégias de transformação. Além do modelo conceitual, são fornecidas diretrizes metodológicas para aplicação do índice, análise de lacunas e planejamento estratégico com base em valor (Schuh et al., 2020a).

O modelo já teve, até o momento de redação deste trabalho, mais de 2000 aplicações em empresas de setores variados, como automotivo, farmacêutico e eletrônico. A aplicação do índice é feita em três etapas: (1) avaliação da maturidade digital atual através de uma entrevista com representantes da empresa, (2) identificação de lacunas e (3) planejamento estratégico para a transformação digital. A avaliação é realizada por meio de um questionário que abrange cinco dimensões: (1) produtos e serviços, (2) processos, (3) organização, (4) cultura e (5) tecnologia. Cada dimensão é subdividida em subcategorias que permitem uma análise detalhada da situação atual da empresa.

Figura 2 – Representação dos seis níveis do Índice de Maturidade da Indústria 4.0 segundo a metodologia da Acatech.



Fonte: (Schuh et al., 2020a)

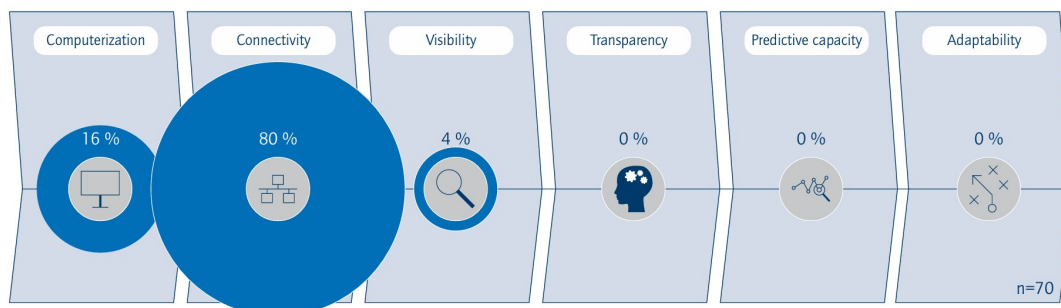
O índice proposto por Acatech (2016) é dividido em estágios, organizados em uma progressão que inicia na digitalização dos processos e culmina na adaptabilidade autônoma

do sistema produtivo, exibidos na Figura 2. Cada nível representa um grau crescente de maturidade digital, com foco em diferentes aspectos da operação industrial. Os níveis são:

- Nível 1 (Informatização): Uso isolado de sistemas informatizados;
- Nível 2 (Conectividade): Integração básica de dispositivos;
- Nível 3 (Visibilidade Digital): Monitoramento centralizado de processos;
- Nível 4 (Transparência): Análise preditiva via *big data* e relações causa-efeito;
- Nível 5 (Previsibilidade): Automação com IA (Inteligência Artificial);
- Nível 6 (Adaptabilidade): Ecossistemas autoorganizáveis.

Segundo estudo conduzido pelo Industrie 4.0 Maturity Center da RWTH Aachen com 70 avaliações aplicadas em empresas industriais europeias, constatou-se que 80% das organizações estavam no nível 2 do modelo Acatech — Conectividade — enquanto apenas 4% haviam atingido o nível 3 — Visibilidade, como ilustra a Figura 3. Nenhuma empresa foi classificada nos níveis mais avançados (Transparência, Capacidade preditiva ou Adaptabilidade). Na dimensão de recursos, 49% das organizações ainda se encontravam no estágio 1 — Informatização — indicando que sensores, máquinas e sistemas de produção ainda não estavam conectados de forma estruturada nem geravam dados em tempo real (Schuh et al., 2020b).

Figura 3 – Empresas por média geral de nível de maturidade; n=70.



Fonte: (Schuh et al., 2020b)

Apesar de amplamente utilizado no contexto europeu, o modelo da Acatech não disponibiliza publicamente seus instrumentos de avaliação (como o questionário oficial), o que limita sua aplicação direta em pesquisas acadêmicas e projetos industriais externos. Além disso, sua elaboração foi pensada a partir da realidade de grandes empresas alemãs, podendo não refletir integralmente os desafios enfrentados por organizações de menor porte ou inseridas em economias emergentes.

Nesse contexto, surge a proposta desenvolvida por Santos (2018), que apresenta um modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 adaptado à realidade de empresas brasileiras. Este modelo foi desenvolvido a partir da análise crítica e comparativa de

frameworks internacionais, como o próprio índice da Acatech (Schuh et al., 2020a), o modelo IMPULS-VDMA (VDMA, 2016) e o modelo de Schumacher, Erol e Sihn (2016). Essas referências forneceram as bases conceituais e estruturais para a formulação de um modelo alinhado às especificidades culturais, tecnológicas e econômicas do contexto brasileiro.

A proposta de Santos (2018) estrutura-se em cinco dimensões principais, capazes de capturar tanto os aspectos tecnológicos quanto organizacionais e culturais necessários para a transformação digital, conforme descrito a seguir:

- **Estratégia, Estrutura e Cultura Organizacional:** Avalia o alinhamento da gestão com os princípios da Indústria 4.0, considerando a governança, a cultura de inovação, a gestão da mudança e a orientação para dados.
- **Equipes de Trabalho:** Analisa o nível de capacitação digital, a flexibilidade, a autonomia dos colaboradores e o grau de abertura da força de trabalho à transformação tecnológica.
- **Fábricas Inteligentes:** Mede o grau de digitalização dos ambientes produtivos, incluindo o uso de sensores, CPS, redes industriais e capacidade de coleta e tratamento de dados operacionais.
- **Processos Inteligentes:** Avalia a digitalização dos processos internos e externos, a integração de sistemas, o uso de análise de dados e a capacidade de realizar otimizações baseadas em informações em tempo real.
- **Produtos e Serviços Inteligentes:** Considera a incorporação de funcionalidades digitais aos produtos e a oferta de serviços inteligentes, como manutenção preditiva, atualizações remotas e monitoramento em campo.

Cada uma dessas dimensões é avaliada em uma escala de cinco níveis de maturidade, indo do estágio inicial (nível 1 — *Inexistente ou Básico*) até o nível 5 (*Altamente Desenvolvido ou Otimizado*), permitindo que a organização visualize sua posição atual, identifique lacunas e defina metas de evolução alinhadas à Indústria 4.0.

A avaliação é feita por meio de uma entrevista estruturada com representantes da organização, usando o questionário disponibilizado no Apêndice A, com todas as questões organizadas por dimensão e acompanhadas da respectiva escala de avaliação. A partir dessa coleta, é possível gerar um relatório de maturidade que apresenta o nível alcançado, as áreas de melhoria e recomendações práticas para a evolução digital.

A principal contribuição do modelo de Santos (2018) reside na sua adequação ao contexto brasileiro, sendo especialmente aplicável a empresas que operam com baixo grau de digitalização, estruturas produtivas manuais e limitações orçamentárias. Além disso, o modelo oferece critérios claros, objetivos e de fácil compreensão, favorecendo a aplicação prática tanto por consultores quanto por profissionais internos das organizações.

2.3 DIGITALIZAÇÃO DE LINHAS DE PRODUÇÃO ARTESANAIS

Indústrias fabricantes de materiais elétricos engenheirados frequentemente operam sob os modelos produtivos MTO (*Make-to-Order*) e ETO (*Engineer-to-Order*). No modelo MTO, a fabricação tem início apenas após a confirmação do pedido, com base em projetos padronizados ou levemente adaptáveis. Já o modelo ETO envolve o desenvolvimento de um novo projeto de engenharia para cada pedido, exigindo customização profunda do produto e maior envolvimento técnico nas etapas iniciais (Gosling; Naim, 2015). Ambos os modelos resultam em processos altamente personalizados, variáveis e com elevado grau de intervenção manual, características que tornam a digitalização um desafio expressivo. A ausência de padronização e a dependência de habilidades específicas de operadores dificultam a automação, sobretudo em etapas produtivas críticas, tornando a digitalização inicial um passo fundamental para alcançar visibilidade e eficiência operacional. Essa digitalização requer, inicialmente, a formalização dos POP (Procedimento Operacional Padrão).

Nesses cenários, em que a automação total se mostra economicamente inviável ou tecnicamente exequível com base no estado da arte, digitalizar a coleta dos indicadores de produtividade e qualidade representa um caminho viável para iniciar a transformação digital. A chamada sombra digital (*digital twin*) da produção — ou seja, a representação virtual contínua dos estados e eventos do ambiente fabril — depende da captura estruturada de dados operacionais, mesmo que originados de processos manuais. Ao centralizar essas informações em sistemas digitais, a empresa passa a monitorar, auditar e analisar os dados em tempo real, criando subsídios para a construção de *dashboards*, geração de alertas e formulação de análises históricas. Isso viabiliza uma base sólida para a futura automação e padronização dos processos produtivos.

2.4 MODELAGEM DE PROCESSOS COM BPMN

A BPMN (*Business Process Model and Notation*), notação criada pela OMG (*Object Management Group*) em sua versão 2.0.2, é uma notação padronizada que foi projetada para ser intuitiva e acessível, mesmo para usuários sem conhecimento técnico em linguagens de programação, ao mesmo tempo em que é suficientemente formal para permitir a execução automatizada dos processos modelados (Object Management Group, 2013). Seu principal objetivo é facilitar a comunicação entre analistas de negócio, desenvolvedores de sistemas e operadores que interagem com os processos organizacionais. Sua estrutura semântica e sintática suporta a descrição de processos operacionais complexos, incluindo subprocessos, eventos intermediários, *gateways* de decisão e fluxos condicionais, tornando-a adequada para o contexto industrial onde há múltiplas interações simultâneas entre pessoas, máquinas e sistemas.

A construção de um diagrama BPMN envolve a combinação de elementos que

representam atividades, eventos, decisões e fluxos. Seus componentes se dividem em:

- **Eventos:** Representados por círculos, como demonstra a Figura 4, indicam pontos de início, término ou alteração no estado do processo. Podem ser do tipo *Start*, *Intermediate* ou *End*, e frequentemente estão associados a mensagens, temporizadores ou exceções. No contexto industrial, podem representar gatilhos como a chegada de uma ordem de produção, ou então o recebimento de uma matéria-prima.

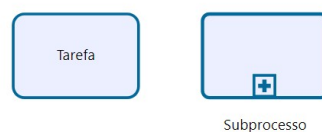
Figura 4 – Exemplo de eventos na notação BPMN.



Fonte: O Autor.

- **Atividades:** Representadas por retângulos com cantos arredondados, descrevem tarefas ou subprocessos, exemplificados na Figura 5, executados ao longo do fluxo. No contexto industrial, podem representar operações como “montar disjuntor”, “realizar teste de isolamento” ou “preencher *Check List* de inspeção elétrica”, refletindo ações específicas realizadas por operadores ou técnicos durante a produção e a verificação dos equipamentos.

Figura 5 – Exemplo de atividades na notação BPMN.



Fonte: O Autor.

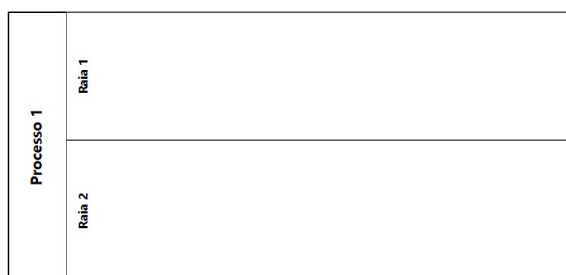
- **Gateways:** Indicados por losangos, representados pela Figura 6, definem pontos de decisão ou de controle de fluxo. Exemplificando, um gateway exclusivo (*exclusive gateway*) pode ser usado para modelar a lógica condicional de qualidade: “Produto aprovado?” seguido de caminhos distintos para retrabalho ou liberação.
- **Raias:** São áreas que dividem o processo entre diferentes participantes ou departamentos, como pode ser observado na Figura 7. Cada *pool* representa um ator principal (ex: Departamento de Produção de Equipamentos Elétricos), e as *Raias* subdividem as responsabilidades internas (ex: Montagem de Painéis).

Figura 6 – Exemplo de *gateway* na notação BPMN.

Gateway

Fonte: O Autor.

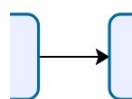
Figura 7 – Exemplo de raias na notação BPMN.



Fonte: O Autor.

- **Conectores:** Setas que representam a sequência de execução entre os elementos. Permitem o rastreamento visual da lógica temporal e condicional do processo. Podem ser observados na Figura 8, onde as setas conectam eventos, atividades e *gateways*, formando o fluxo do processo.

Figura 8 – Exemplo de conectores na notação BPMN.



Fonte: O Autor.

A modelagem correta com BPMN segue uma lógica hierárquica e modular, iniciando pela definição do escopo e das fronteiras do processo, identificação dos participantes, levantamento das atividades principais e mapeamento dos pontos de decisão e eventos críticos. Essa abordagem permite que o modelo represente tanto processos simples (ex: preenchimento de um *Check List* de qualidade) quanto sistemas complexos com múltiplos fluxos paralelos, subprocessos aninhados e interações entre setores.

2.5 BANCOS DE DADOS RELACIONAIS NA INDÚSTRIA

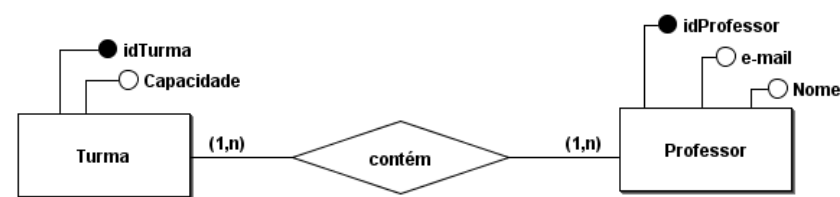
Um banco de dados é uma coleção organizada de informações ou dados estruturados, tipicamente armazenados eletronicamente em um sistema de servidor e projetado para ser robusto, facilmente acessível, gerenciado e atualizado (Elmasri; Navathe, 2010). Ele pode ser configurado de diversas formas, utilizando diferentes modelos de dados como relacional, hierárquico, em rede ou orientado a objetos, cada um adequado a diferentes tipos de aplicação e requisitos de armazenamento.

Fundamentados no modelo proposto por Codd (1970), bancos de dados relacionais estruturam os dados em tabelas inter-relacionadas, com suporte à normalização e integridade referencial. Essa organização viabiliza operações por meio da linguagem SQL (*Structured Query Language*) e da adoção das propriedades ACID (Atomicidade, Consistência, Isolamento e Durabilidade) as quais são indispensáveis em cenários de alta concorrência transacional, como linhas de produção com múltiplos pontos de entrada e atualização simultânea de registros (Elmasri; Navathe, 2010).

2.5.1 Modelagem Conceitual vs. Lógica

A migração de planilhas e registros informais para um SGBD (Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados) exige a definição estruturada do modelo de dados. A modelagem conceitual, representada em um exemplo pela Figura 9 consiste na identificação de entidades do domínio, seus atributos e os relacionamentos entre elas. No contexto acadêmico, por exemplo, entidades como *Professor* e *Turma* representam abstrações diretas. Essa etapa busca descrever a lógica do negócio de forma independente da tecnologia utilizada na implementação.

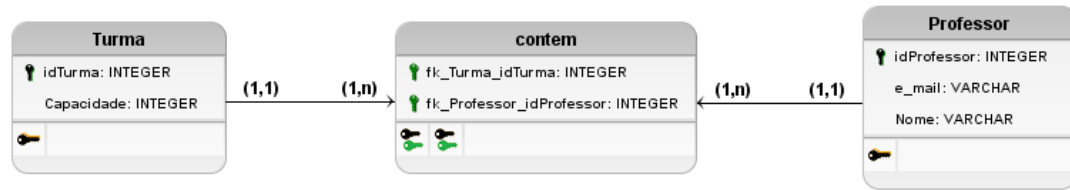
Figura 9 – Exemplo de modelagem conceitual da relação entre turmas e professores.



Fonte: O Autor.

A modelagem lógica transforma essa estrutura em tabelas com chaves primárias e estrangeiras, índices e restrições, levando em conta requisitos de desempenho e limitações da plataforma de destino. A Figura 10 exemplifica a modelagem lógica de um banco de dados relacional, onde as entidades do modelo conceitual são convertidas em tabelas com colunas representando atributos e relacionamentos definidos por chaves estrangeiras.

Figura 10 – Exemplo de modelagem lógica de um banco de dados relacional.



Fonte: O Autor.

Iniciar o projeto de banco de dados pela modelagem conceitual é essencial para garantir que a estrutura final reflita fielmente os requisitos informacionais do processo produtivo, servindo como base para validação junto aos usuários finais, reduzindo a ocorrência de retrabalho e desalinhamentos durante as fases subsequentes de desenvolvimento.

2.5.2 Integração entre Sistemas de Gestão e o Chão de Fábrica

Sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*) são plataformas de gestão integradas que centralizam as informações de diferentes áreas de uma empresa, como finanças, compras, estoque, recursos humanos, vendas e planejamento de produção. Ao consolidar dados em uma única base, os ERPs permitem maior padronização dos processos, reduzem a redundância de informações e viabilizam a análise gerencial com maior consistência e agilidade (Magal; Word, 2011). Em ambientes industriais, os módulos de planejamento da produção, controle de materiais, manutenção de ativos e qualidade são especialmente relevantes para alinhar as operações às demandas do negócio.

Por sua vez, os sistemas MES (*Manufacturing Execution System*) atuam como a camada de gestão e controle no nível do chão de fábrica, monitorando a execução das ordens de produção em tempo real, rastreando produtos durante o processo produtivo, coletando dados operacionais e registrando eventos relevantes, como início e término de atividades, paradas, perdas e rejeições (MESA, 1997). Enquanto o ERP organiza as informações de forma estratégica e administrativa, o MES conecta-se diretamente aos processos produtivos, oferecendo visibilidade detalhada sobre o desempenho das operações e permitindo tomadas de decisão mais ágeis no nível operacional.

A integração entre ERP e MES é essencial para que as informações do planejamento e da gestão estratégica se alinhem aos dados reais das operações fabris. Sem essa integração, é comum que apontamentos de produção, registros de qualidade e informações de produtividade sejam feitos de forma manual ou paralela, dificultando a atualização dos dados em tempo real e limitando a análise de desempenho. Conforme apontam Schuh et al. (2020a) e Monostori, Kádár, Bauernhansl et al. (2016), essa falta de conexão entre níveis estratégico e operacional é um dos principais fatores que limitam o avanço da maturidade digital nas empresas.

2.6 REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMAS UML

A UML (*Unified Modeling Language*) é um padrão amplamente utilizado para modelagem de sistemas de software, sendo adotada tanto no meio acadêmico quanto na indústria. Trata-se de uma linguagem gráfica que permite descrever, visualizar, especificar, construir e documentar artefatos de sistemas de software, bem como processos de negócio e sistemas não computacionais (Booch; Rumbaugh, 2006).

Esta ferramenta de modelagem desempenha um papel relevante ao permitir a formalização dos modelos de dados, fluxos de informação, processos e interações entre componentes do sistema. Sua utilização facilita a comunicação entre profissionais de diferentes áreas, promovendo entendimento comum entre engenheiros, desenvolvedores e gestores.

2.6.1 Principais Diagramas UML aplicáveis na Arquitetura Digital

Os diagramas UML podem ser classificados em dois grandes grupos: diagramas estruturais e diagramas comportamentais (Booch; Rumbaugh, 2006). No contexto deste trabalho, os diagramas estruturais são fundamentais para descrever a organização dos dados e dos componentes do sistema, enquanto os diagramas comportamentais são empregados na modelagem dos processos e fluxos de informação.

- **Diagrama de Classes:** Representa a estrutura estática do sistema, descrevendo as classes, seus atributos, métodos e os relacionamentos entre elas, como associações, heranças, dependências e agregações. Esse diagrama permite visualizar a organização e as responsabilidades dos objetos no sistema, sendo essencial na etapa de análise e projeto de *software* para garantir uma compreensão clara da arquitetura e das regras de negócio.
- **Diagrama de Casos de Uso:** Representa as funcionalidades de um sistema do ponto de vista dos usuários ou atores externos. Ele descreve as interações entre os atores e os casos de uso, que correspondem aos serviços ou comportamentos esperados do sistema. Esse diagrama é fundamental na etapa de levantamento de requisitos, pois permite capturar e comunicar de forma clara o que o sistema deve fazer, sem se preocupar com sua implementação interna. Além disso, auxilia na definição dos limites do sistema e no entendimento das necessidades dos usuários.
- **Diagrama de Atividades:** Utilizado para representar fluxos de trabalho, processos ou comportamentos dinâmicos de um sistema. Ele descreve a sequência de atividades, decisões, paralelismos e sincronizações, permitindo visualizar como os processos são executados. É especialmente útil para modelar processos de negócios, algoritmos e fluxos operacionais, evidenciando tanto a ordem das atividades quanto as condições que regem suas transições.

2.7 MÉTRICAS DE PRODUÇÃO EM PROCESSOS NÃO-AUTOMATIZADOS

Indicadores-chave de desempenho, ou KPIs (*Key Performance Indicators*), são métricas quantificáveis utilizadas para avaliar a eficiência e a eficácia de processos, pessoas, equipamentos ou sistemas, com base em metas estabelecidas previamente. No contexto produtivo, KPIs típicos incluem taxa de ocupação da mão de obra, tempo de ciclo, disponibilidade de recursos, índice de retrabalho, MTBF (*Mean Time Between Failures*), MTTR (*Mean Time To Repair*), e o OEE.

Em ambientes com baixa ou nenhuma automação torna-se necessário priorizar indicadores que possam ser levantados com base em observações diretas, formulários preenchidos por operadores, supervisores ou coletados via interfaces digitais simples. Dessa forma, os KPIs utilizados neste estudo incluem:

- Taxa de produtividade (*output* por hora ou por turno);
- Taxa de retrabalho (% de produtos que retornam ao processo);
- Índice de disponibilidade (tempo produtivo em relação ao tempo planejado);
- Eficiência operacional global adaptada (OEE adaptado);
- Tempo médio entre falhas (MTBF);
- Tempo médio para reparo (MTTR).

A seleção desses indicadores visa equilibrar a relevância para a gestão da produção com a viabilidade de coleta nos processos manuais observados, mantendo o foco na geração de dados confiáveis para apoiar a melhoria contínua.

2.7.1 OEE Adaptado para Operações Manuais

O indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), proposto por Nakajima (1988), é amplamente utilizado na indústria para mensurar a efetividade de máquinas e equipamentos produtivos. O cálculo tradicional do OEE é dado por:

$$OEE = A \times P \times Q \quad (1)$$

onde:

$$A \text{ (Disponibilidade)} = \frac{\text{Tempo disponível} - \text{Paradas}}{\text{Tempo disponível}} \quad (2)$$

$$P \text{ (Performance)} = \frac{\text{Quantidade produzida} \times \text{Tempo de Ciclo Ideal}}{\text{Tempo operacional}} \quad (3)$$

$$Q \text{ (Qualidade)} = \frac{\text{Quantidade produzida} - \text{Quantidade defeituosa}}{\text{Total produzido}} \quad (4)$$

Entretanto, esse modelo pressupõe a existência de sensores e sistemas automatizados capazes de registrar automaticamente paradas, ciclos de produção e taxas de rejeição — realidade distante para ambientes industriais não-automatizados.

Para contornar essa limitação, Muchiri e Pintelon (2008) discutem adaptações metodológicas do OEE para operações manuais. Nessas situações, propõe-se que:

- A **disponibilidade** seja calculada com base nos apontamentos manuais de tempo produtivo versus tempo planejado;
- A **performance** seja estimada com base em metas empíricas, como unidades por turno, ao invés do tempo de ciclo ideal;
- A **qualidade** continue sendo mensurada por meio da proporção de unidades conformes em relação ao total produzido, com registros feitos manualmente ou digitalmente.

Assim, o OEE adaptado mantém a estrutura conceitual do modelo original, mas flexibiliza os critérios de cálculo para contextos em que a instrumentação automática não está disponível. A equação é mantida:

$$\text{OEE}_{\text{adaptado}} = A_{\text{manual}} \times P_{\text{estimado}} \times Q \quad (5)$$

O uso disciplinado de formulários de coleta (sejam físicos ou digitais), a padronização dos registros e a análise periódica dos dados tornam-se condições indispensáveis para garantir a confiabilidade do indicador. Essa abordagem permite o acompanhamento sistemático da eficiência operacional mesmo em contextos com forte dependência da atuação humana, como é o caso de operações manuais, células artesanais ou linhas semiautomatizadas.

2.8 QR CODE COMO TECNOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DIGITAL

Para que a interoperabilidade entre ativos físicos e sistemas digitais ocorra de forma precisa e rastreável, torna-se necessário adotar mecanismos robustos de identificação. Nesse contexto, o QR Code (*Quick Response Code*) destaca-se como uma tecnologia de codificação bidimensional capaz de armazenar dados estruturados em espaços físicos reduzidos, permitindo que produtos, componentes e documentos sejam identificados, acessados e rastreados digitalmente ao longo de seu ciclo de vida.

O QR Code foi originalmente desenvolvido pela empresa japonesa Denso Wave em 1994 para aplicações logísticas na indústria automotiva. Diferente dos códigos de barras unidimensionais, que armazenam dados apenas em uma direção, o QR Code utiliza uma matriz bidimensional que permite o armazenamento de até 7.089 caracteres numéricos ou 2.953 caracteres alfanuméricos em sua versão mais robusta (versão 40) (International Organization for Standardization, 2018). Essa capacidade torna o QR Code especialmente

adequado para aplicações industriais, onde a complexidade dos dados requer flexibilidade de codificação.

Segundo a especificação ISO/IEC 18004:2018 (International Organization for Standardization, 2018), o QR Code suporta codificação de diferentes tipos de dados, incluindo textos, URLs (*Uniform Resource Locators*), estruturas JSON (*JavaScript Object Notation*) e binários, o que o torna compatível com sistemas informatizados e aplicativos móveis. Na indústria, o QR Code é amplamente utilizado em processos de rastreabilidade, manutenção, controle de qualidade, controle de inventário e integração com MES.

Além de sua capacidade de armazenamento, o QR Code, representado na Figura 11, oferece redundância interna de dados por meio de algoritmos de correção de erro Reed-Solomon, garantindo que até 30% da imagem possa ser danificada ou suja sem comprometer a leitura dos dados. Isso o torna particularmente eficaz em ambientes industriais agressivos, nos quais poeira, óleo e abrasão são comuns (Wang et al., 2016).

Figura 11 – Exemplo de QR Code que leva ao site da UFSC.



Fonte: O Autor.

Diversas abordagens têm explorado o uso de QR Codes como conectores entre o mundo físico e os sistemas digitais. Em aplicações modernas, é comum embutir estruturas JSON no conteúdo do código, permitindo que, ao ser escaneado, o sistema receptor interprete e manipule os dados de forma programável, seja para alimentar bancos de dados, atualizar *dashboards* ou associar um item físico a um processo digital específico.

A leitura do QR Code pode ser feita por dispositivos móveis, coletores industriais ou interfaces embarcadas, e sua utilização independe de conexão contínua à internet, característica que o diferencia de tecnologias como RFID (*Radio Frequency Identification*). Além disso, seu baixo custo de geração e impressão o torna viável para aplicações em larga escala, inclusive em operações com baixa maturidade digital, nas quais a automação ainda não é plenamente adotada.

3 UMA ESTRATÉGIA PARA O DIAGNÓSTICO DA MATURIDADE DIGITAL E INÍCIO DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

Este capítulo descreve a abordagem metodológica adotada para alcançar os objetivos definidos no Capítulo 1, os quais envolvem a avaliação da maturidade digital e a proposição de uma arquitetura conceitual voltada à digitalização de empresas industriais que operam no modelo ETO.

Diferente de um estudo de caso real com coleta de dados em campo, este trabalho adota uma abordagem prescritiva: define-se uma situação-problema hipotética comum a muitas indústrias com baixo grau de digitalização, e demonstra-se como a transição digital poderia ser estruturada com base em metodologias consolidadas na literatura. A prova de conceito implementada busca validar os principais componentes da arquitetura proposta, com especial foco na coleta estruturada de dados de produtividade e qualidade.

3.1 EXPECTATIVAS EM RELAÇÃO À IMPLANTAÇÃO DA ESTRATÉGIA

A estratégia proposta neste trabalho visa fornecer uma base prática e escalável para a transição de ambientes produtivos, com as mesmas premissas da empresa hipotética proposta, a um estágio inicial de visibilidade operacional. Espera-se que com a implementação desta solução seja possível eliminar registros manuais dispersos, centralizar dados operacionais em estruturas digitais rastreáveis e criar as condições mínimas para análises sistemáticas de desempenho.

Além disso, ao propor um modelo aplicável a empresas com mesmas características — produção sob encomenda, forte personalização e baixa digitalização — este trabalho busca contribuir para a discussão acadêmica e prática sobre estratégias de digitalização gradual em setores industriais com alta complexidade técnica e baixa padronização.

3.2 ETAPAS DA ESTRATÉGIA

A execução do trabalho foi dividida nas seguintes etapas principais, ilustradas sequencialmente pela Figura 12 e descritas à seguir:

1. **Construção de um cenário industrial hipotético:** A primeira etapa consistiu na definição de uma hipótese industrial realista, baseada em observações e padrões de operação típicos em empresas do setor de fabricação de materiais elétricos. Considerou-se uma fábrica com produção ETO, com forte componente artesanal e baixa padronização, onde a maior parte dos registros de produção e qualidade ainda é feita manualmente, sem integração com o sistema ERP.
2. **Proposição de avaliação de maturidade digital:** Dada a natureza hipotética do estudo, foram adotados dois modelos consolidados para descrever como a avaliação de maturidade digital seria conduzida na empresa:

Figura 12 – Etapas da estratégia proposta para a Transformação Digital.



Fonte: O Autor.

- **Entrevista usando a metodologia de Santos (2018):** metodologia portuguesa estruturada em cinco dimensões — Estratégia, Estrutura e Cultura Organizacional; Equipes de Trabalho; Fábricas Inteligentes; Processos Inteligentes; e Produtos e Serviços Inteligentes — que permite avaliar de forma abrangente as capacidades digitais de uma organização.
 - **Análise Observacional com base na Metodologia Acatech:** proposta de abordagem baseada na metodologia europeia, que é estruturada em sete níveis de maturidade que vão da informatização à adaptabilidade (Schuh et al., 2020a). O modelo proposto avalia os processos que compõem a cadeia produtiva e os classifica quanto à maturidade digital.
3. **Definição de estratégia de digitalização:** Com base no diagnóstico hipotético de baixa maturidade digital, definiu-se como prioridade a obtenção de *visibilidade operacional*, primeira etapa para a construção de um sistema digital integrado. Para isso, propôs-se a digitalização da coleta de dados de produtividade e qualidade em processos manuais, utilizando plataformas de baixo custo e rápida implementação.

A estratégia priorizou:

- Digitalização sem automação física (primeiro digitalizar, depois automatizar);
- Definição de modelos conceituais de dados e fluxos de informação;
- Estabelecimento dos requisitos necessários para a rastreabilidade digital com identificação por QR Code;
- Criação dos modelos já pensando no suporte a futuras automações dos processos físicos, dos sistemas de informação e dos modelos de gestão.

4. **Proposição da arquitetura digital:** Foi concebida uma arquitetura digital orientada à captura, armazenamento, rastreamento e análise de indicadores operacionais. Essa arquitetura é composta por:

- **Modelo Conceitual do Banco de Dados:** Representação das entidades-chave do processo produtivo, como ordens de produção, produtos, operadores, registros de qualidade e produtividade, bem como seus atributos e relacionamentos.
- **Fluxo de Dados e Integração:** Definição dos caminhos pelos quais os dados circulam, desde sua origem nos processos produtivos até sua consolidação em bancos de dados operacionais e sistemas de gestão.
- **Mecanismos de Rastreabilidade:** Proposta de adoção de sistemas de identificação digital (como QR Codes, RFID ou outros), que permitam rastrear os produtos e processos.
- **Governança da Informação:** Definição de políticas, estruturas e responsabilidades necessárias para assegurar a integridade, disponibilidade e confiabilidade dos dados operacionais.

A arquitetura foi desenhada para garantir interoperabilidade e facilidade de manutenção.

5. **Análise dos resultados e proposição de etapas futuras:** A análise considerou os benefícios potenciais proporcionados pela adoção da arquitetura proposta, tais como a eliminação de registros manuais, aumento da rastreabilidade, padronização da coleta de dados e suporte à gestão baseada em indicadores.

A metodologia prevê que, a partir dessa base conceitual, a empresa poderia avançar para:

- Planejamento da integração com sistemas legados, como ERP e MES;
- Implantação de sensores e automação física nos processos produtivos;
- Desenvolvimento de modelos preditivos e análises avançadas baseadas em dados históricos;

- Evolução para conceitos mais avançados, como gêmeos digitais e sistemas autônomos.

3.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa tem caráter prescritivo e conceitual, fundamentando-se em uma hipótese industrial construída a partir de padrões comuns observados em empresas brasileiras com baixa maturidade digital. Por essa razão, não foram realizadas coletas de dados em ambiente produtivo real, nem validações experimentais das soluções propostas.

Consequentemente, os resultados apresentados — embora aderentes às práticas consolidadas na literatura — devem ser compreendidos como um guia inicial de estruturação conceitual, sujeito à adaptação e customização conforme as particularidades de cada organização real. A aplicação prática da arquitetura digital e a análise empírica dos indicadores propostos são identificadas como etapas futuras e complementares à presente pesquisa.

4 DIAGNÓSTICO DA MATURIDADE DIGITAL DA EMPRESA HIPO-TÉTICA

Este capítulo apresenta o diagnóstico da maturidade digital da empresa hipotética, construída como objeto de estudo representativo de uma parcela significativa da indústria brasileira. Na seção 4.1, é realizada uma caracterização detalhada do cenário produtivo, que não foi feita realizada de uma forma arbitrária: ela baseia-se em uma análise crítica da literatura especializada e de levantamentos institucionais recentes sobre o nível médio de maturidade digital no setor industrial nacional. Na seção 4.2, são descritas as metodologias adotadas para avaliação da maturidade digital, abrangendo tanto a análise perceptiva, fundamentada na metodologia proposta por Santos (2018), quanto uma proposta de análise observacional dos processos produtivos, baseada na metodologia da Acatech (Schuh et al., 2020a). Já na seção 4.3, é discutida a forma para como os resultados obtidos nas avaliações devem ser interpretados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E OBJETO DE ESTUDO

Este trabalho adota como objeto de estudo uma empresa hipotética representativa do setor de fabricação de equipamentos elétricos sob encomenda. A caracterização da empresa hipotética foi elaborada a partir da revisão de literatura especializada sobre os desafios da digitalização no Brasil (Santos, 2018), de relatórios institucionais recentes sobre a Indústria 4.0 no país (Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2020), bem como da identificação de padrões recorrentes em empresas com baixa maturidade digital — tais como ausência de sistemas integrados, registros manuais de produção, dificuldade de rastreabilidade e limitações na coleta de dados operacionais.

A pesquisa “*Sondagem Especial Indústria 4.0: Cinco Anos Depois*” (Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2022) mostra que, apesar de avanços em alguns setores, 58% das indústrias brasileiras ainda não adotam nenhuma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, e apenas 23% utilizam duas ou mais tecnologias combinadas, indicando uma maturidade digital ainda bastante restrita. Dados semelhantes são apontados no relatório “*A Difusão das Tecnologias da Indústria 4.0 em Empresas Brasileiras*” (Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2020), que destaca que a transformação digital nas indústrias nacionais ocorre de forma desigual, lenta e concentrada principalmente em empresas de maior porte.

Esse panorama é reconhecido, inclusive, na formulação de políticas públicas recentes, como o programa NIB (Nova Indústria Brasil), lançado em 2024, que estabelece como prioridade nacional a modernização das plantas industriais brasileiras — tendo como meta até 2033 digitalizar 50% das indústrias brasileiras — reconhecendo a baixa adoção de tecnologias digitais como uma das principais limitações à competitividade do país (Agência Brasil, 2024).

Dessa forma, a empresa fictícia proposta neste estudo representa de maneira sintética e realista o perfil médio encontrado em grande parte da indústria nacional que atua sob demanda e enfrenta obstáculos estruturais à transformação digital. A intenção é utilizar esse cenário como base para avaliar o nível de maturidade digital segundo metodologias reconhecidas e, a partir disso, propor uma estratégia de digitalização compatível com sua realidade.

Embora cada projeto desenvolvido pela empresa varie conforme as especificações técnicas do cliente, é possível identificar um conjunto típico de macroetapas recorrentes em ambientes industriais ETO. Essas etapas geralmente envolvem:

- **Preparação técnica e engenharia do produto:** A partir da solicitação do cliente, é realizada a análise de requisitos, definição do escopo técnico e desenvolvimento dos desenhos e especificações de projeto. Essa fase costuma envolver múltiplas áreas, como engenharia elétrica, mecânica e qualidade.
- **Planejamento e emissão de ordens de produção:** Com base no projeto aprovado, são emitidas ordens de fabricação e ordens de compra, com estruturação da lista técnica (BOM), definição de materiais, e roteiros produtivos. Os dados são inseridos em sistemas ERP e desdobrados para os setores envolvidos.
- **Processamento de componentes e submontagens:** As células produtivas realizam a fabricação ou montagem de subconjuntos elétricos e mecânicos, com elevado grau de intervenção manual e variação entre lotes. A rastreabilidade e os registros de produtividade ainda são realizados de forma manual em papel.
- **Integração e montagem final do equipamento:** Os subconjuntos são integrados conforme o arranjo técnico definido, com validações funcionais e mecânicas. Essa etapa demanda acompanhamento próximo dos operadores e verificação contínua da conformidade dimensional e elétrica, com preenchimento de *Check Lists* em papel.
- **Ensaio e testes de conformidade:** Antes da liberação, os produtos passam por ensaios funcionais, elétricos e mecânicos. Os dados gerados são, em muitos casos, anotados manualmente e posteriormente transcritos para sistemas digitais.
- **Expedição e documentação técnica:** Após aprovação nos testes, o produto é embalado e enviado ao cliente, acompanhado de documentação técnica, relatórios de ensaio e instruções específicas. A rastreabilidade de componentes e registros de inspeção é essencial neste momento.

Mesmo em organizações com boa estrutura de engenharia, é comum que as etapas produtivas apresentem diferentes graus de digitalização, sendo a coleta sistemática de dados uma das principais fragilidades enfrentadas por empresas com baixa maturidade digital.

4.2 PROPOSIÇÃO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DIGITAL

A avaliação da maturidade digital é uma etapa fundamental no processo de transformação rumo à Indústria 4.0, pois permite compreender o nível atual da empresa em termos de digitalização, integração de dados, automação e desenvolvimento organizacional. É a partir dela que se definem estratégias realistas, alinhadas às capacidades e limitações da organização, que vão determinar os próximos passos para a construção de ambientes produtivos cada vez mais conectados, visíveis e integrados, além de se verificar a conformidade com as boas práticas de desenvolvimento.

Neste trabalho, propõe-se uma abordagem metodológica de diagnóstico baseada em dois modelos consolidados na literatura — o modelo desenvolvido por Santos (2018), e o Índice de Maturidade Digital da Acatech (Schuh et al., 2020a). O primeiro estrutura a análise por meio de entrevistas aplicadas a diferentes níveis hierárquicos da organização, abrangendo aspectos tecnológicos, organizacionais e humanos. No segundo modelo, será proposta uma perspectiva observacional em que são mapeados os processos que compõem o fluxo produtivo da organização, para assim quantificar e classificar os processos de acordo com os níveis de maturidade digital definidos pela metodologia Acatech, permitindo uma análise objetiva do grau de digitalização real de cada etapa do processo produtivo.

Embora não se trate da aplicação em uma empresa real, os procedimentos aqui descritos estabelecem um roteiro replicável para empresas fabricantes de materiais elétricos ETO que desejam iniciar sua jornada de digitalização. A intenção é demonstrar como esses modelos podem ser aplicados na prática para diagnosticar o nível atual de maturidade digital e definir estratégias para sua evolução.

A opção por essa abordagem deve-se à inexistência de acesso público ao questionário completo da metodologia Acatech.

4.2.1 Procedimento de Aplicação do Modelo de Santos (2018)

O modelo proposto por Santos (2018) foi desenvolvido com o objetivo de oferecer uma ferramenta adaptada à realidade das empresas brasileiras, especialmente do setor de manufatura, para a avaliação da maturidade digital no contexto da Indústria 4.0. Trata-se de um modelo de maturidade de caráter descritivo, cuja função é avaliar a maturidade “*as-is*”, ou seja, representar a situação atual da organização em relação às práticas e capacidades digitais, sem que isso implique diretamente na definição de rotas de melhoria ou na associação do resultado com a performance da empresa (De Bruin et al., 2005). Sua estrutura metodológica contempla cinco dimensões fundamentais descritas na Tabela 1. Cada uma dessas dimensões reflete aspectos organizacionais, humanos e tecnológicos que impactam diretamente a capacidade de uma empresa em conduzir sua transformação digital.

A aplicação do modelo é realizada por meio de um questionário estruturado, que

Tabela 1 – Descrições das dimensões do modelo de maturidade digital proposto por Santos (2018).

Dimensão	Descrição
Estratégia, estrutura e cultura organizacionais	A evolução rumo à Indústria 4.0 necessita de uma mudança de paradigmas da alta administração, por meio da promoção e disseminação de uma cultura de inovação e melhoria contínua, da disponibilização de recursos necessários para implementação de novas tecnologias de informação e operação, da adequação da estrutura organizacional e da busca constante pela satisfação das necessidades dos consumidores.
Equipes de trabalho	As transformações digitais e o uso intensivo de tecnologias inovadoras não são possíveis sem a devida qualificação e constante atualização das habilidades técnicas e de gestão das equipes de trabalho. As equipes precisam estar abertas às inovações tecnológicas, e possuir flexibilidade e autonomia para rápidas mudanças de contexto.
Fábricas inteligentes	As fábricas do futuro, compostas por sensores e atuadores inteligentes, e instalações e equipamentos com sistemas embarcados avançados, permitirão a comunicação em tempo real entre as máquinas, os produtos, as pessoas e as infraestruturas, formando um ambiente de rede digital.
Processos inteligentes	A conectividade e interoperabilidade dos sistemas de informação e operação, dos equipamentos e instalações, possibilitarão a existência de sistemas e processos autônomos. Dotados de algoritmos avançados de inteligência artificial, contribuirão para o contínuo aprendizado das máquinas, possibilitando a auto-otimização e a autoconfiguração dos processos de produção, manutenção, logística e processos de apoio.
Produtos e serviços inteligentes	Produtos com sistemas inteligentes embarcados, dotados de inteligência artificial, constituirão a base para a coleta de informações em tempo real, permitindo a comunicação constante com o cliente, com a fábrica e com os processos produtivos ao longo da cadeia de valor. Serviços complementares aos produtos, e novos serviços baseados em dados coletados, e possibilitados pelas tecnologias de conectividade, serão uma fonte importante de receitas das empresas.

Fonte: Adaptado de Santos (2018).

avalia o grau de maturidade de cada uma das cinco dimensões a partir de um conjunto de subdimensões e critérios específicos. As avaliações são realizadas em uma escala ordinal de 1 a 5, onde:

- 0 indica estágio **Inexistente**, em que não há práticas ou tecnologias digitais implementadas;
- 1 indica estágio **Em fase de planejamento**, em que estão sendo estudadas iniciativas, mas ainda não há implementação;

- 2 representa estágio **Inicial**, caracterizado por práticas pouco estruturadas e uso restrito de tecnologias digitais;
- 3 corresponde ao estágio **Intermediário**, no qual já existem iniciativas estruturadas, porém de alcance limitado ou não integradas;
- 4 refere-se ao estágio **Avançado**, em que há adoção consistente de tecnologias e práticas digitais, com integração parcial dos processos;
- 5 representa o estágio **Referência**, caracterizado pela integração plena dos processos, utilização intensiva de dados, automação, análise preditiva e alto grau de digitalização organizacional.

A coleta das respostas deve envolver representantes de diferentes áreas da organização — como produção, engenharia, qualidade, manutenção, logística e gestão — para garantir uma visão holística e multidisciplinar do estágio atual de maturidade digital. Recomenda-se que o questionário seja aplicado de forma digital, presencialmente ou remotamente, e com o acompanhamento de um facilitador capacitado na metodologia, cuja função é fornecer uma introdução sobre os conceitos de Indústria 4.0 para evitar respostas enviesadas, esclarecer dúvidas e garantir a compreensão correta dos critérios.

Após a coleta, os dados são consolidados em uma planilha eletrônica. Para cada pergunta, calcula-se a média das notas atribuídas por todos os respondentes, e para se ter uma medida da homogeneidade da dispersão das respostas, calcula-se o desvio padrão. Por fim, se calcula o nível de maturidade para cada uma das respostas (arredondamento da coluna “média”). A representação gráfica dos resultados em formato de diagrama radar possibilita comparações entre o nível atual de maturidade e os níveis desejados, se previamente definidos pela organização.

Esse diagnóstico serve como base para priorização de ações de digitalização, direcionando recursos e esforços para as áreas que apresentam maior defasagem. Além disso, é recomendável realizar o diagnóstico periodicamente para que haja um acompanhamento da percepção da evolução digital da empresa ao longo do tempo.

É importante destacar que o modelo proposto por Santos (2018) baseia-se na coleta de dados a partir da percepção dos representantes da organização. Esse tipo de abordagem é essencial para captar o entendimento que os próprios gestores e colaboradores possuem sobre o grau de maturidade digital da empresa. No entanto, por se tratar de uma avaliação perceptiva, os resultados podem ser influenciados por interpretações subjetivas, diferentes níveis de entendimento sobre os conceitos tecnológicos e possíveis vieses individuais.

O questionário completo utilizado na aplicação do modelo encontra-se reproduzido no Apêndice A, com todas as questões organizadas por dimensão e acompanhadas da respectiva escala de avaliação.

4.2.2 Proposta de Classificação de Processos com Base na Metodologia Aca-tech

Diferentemente da avaliação baseada na percepção dos representantes da organização, a metodologia observacional busca analisar objetivamente como as práticas, fluxos e atividades da empresa estão estruturados do ponto de vista digital. Essa análise é realizada a partir do mapeamento dos processos produtivos utilizando a notação BPMN, onde cada macroetapa do processo produtivo é representada por uma raia funcional e composta por suas respectivas atividades operacionais.

A aplicação da metodologia ocorre em três etapas, descritas respectivamente nas seções 4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.2.2.3.

4.2.2.1 Mapeamento dos Processos Produtivos

A primeira etapa consiste no mapeamento dos processos produtivos da organização utilizando a notação BPMN. Esse mapeamento é estruturado com base nas macroetapas que compõem o fluxo de produção típico de empresas de manufatura sob encomenda (ETO), como descrito na Seção 4.1.

Embora o BPMN seja amplamente consolidado como um padrão internacional para modelagem de processos, sua aplicação ainda é predominantemente difundida em ambientes administrativos, financeiros, comerciais e de serviços, em detrimento dos processos industriais de manufatura. Isso se deve, em parte, à tradição das indústrias em utilizar outras notações específicas, como fluxogramas técnicos ou modelos de simulação industrial. Entretanto, o uso do BPMN no ambiente fabril, especialmente em indústrias sob encomenda (ETO), permite uma representação formal, padronizada e visual dos fluxos de trabalho, facilitando a compreensão dos processos tanto por profissionais de engenharia quanto por áreas administrativas, além de promover uma visão integrada dos fluxos de informação e das interações entre setores (White; Miers, 2011).

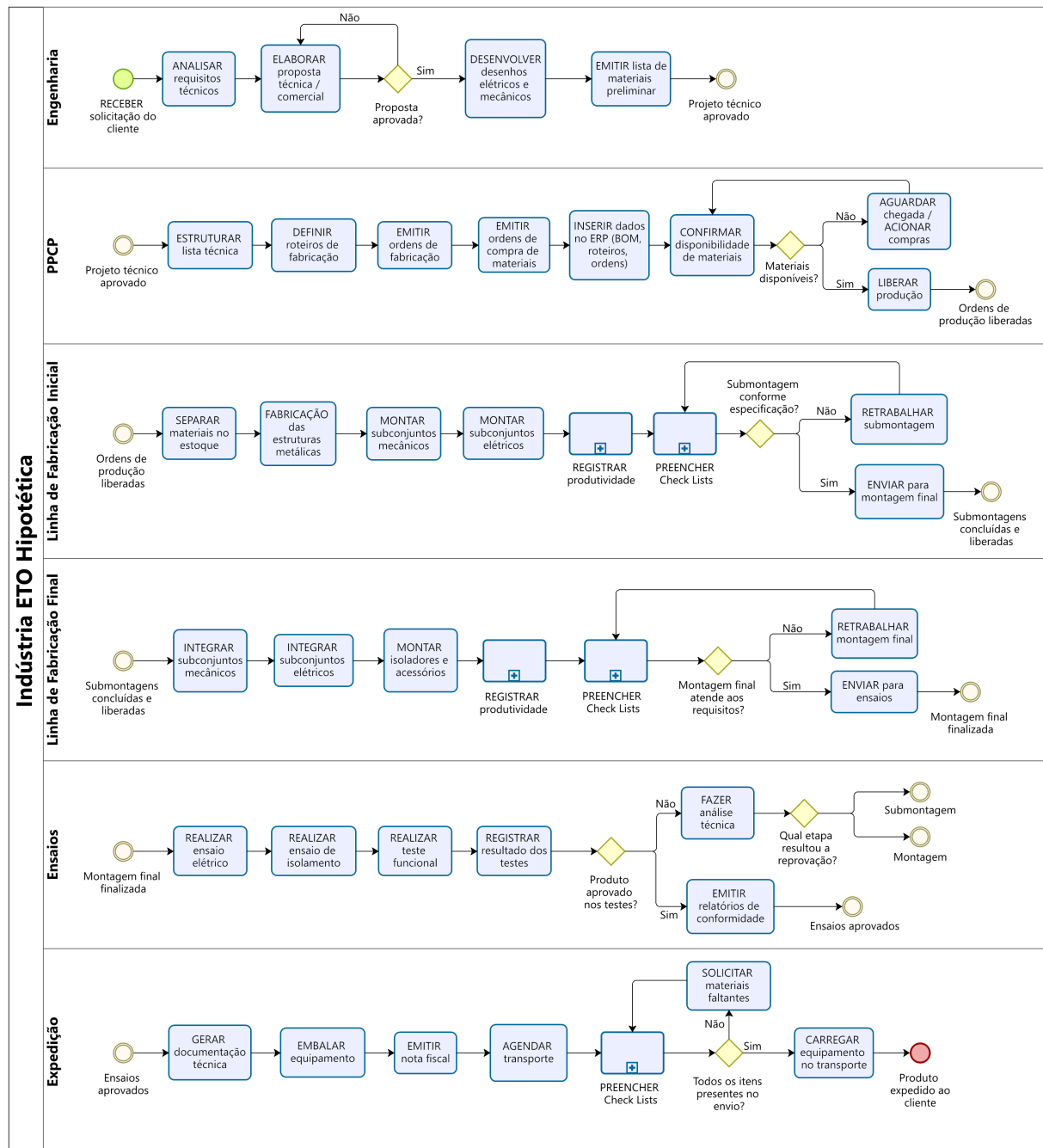
Ao aplicar o BPMN no contexto produtivo, torna-se possível mapear não apenas as sequências operacionais, mas também os pontos de integração de dados, as dependências entre atividades e os gargalos informacionais — aspectos fundamentais para diagnósticos de maturidade digital.

No contexto de indústrias ETO, o mapeamento dos processos é particularmente relevante, uma vez que essas organizações são caracterizadas por alta variabilidade dos produtos, baixa padronização dos processos e forte dependência de atividades de engenharia. Cada pedido ou projeto muitas vezes gera um fluxo de produção único ou semipadronizado, o que torna essencial representar graficamente os fluxos operacionais para identificar claramente onde ocorrem as interações, os gargalos e os pontos de entrada e saída de informações para cada novo projeto.

A Figura 13 apresenta a modelagem BPMN completa da empresa hipotética, que

abrange todas as macroetapas do processo produtivo. Cada raia representa um setor ou função específica, e as atividades são dispostas sequencialmente, refletindo o fluxo de trabalho típico de uma indústria ETO. Afim de facilitar a compreensão do fluxo sequencial dos processos, foram utilizados eventos intermediários de mensagem para representar os pontos de interação entre os setores (raias) envolvidos.

Figura 13 – Modelagem BPMN completa da Indústria ETO Hipotética.



Fonte: O Autor.

A primeira raia da Figura 13 representa a macroetapa **Preparação Técnica e**

Engenharia do Produto. Esta macroetapa tem início com o recebimento da solicitação do cliente, seguido pela análise dos requisitos técnicos, elaboração da proposta técnica e comercial e sua subsequente aprovação. Caso a proposta seja aprovada, são desenvolvidos os desenhos elétricos e mecânicos, além da emissão da lista de materiais preliminar (*BOM inicial*). Um *gateway* de decisão controla a aprovação da proposta, garantindo retroalimentação ao processo em caso de necessidade de ajustes. O processo é finalizado com a formalização do projeto técnico aprovado, pronto para dar início às atividades de planejamento.

A macroetapa **Planejamento e Emissão de Ordens**, representada na segunda raia da Figura 13, envolve atividades críticas para a organização do processo produtivo. Após a aprovação do projeto técnico, são realizadas a estruturação da lista técnica definitiva (*BOM*), a definição dos roteiros de fabricação, a emissão das ordens de produção e das ordens de compra dos materiais necessários. Além disso, ocorre a inserção desses dados no ERP, consolidando as informações que serão utilizadas por todos os setores. Um *gateway* controla a verificação da disponibilidade de materiais, direcionando o fluxo para a liberação da produção ou para o aguardo da chegada dos materiais. A etapa se encerra com a emissão das ordens de produção liberadas.

A terceira raia da Figura 13 ilustra a macroetapa **Processamento de Componentes e Submontagens**, que compreende a execução física da linha de fabricação inicial. As atividades incluem a separação dos materiais no estoque, os processos de fabricação mecânica (como corte de chapas e montagem de estruturas metálicas) e a montagem dos subconjuntos elétricos e mecânicos. Nesta raia surgem os primeiros subprocessos compartilhados - o preenchimento dos registros de produtividade e dos *Check Lists* intermediários. Um *gateway* de decisão verifica a conformidade das submontagens, direcionando para retrabalho em caso de não conformidade, antes de liberar os subconjuntos para a montagem final.

A macroetapa **Montagem Final do Equipamento**, representada na quarta raia da Figura 13, tem como objetivo integrar os subconjuntos elétricos e mecânicos, além de montar os isolamentos e acessórios, para a formação do equipamento final. Além disso, são realizadas as verificações dimensionais e elétricas preliminares, bem como os subprocessos de registro de produtividade e preenchimento dos *Check Lists* de montagem. Um *gateway* avalia se a montagem atende aos requisitos técnicos e de qualidade, direcionando para retrabalho em caso negativo ou liberando o equipamento para a etapa de ensaios e testes.

Na quinta raia da Figura 13 é apresentada a macroetapa **Ensaios e Testes de Conformidade**. Esta macroetapa é responsável pela validação funcional, elétrica e mecânica do equipamento antes de sua liberação. São realizados os ensaios elétricos, os testes de isolamento e os ensaios funcionais. Após o registro dos resultados, um *gateway* determina se o produto foi aprovado. Caso contrário, uma análise técnica é realizada para definir se o problema se origina na montagem final ou nas submontagens, direcionando para o retra-

balho correspondente. Se aprovado, são emitidos os relatórios de conformidade necessários para a etapa de expedição.

Por fim, a sexta raia da Figura 13 representa a macroetapa **Expedição e Documentação Técnica**. Essa macroetapa garante que o equipamento seja preparado para envio ao cliente de forma segura e documentada. As atividades incluem a geração da documentação técnica (desenhos finais, relatórios de ensaio, certificados), a embalagem do equipamento, a emissão da nota fiscal, o agendamento do transporte e a realização dos *Check Lists* de conferência de expedição. Um *gateway* avalia se todos os itens previstos estão presentes. Caso contrário, são solicitados os faltantes. Com a validação concluída, o equipamento é carregado e expedido, encerrando o fluxo operacional.

Embora tenha sido construída de forma a refletir com fidelidade os padrões operacionais desse tipo de ambiente produtivo, trata-se de uma representação generalista, desenvolvida com fins metodológicos e didáticos para suportar a análise de maturidade digital proposta.

Para sua aplicação em um cenário real, é esperado que sejam realizados ajustes finos, considerando as particularidades de cada organização, como estruturas organizacionais específicas, variações nos processos produtivos, bem como regras de negócio próprias. Dessa forma, a modelagem aqui apresentada serve como uma base estruturada e replicável, que pode ser adaptada conforme a realidade de cada empresa, mantendo-se alinhada aos princípios metodológicos da análise de processos e da transformação digital.

4.2.2.2 Análise do Nível Digital das Atividades

Após o mapeamento dos processos, realiza-se a análise individual de cada atividade modelada, com o objetivo de avaliar seu nível de maturidade digital. Essa avaliação é fundamentada em sete níveis de maturidade digital, 6 deles definidos a partir da metodologia Acatech (Schuh et al., 2020a), e mais um nível **0** — **Inexistente**, adaptado neste trabalho para representar atividades sem qualquer grau de digitalização ou controle sistemático. O objetivo central desta etapa é compreender, de forma granular, como cada atividade contribui — ou limita — o desenvolvimento digital da empresa.

Para operacionalizar essa avaliação foram propostos seis critérios principais, que devem ser aplicados a cada atividade modelada:

- Se a atividade é realizada manualmente (0 ponto) ou com suporte digital (1 ponto);
- Se os sistemas utilizados são isolados (0 ponto) ou possuem integração com outros sistemas (1 ponto);
- Se há coleta automática de dados ou monitoramento em tempo real (1 ponto) ou se não há um monitoramento contínuo (0 ponto);

- Se os dados coletados permitem análises de causa e efeito (1 ponto) ou se são utilizados apenas para relatórios simples (0 ponto);
- Se os dados coletados são utilizados para análises preditivas ou prescritivas (1 ponto) ou se não existem algoritmos para antever situações (0 ponto);
- Se os processos possuem algum grau de automação adaptativa ou capacidade de autoajuste (1 ponto) ou se operam apenas de forma reativa (0 ponto).

Cada critério avaliado recebe uma pontuação binária (0 ou 1), totalizando até 6 pontos possíveis. A pontuação final permite classificar a atividade dentro dos níveis de maturidade adaptados da metodologia Acatech, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de avaliação dos níveis de maturidade digital adaptados para atividades.

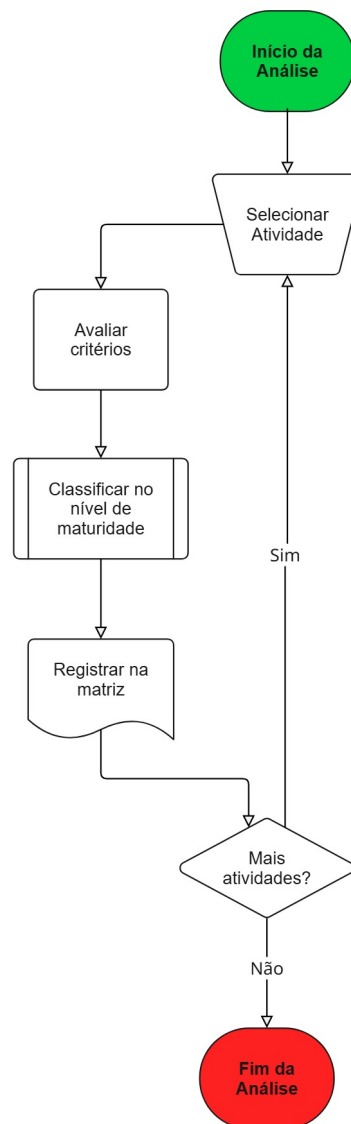
Nível	Descrição Geral	Critério Aplicado à Atividade
0	Inexistente	A atividade é completamente manual, sem qualquer suporte digital. Não há registros ou controle sistemático.
1	Informatização	A atividade é realizada com apoio de sistemas digitais isolados, sem integração com outros processos. Pode envolver uso de planilhas, software local ou simples substituição do papel por ferramentas digitais.
2	Conectividade	Existe comunicação entre sistemas, dispositivos ou setores. A atividade gera ou consome dados, mas não há necessariamente monitoramento contínuo nem análises.
3	Visibilidade	A atividade possui monitoramento em tempo real. Dados são coletados automaticamente (sensores, ERP, SCADA) e disponibilizados em dashboards ou relatórios operacionais.
4	Transparência	Os dados da atividade são utilizados para entender causas de falhas, gargalos ou variações no desempenho. Permite análises de causa e efeito.
5	Capacidade Preditiva	A atividade é suportada por modelos ou algoritmos que realizam previsões, como manutenção preditiva, previsão de falhas ou antecipação de desvios operacionais.
6	Adaptabilidade	A atividade possui automação inteligente, capaz de se autoajustar ou tomar decisões operacionais sem intervenção humana, com base em dados e algoritmos.

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

A Figura 14 apresenta o fluxograma desenvolvido para representar o procedimento adotado na análise do nível de maturidade digital das atividades. O processo inicia-se com a seleção da atividade e segue para a avaliação dos critérios descritos anteriormente. A partir dessa análise, a atividade é classificada no nível de maturidade correspondente, e o resultado é registrado na matriz de avaliação. O processo se repete até que todas as atividades mapeadas sejam avaliadas.

Para ilustrar a aplicação prática da metodologia, são apresentados alguns exemplos específicos da empresa hipotética de materiais elétricos ETO:

Figura 14 – Fluxograma representando o procedimento de análise do nível de maturidade digital das atividades.



Fonte: O Autor.

A atividade “*Emitir Ordens de Produção*” no setor de PPCP (Planejamento, Programação e Controle da Produção) é realizada por meio de um sistema ERP que comunica as ordens ao setor de produção. Como existe integração de dados entre setores, mas sem monitoramento em tempo real das execuções no chão de fábrica, essa atividade é classificada no nível 2 — **Conectividade**.

Por sua vez, o subprocesso “*Preencher Check List*” é executado integralmente em formulários de papel, sendo posteriormente arquivado manualmente, sem qualquer integração digital. Portanto, classifica-se no nível 0 — **Inexistente**.

Em contrapartida, a atividade “*Registrar Resultados dos Ensaios*”, quando realizada por meio de sistemas que capturam automaticamente os dados dos equipamentos de teste,

atinge o nível 3 — **Visibilidade**, desde que os resultados estejam disponíveis para consulta em tempo real pelos operadores e pela qualidade.

A adoção de uma abordagem binária (0 ou 1) para a avaliação dos critérios se justifica pela necessidade de tornar a análise mais objetiva, prática e replicável. Embora essa simplificação não capture nuances intermediárias de maturidade, ela permite que a metodologia seja aplicada de forma rápida e sistemática.

Reconhece-se, no entanto, que essa abordagem possui limitações. A avaliação binária pode não refletir totalmente graus parciais de implementação e depende da interpretação consistente dos avaliadores. Além disso, a metodologia não pondera o peso relativo das atividades no impacto geral do processo, considerando uma média simples das avaliações.

4.2.2.3 Cálculo da Maturidade por Macroetapa

A etapa final da metodologia consiste na consolidação dos resultados obtidos na avaliação das atividades, por meio do cálculo do nível de maturidade digital de cada macroetapa do processo produtivo. Esse cálculo permite sintetizar, de forma objetiva, o grau de aderência de cada macroetapa aos conceitos e práticas da Indústria 4.0.

O cálculo é realizado a partir da média aritmética simples dos níveis atribuídos às atividades que compõem a respectiva macroetapa, considerando a escala que vai de 0 (Inexistente) a 6 (Adaptabilidade). Formalmente, esse cálculo pode ser representado pela equação:

$$\text{Maturidade Macroetapa} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (6)$$

Onde:

- N_i = Nível de maturidade atribuído à atividade i ;
- n = Quantidade total de atividades que compõem a macroetapa avaliada.

Por exemplo, considerando uma macroetapa composta por quatro atividades, sendo que uma se encontra no nível 0 (Inexistente), duas no nível 1 (Informatização) e uma no nível 3 (Visibilidade), o cálculo da maturidade média dessa macroetapa seria:

$$\text{Maturidade} = \frac{0 + 1 + 1 + 3}{4} = 1,25 \quad (7)$$

Esse valor pode ser interpretado diretamente como um valor decimal, permitindo análises mais sensíveis, ou, caso desejado, ser arredondado para o inteiro mais próximo, dependendo do objetivo da análise e da preferência metodológica adotada.

O resultado permite que cada macroetapa produtiva — como Preparação Técnica, Processamento de Componentes, Montagem Final, Ensaios e Expedição — tenha seu nível de maturidade digital claramente identificado. Dessa forma, torna-se possível visualizar, de forma estruturada, quais etapas concentram os maiores gargalos de digitalização e quais já apresentam práticas alinhadas aos princípios da Indústria 4.0.

Essa análise se revela particularmente relevante no contexto de empresas ETO, pois permite direcionar os esforços de digitalização para as etapas mais críticas, viabilizando uma jornada de transformação digital mais eficiente, progressiva e alinhada às reais necessidades operacionais da organização.

4.3 RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DE MATURIDADE DIGITAL PARA A EMPRESA HIPOTÉTICA

Os resultados apresentados nesta seção foram atribuídos de forma deliberada com base em análise secundária do cenário nacional da indústria, especialmente no contexto das empresas ETO. Não se trata de uma coleta empírica em campo, mas de uma simulação fundamentada em dados da literatura e de relatórios institucionais como os da CNI (Confederação Nacional da Indústria) (Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2022, 2020).

4.3.1 Resultados da Avaliação Organizacional — Modelo de Santos (2018)

A simulação da aplicação do questionário do modelo de Santos (2018) tem seus dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado da avaliação de maturidade digital segundo o modelo de Santos (2018).

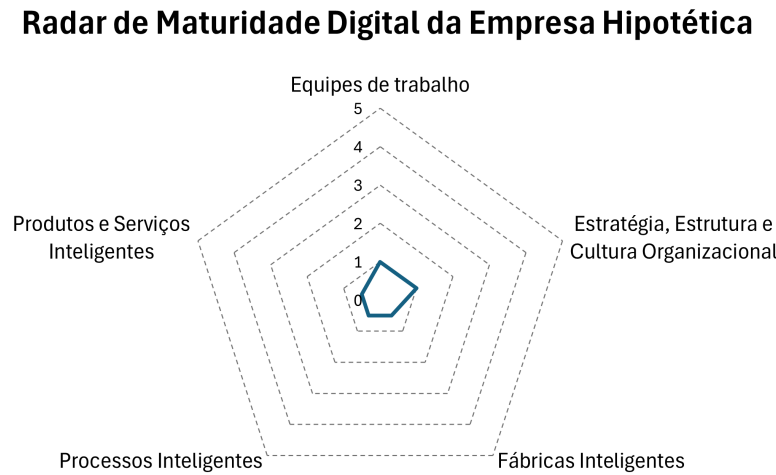
Dimensão	Nível de Maturidade
Estratégia, Estrutura e Cultura Organizacional	1 — Informatização
Equipes de Trabalho	1 — Informatização
Fábricas Inteligentes	0 — Inexistente
Processos Inteligentes	0 — Inexistente
Produtos e Serviços Inteligentes	0 — Inexistente

Fonte: O Autor.

Observa-se que as dimensões relacionadas à gestão, cultura organizacional e desenvolvimento das equipes apresentam um nível mínimo de maturidade, limitado ao uso pontual de sistemas digitais isolados (nível 1 — Informatização). Por outro lado, as dimensões tecnológicas — que abrangem as fábricas, os processos e os produtos inteligentes — encontram-se no nível 0, indicando a inexistência de qualquer prática alinhada aos conceitos da Indústria 4.0.

Foi utilizado o *Microsoft Excel* para compilar os resultados e gerar o gráfico radar, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Radar de maturidade criado para representar o grau de maturidade digital da empresa hipotética.



Fonte: O Autor.

4.3.2 Resultados da Avaliação Observacional — Metodologia Acatech Aplicada aos Processos

A avaliação observacional foi conduzida a partir da análise das atividades mapeadas nos processos produtivos da empresa hipotética, conforme o modelo BPMN desenvolvido na Seção 4.2.2.1. Cada atividade foi classificada de forma deliberada em um dos níveis de maturidade digital estabelecidos, considerando os critérios metodológicos descritos na Seção 4.2.2.2. Posteriormente, os resultados foram consolidados por macroetapa produtiva.

Os resultados estão sintetizados na Tabela 4. Os dados foram escolhidos para representar um ambiente, majoritariamente, em um nível de maturidade muito baixo, situado entre os níveis 0 (Inexistente) e 1 (Informatização). A única exceção é a macroetapa **Ensaaios e Testes de Conformidade**, que apresenta um nível ligeiramente superior devido ao uso comum de sistemas conectados para disponibilização dos dados de ensaios para a Engenharia e Produção.

4.3.3 Análise dos Resultados dos Modelos

Os resultados obtidos a partir das duas metodologias de avaliação não devem ser interpretados como redundantes, mas sim como abordagens complementares que oferecem visões distintas e igualmente relevantes sobre o grau de maturidade digital da organização.

O modelo proposto por Santos (2018) adota uma abordagem essencialmente perceptiva. Ele reflete a maneira como os líderes, gestores e representantes da empresa enxergam

Tabela 4 – Resultado da avaliação de maturidade digital observacional aplicada aos processos produtivos.

Macroetapa Produtiva	Nível de Maturidade
Preparação Técnica e Engenharia do Produto	1 — Informatização
Planejamento e Emissão de Ordens	1 — Informatização
Processamento de Componentes e Submontagens	0 — Inexistente
Integração e Montagem Final do Equipamento	0 — Inexistente
Ensaio e Testes de Conformidade	2 — Conectividade
Expedição e Documentação Técnica	0 — Inexistente

Fonte: O Autor.

sua própria organização no que se refere à estratégia, cultura, estrutura, capacitação das equipes e posicionamento frente à transformação digital. Nesse sentido, a avaliação não mede diretamente o estado dos processos operacionais, mas sim a percepção organizacional sobre a maturidade digital e a prontidão da empresa para conduzir mudanças tecnológicas.

Por outro lado, a metodologia observacional proposta — fundamentada no modelo da Acatech (Schuh et al., 2020a) — oferece uma visão pragmática e objetiva da maturidade digital dos processos produtivos. A partir do mapeamento detalhado das atividades que compõem cada macroetapa, essa abordagem permite diagnosticar de forma concreta o grau de digitalização efetivamente presente no chão de fábrica — independentemente da percepção ou do entendimento dos gestores sobre o tema.

Essa distinção metodológica é relevante pois o modelo perceptivo revela, por exemplo, se a liderança compreende a importância da transformação digital, se existe alinhamento estratégico, cultura de inovação e capacitação adequada das equipes. Já o modelo observacional evidencia como essa visão (ou sua ausência) se materializa — ou não — nos processos operacionais.

Ao serem aplicadas de forma conjunta, as duas avaliações permitem construir um diagnóstico muito mais abrangente. Enquanto a análise perceptiva aponta os desafios culturais, estratégicos e de gestão que limitam ou potencializam a transformação digital, a análise dos processos evidencia tecnicamente onde estão os gargalos operacionais, os pontos cegos de digitalização e as prioridades objetivas de intervenção.

No caso da empresa hipotética avaliada, os resultados de ambas as metodologias são convergentes no sentido de indicar uma maturidade digital extremamente baixa. No entanto, a avaliação perceptiva reforça que a organização sequer possui, no momento, uma estratégia estruturada para digitalização, nem práticas voltadas à capacitação digital de seus colaboradores. Já a avaliação dos processos demonstra como essa realidade se reflete no chão de fábrica, onde prevalecem operações manuais, ausência de integração, registros informais e inexistência de coleta estruturada de dados.

Portanto, a utilização combinada dessas duas metodologias não apenas valida o

diagnóstico realizado, mas também permite que a empresa entenda que sua jornada de transformação digital precisa ser conduzida de forma simultânea em dois eixos complementares: (1) no desenvolvimento de uma visão organizacional clara, com alinhamento estratégico, cultural e capacitação de pessoas; e (2) na implementação de tecnologias, automação, digitalização e integração dos processos produtivos.

5 ESTRATÉGIA DE DIGITALIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DA ARQUITETURA DIGITAL

Este Capítulo apresenta a estratégia de digitalização desenvolvida para a empresa hipotética, considerando suas características operacionais, seu estágio atual de maturidade digital e as diretrizes metodológicas estabelecidas na literatura. Na seção 5.1, são definidos os princípios e direcionadores que norteiam a proposta, bem como as fases e critérios adotados para priorização das ações. Em seguida, a seção 5.2 apresenta a arquitetura digital conceitual que suporta a implementação da estratégia, detalhando os modelos de dados, os fluxos de informação, os mecanismos de rastreabilidade e a governança da informação necessária para viabilizar a transformação digital da organização.

5.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE DIGITALIZAÇÃO

Dado o contexto do objeto de estudo, a decisão de priorizar a digitalização dos processos de coleta de dados de produtividade e qualidade está diretamente relacionada às características operacionais das empresas que atuam no modelo ETO. Nesses ambientes, a produção é altamente customizada, feita sob demanda e frequentemente envolve requisitos técnicos específicos de projeto para cada cliente. Isso implica que a automação física dos processos produtivos é, na maior parte dos casos, tecnicamente desafiadora e economicamente inviável, uma vez que exigiria o desenvolvimento de células robotizadas, dispositivos ou linhas de produção adaptados para cada projeto.

A capacidade de adaptação manual dos operadores continua sendo, portanto, um diferencial essencial, permitindo que atividades artesanais sejam realizadas com a flexibilidade necessária para atender às particularidades de cada produto. Nesse contexto, a digitalização dos processos — especialmente na coleta estruturada de dados de produtividade e qualidade — torna-se uma estratégia mais eficiente e realista de transformação digital, capaz de gerar ganhos operacionais imediatos, sem demandar a complexidade associada à automação física de processos altamente variáveis e não padronizados.

Diante desse diagnóstico, a estratégia de digitalização proposta para a organização não visa, em um primeiro momento, a automação física dos processos, mas sim a criação de uma infraestrutura digital mínima.

Os princípios que norteiam essa estratégia são:

- **Digitalizar antes de automatizar:** A adoção de sistemas digitais para coleta de dados, rastreabilidade e gestão deve preceder qualquer investimento em automação física dos processos.
- **Foco na visibilidade operacional:** A prioridade inicial é eliminar registros em papel e permitir que os dados operacionais estejam disponíveis em tempo real.

- **Soluções escaláveis, modulares e de baixo custo:** Priorização de tecnologias acessíveis, de fácil implementação, que possam ser escaladas gradualmente conforme a evolução da maturidade digital.
- **Valorização das pessoas e da cultura organizacional:** A transformação digital é também cultural. A capacitação das equipes e o desenvolvimento de uma cultura orientada a dados são componentes essenciais do processo.

Os princípios estabelecidos não apenas orientam as diretrizes gerais da transformação digital proposta, mas também fundamentam a estruturação do próprio roteiro de implementação. Trata-se de uma abordagem que reconhece que a digitalização não ocorre de forma instantânea ou isolada, mas sim como um processo progressivo, composto por etapas encadeadas, nas quais cada avanço tecnológico ou organizacional cria as bases necessárias para a fase seguinte.

Dessa maneira, a trajetória de transformação deve começar pela eliminação de fragilidades informacionais, substituindo registros manuais por dados estruturados e centralizados. A partir desse primeiro movimento, torna-se possível implementar mecanismos de rastreabilidade que garantem visibilidade não apenas dos produtos, mas também dos processos e dos dados operacionais associados.

O foco deve ser simplicidade técnica, impacto direto na operação, viabilidade econômica e independência tecnológica. Assim, são priorizadas soluções de rápida adoção, que eliminam tarefas manuais sem valor agregado, que não demandam altos investimentos iniciais e que podem ser gerenciadas internamente, sem dependência de fornecedores externos.

Dessa forma, a proposta define um caminho pragmático, escalável e aderente à realidade de empresas brasileiras de baixa maturidade digital, viabilizando uma transição consistente rumo a um ambiente produtivo digitalizado, rastreável e orientado por dados.

5.2 PROPOSIÇÃO DA ARQUITETURA DIGITAL CONCEITUAL

Nas indústrias de manufatura seriada, o foco dos sistemas de controle, planejamento e monitoramento recai predominantemente sobre os processos e os recursos produtivos. Nesses ambientes, caracterizados por alta padronização e volumes elevados de produção, os sistemas são orientados à otimização da capacidade das máquinas, ao balanceamento das linhas de produção e ao controle de parâmetros operacionais dos equipamentos. O desempenho produtivo, nesse contexto, é fundamentalmente medido pela eficiência do processo, sendo o produto tratado como uma consequência da estabilidade e repetitividade desse processo (Ohno, 2019).

Por outro lado, em organizações que operam no modelo ETO, essa lógica se inverte: o foco central do sistema passa a ser o próprio produto. Cada item fabricado é único ou altamente customizado, com requisitos técnicos específicos definidos pelo cliente. Nesse

cenário, as ferramentas de controle precisam ser orientadas à gestão do ciclo de vida de cada produto individual, desde a fase de projeto até a expedição. Isso implica uma mudança estrutural na maneira como os dados são organizados, registrados e analisados, priorizando o acompanhamento das características de cada unidade produtiva. A literatura sobre manufatura sob encomenda reforça que, nesses ambientes, a rastreabilidade do produto não é apenas um requisito de qualidade, mas uma necessidade operacional essencial para garantir a entrega correta de soluções customizadas (Bertrand; Muntslag, 1993; Fortes; Tenera; Cunha, 2023).

A arquitetura digital conceitual proposta neste trabalho tem como objetivo viabilizar a estratégia de digitalização delineada, garantindo que os fluxos de informação, os dados operacionais e os processos de coleta e gestão estejam estruturados de forma completa e escalável. Para isso, ela será composta por três pilares fundamentais: (1) o modelo conceitual dos dados, que estrutura a base informacional do sistema; (2) o fluxo de dados entre os processos produtivos, os sistemas de coleta e os sistemas administrativos; e (3) a camada de governança da informação, que assegura a disponibilidade dos dados. A Figura 16 apresenta a representação gráfica da arquitetura proposta.

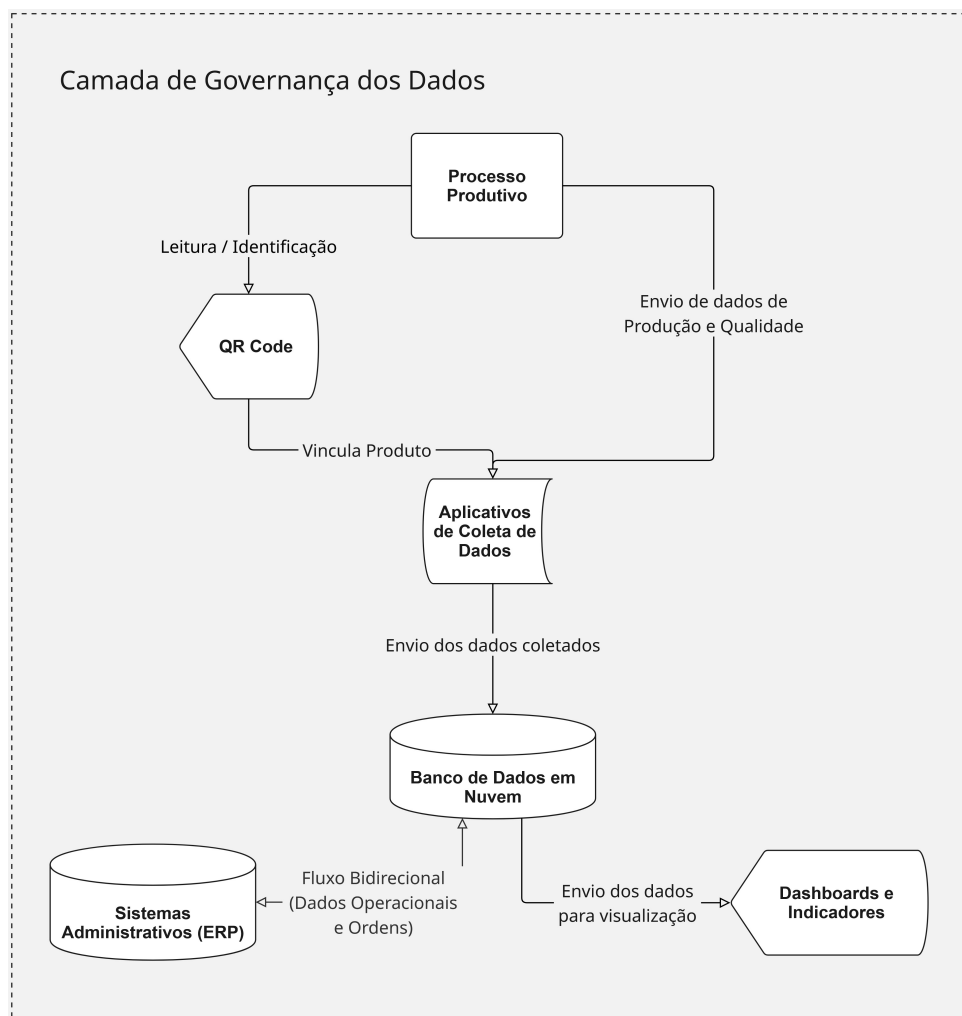
5.2.1 Fluxo de Dados e Camada de Governança da Informação

O funcionamento da arquitetura digital conceitual proposta tem início no processo produtivo, de onde são obtidos e coletados os dados operacionais desses processos. Para garantir que esses dados estejam disponíveis e de fácil acesso, adotou-se a utilização de QR Codes para integração entre os objetos físicos e os sistemas digitais. Por meio dessa tecnologia, é possível codificar os identificadores únicos de cada material, assim como outras informações úteis, para que os dados sejam preenchidos sem erros de digitação nas aplicações desenvolvidas para a coleta dos dados.

Como é preciso que os colaboradores façam a identificação dos produtos ao longo do processo produtivo, foi assumido para a empresa hipotética que essa identificação era realizada através de folhas impressas com informações chave — id do Projeto, Cliente e Número de Série. A confecção manual acaba possibilitando erros durante a digitação e afetando a consistência dos registros. Com o objetivo de digitalizar a coleta de informações no ambiente produtivo, é proposto o desenvolvimento de um aplicativo RDA (*Robotic Desktop Automation*), desenvolvido em Python ou em alguma outra linguagem de programação que permita essa forma de automação, dedicado à busca e preenchimento dos dados à partir de informações como a ordem de produção, registrando essas informações diretamente no banco de dados, eliminando a necessidade de preenchimento manual em formulários físicos.

Foi desenvolvida em Python uma interface simples mas objetiva, representada na Figura 17, para ilustrar o conceito da aplicação — ela deve receber alguma informação-chave do material e a partir dela buscar no sistema ERP da empresa outras informações-

Figura 16 – Arquitetura digital proposta para a empresa hipotética.



Fonte: O Autor.

chave, que também precisam estar visíveis aos operadores.

Cada QR Code deverá conter dados essenciais do item, como código do projeto, número de série, entre outras informações relevantes, permitindo que qualquer apontamento, evento de processo ou *Check List* seja vinculado diretamente ao produto correspondente e possa ser consultado assim que o procedimento for finalizado.

As informações capturadas são então enviadas para um banco de dados estruturado na nuvem, que consolida todos os registros operacionais. Esse banco de dados estabelece comunicação bidirecional com os sistemas administrativos (ERP), garantindo que os dados estejam sincronizados em tempo real, bem como estabelece comunicação com *dashboards* que fornecem consulta e análise de indicadores derivados dos dados armazenados.

Figura 17 – Interface de exemplo para o aplicativo RDA de geração das etiquetas de identificação.



Fonte: O Autor.

5.2.2 Modelo Conceitual dos Dados

O modelo conceitual de dados, representado no Apêndice B, foi desenvolvido com base nos processos produtivos da empresa hipotética. Ele define as entidades, os atributos e os relacionamentos necessários para garantir que cada elemento do processo produtivo — desde o projeto até a expedição — seja devidamente rastreável e integrado ao sistema digital. Sua estrutura foi concebida de forma a assegurar aderência às propriedades ACID, o que é fundamental para assegurar a integridade dos dados, especialmente em um ambiente produtivo onde a rastreabilidade, a consistência entre registros e a confiabilidade das informações operacionais são requisitos críticos para a gestão e a tomada de decisão.

Como o modelo de dados da aplicação apresenta uma estrutura altamente relacional, com entidades bem definidas e interdependentes, como projetos, produtos, ordens, atividades e operadores, foi feita a opção deste modelo para a representação. Embora soluções NoSQL sejam vantajosas em cenários que priorizam escalabilidade horizontal e flexibilidade de dados semi-estruturados, o contexto desta proposta favorece a adoção de um modelo relacional.

As entidades do modelo e suas respectivas descrições estão descritas na Tabela 5.

5.2.3 Aplicativos de Coleta de Dados

Para fazer a comunicação entre operador humano e sistema, foi proposto o desenvolvimento de dois aplicativos destinados à coleta dos dados oriundos do processo produtivo. Estes aplicativos tem como principal função a digitalização da coleta dos dados de qualidade e produtividade, garantindo que cada verificação realizada no chão de fábrica seja devidamente registrada, vinculada ao produto, à ordem de produção e ao operador

Tabela 5 – Descrição das entidades do modelo de dados.

Entidade	Descrição
Projeto	Representa cada pedido específico de cliente, que origina os produtos e as ordens de produção.
Produto	Consolida as informações dos itens produzidos, vinculados ao projeto e à rastreabilidade individual.
Ordem de Produção	Documento que formaliza o planejamento e a execução da fabricação, associando-se tanto aos projetos quanto aos produtos.
Lista Técnica (BOM)	Estrutura de materiais necessária para a fabricação, que por sua vez se decompõe na entidade <i>Item_BOM</i> , detalhando cada componente ou insumo.
Material	Cadastro de itens, matérias-primas e componentes utilizados na fabricação.
Macroetapa e Atividade	Estruturas que descrevem os processos produtivos, permitindo tanto o controle operacional quanto a análise de maturidade digital por processo.
Apontamento de Produtividade	Registro de informações operacionais, como início, fim, quantidade produzida, tempo de execução e operador responsável.
Check List e Perguntas	Estrutura de controle da qualidade e de procedimentos operacionais, garantindo a padronização das verificações e permitindo a rastreabilidade dos resultados.
Resposta do Check List	Registro das respostas individuais associadas a produtos, operadores e momentos específicos do processo.
Evento de Processo	Marcações relevantes no ciclo de vida do produto, como início de uma macroetapa, ocorrência de retrabalho ou conclusão de uma atividade.
Operador	Cadastro dos colaboradores, vinculado aos apontamentos, eventos e <i>checklists</i> realizados.

Fonte: O Autor.

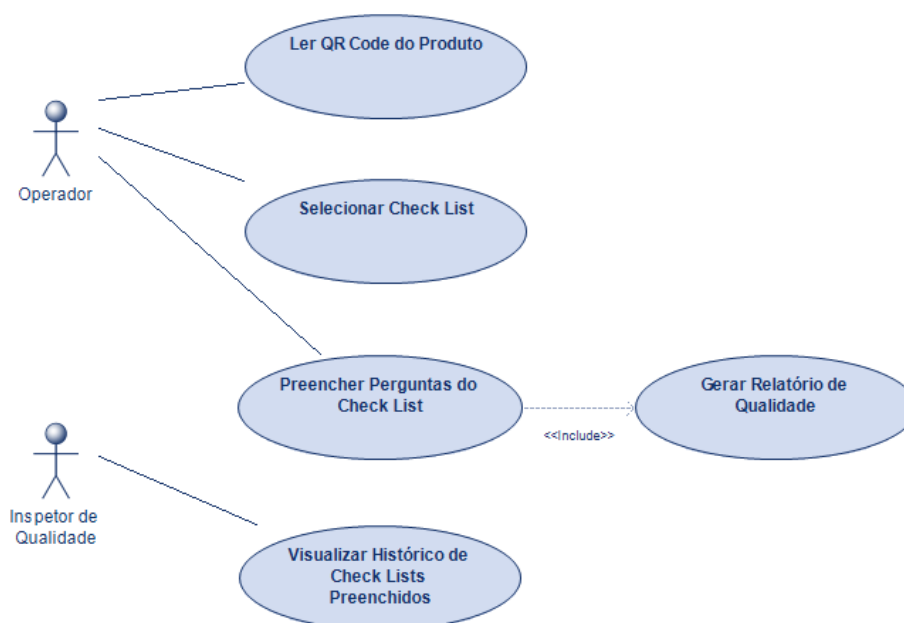
responsável.

5.2.3.1 Aplicativo de Preenchimento dos Check Lists de Qualidade

O aplicativo proposto tem o intuito de operar de forma simples e direta, priorizando a usabilidade de forma intuitiva pelo operador. A lógica operacional tem início na leitura do QR Code do produto e, a partir dessa identificação, o sistema carrega o *Check List* selecionado contendo as perguntas que devem ser respondidas pelo operador. Após o preenchimento, as respostas são enviadas diretamente ao banco de dados.

Para a especificação dos requisitos funcionais do aplicativo, foi elaborado um diagrama de casos de uso, apresentado na Figura 18. Este diagrama representa as interações entre os usuários e o sistema, destacando as principais funcionalidades, tais como a leitura do QR Code, a seleção do *Check List*, o preenchimento das respostas, a submissão dos dados e a consulta ao histórico de registros.

Com base nas funcionalidades descritas no diagrama de casos de uso, foi elaborado então um diagrama de atividades, apresentado na Figura 19, que representa o fluxo operacional do aplicativo. O fluxo se inicia na tela de autenticação do operador, na qual

Figura 18 – Diagrama de casos de uso do aplicativo de preenchimento de *Check Lists*.

Fonte: O Autor.

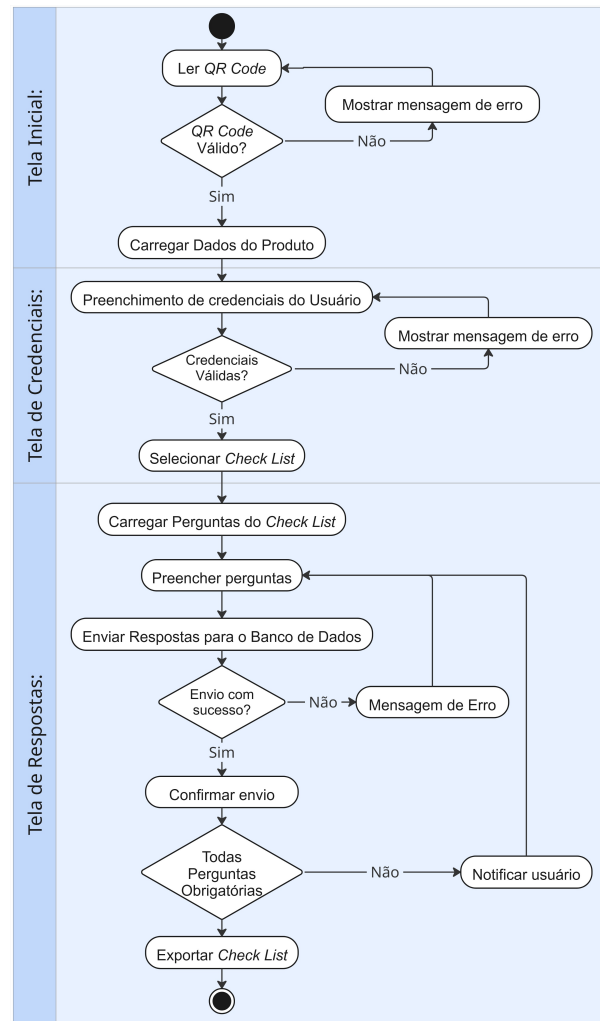
são inseridas as credenciais de acesso ao sistema, que em seguida direciona o usuário para a etapa de identificação do produto, realizada por meio da leitura do QR Code.

Se a leitura do QR Code for bem-sucedida, o sistema carrega automaticamente as informações do produto e disponibiliza os *Check Lists* associados àquele item. O operador, então, seleciona o *Check List* correspondente ao processo ou à etapa que está sendo executada e, na sequência, são carregadas todas as perguntas vinculadas ao *Check List* selecionado, as quais devem ser respondidas pelo usuário.

Durante o preenchimento, o sistema permite que o operador navegue entre as perguntas, respondendo cada uma conforme os parâmetros definidos — texto, número, múltipla escolha ou caixa de seleção. Ao finalizar o preenchimento, o aplicativo executa uma validação automática para verificar se todas as perguntas obrigatórias foram devidamente respondidas. Caso alguma pergunta obrigatória esteja sem resposta, o sistema emite uma mensagem de alerta, retornando o usuário à etapa de preenchimento para que as pendências sejam sanadas.

Se todas as respostas estiverem corretas e completas, o operador confirma o envio dos dados para que o sistema, então, registre as informações no banco de dados. Ao final do preenchimento correto, o aplicativo retorna uma mensagem de confirmação, assegurando que o formulário foi submetido com sucesso e, por fim, o operador pode optar por visualizar o histórico dos *Check Lists* preenchidos para aquele produto ou encerrar a operação, retornando à tela inicial do aplicativo.

Além dos diagramas de casos de uso e de atividades, foi desenvolvido o diagrama de

Figura 19 – Diagrama de atividades do aplicativo de preenchimento de *Check Lists*.

Fonte: O Autor.

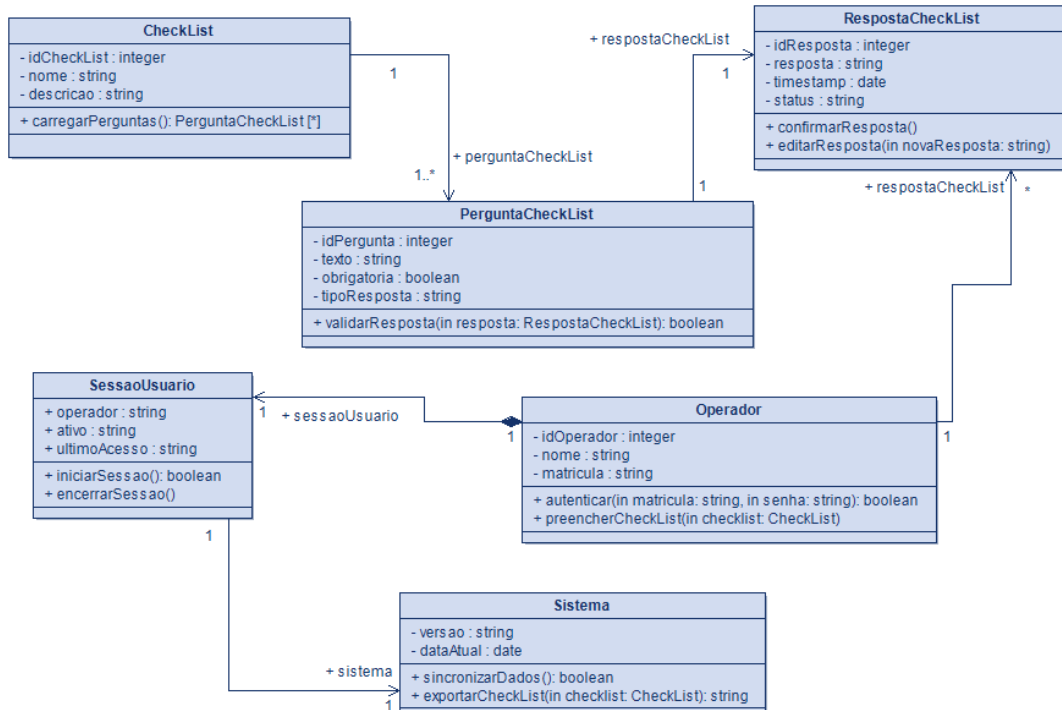
classes do aplicativo, apresentado na Figura 20. Este diagrama descreve a estrutura lógica dos dados e das funcionalidades do sistema. A classe central do modelo é a *CheckList*, que representa o conjunto de perguntas a serem respondidas. Cada *CheckList* está associado a múltiplas instâncias da classe *PerguntaCheckList*, que define as características de cada pergunta, como o texto, o tipo de resposta e se ela é obrigatória.

As respostas fornecidas pelos operadores são instâncias da classe *RespostaCheckList*, que armazena informações como o conteúdo da resposta, a data e hora de submissão, além do status de conformidade. Cada resposta está vinculada diretamente a uma pergunta específica e a um operador responsável pelo preenchimento.

A classe *Operador* representa o usuário que realiza o preenchimento dos *Check Lists*, contendo atributos como nome, matrícula e credenciais de acesso, bem como métodos para autenticação, realização do preenchimento e consulta ao histórico. A classe *SessaoUsuario* é responsável pelo controle da sessão ativa do operador no aplicativo, garantindo que todas

as interações estejam associadas a um usuário autenticado. Por fim, a classe **Sistema** concentra as operações de sincronização dos dados e de exportação dos *Check Lists*, funcionando como um intermediário entre o aplicativo e os sistemas administrativos.

Figura 20 – Diagrama de classes do aplicativo de preenchimento de *Check Lists*.



Fonte: O Autor.

5.2.3.2 Aplicativo de Registro da Produtividade

Além do aplicativo destinado ao preenchimento dos *Check Lists* de qualidade, foi proposto um segundo aplicativo, voltado ao registro dos dados operacionais relacionados à produtividade no ambiente fabril. Este aplicativo tem como principal função a digitalização dos apontamentos de produção, permitindo que os operadores registrem, de forma estruturada, informações como início e fim das atividades, quantidades produzidas, ocorrência de retrabalho e eventuais observações relacionadas ao processo.

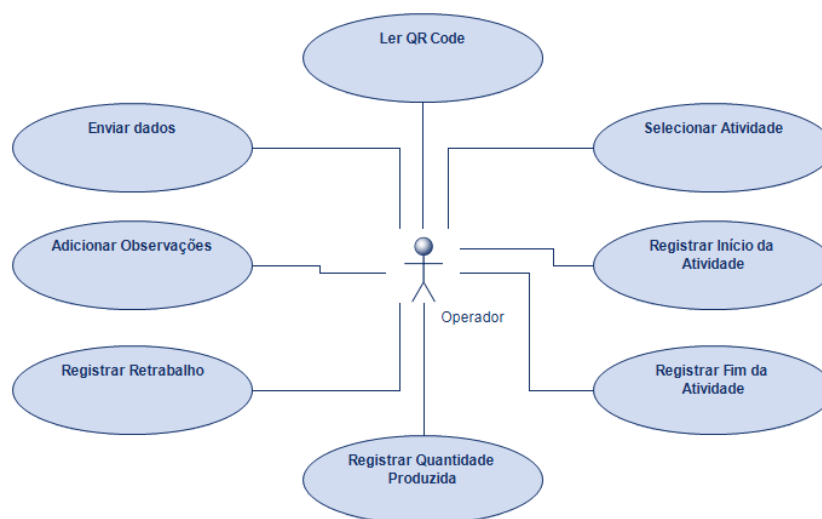
Este aplicativo também foi projetado para operar de maneira simples, priorizando uma interface intuitiva e objetiva, que permita ao operador realizar os registros sem dificuldades. A lógica operacional tem início na autenticação do operador no sistema, seguida pela identificação do produto, realizada por meio da leitura do QR Code presente na etiqueta de identificação. A partir dessa identificação, são carregadas as informações do item e disponibilizadas as macroetapas e atividades associadas ao processo produtivo.

Após selecionar a macroetapa e a atividade correspondente, o operador confirma o contexto do apontamento e, então, realiza o registro do início da atividade. Neste momento, o sistema grava a data e o horário de início, marcando o ponto inicial do apontamento.

Ao término da atividade, o operador registra o fim da execução, sendo então direcionado para a etapa de preenchimento dos dados quantitativos. Nesta etapa, são informadas a quantidade produzida, a quantidade de retrabalho (se houver) e quaisquer observações pertinentes que o operador deseje adicionar.

Para a especificação dos requisitos funcionais do aplicativo, foi elaborado um diagrama de casos de uso, apresentado na Figura 21. Este diagrama representa as interações entre os usuários e o sistema, destacando as principais funcionalidades, tais como a leitura do QR Code, a seleção da atividade, o registro dos tempos de execução, o preenchimento das quantidades e a submissão dos dados.

Figura 21 – Diagrama de casos de uso do aplicativo de registro da produtividade.

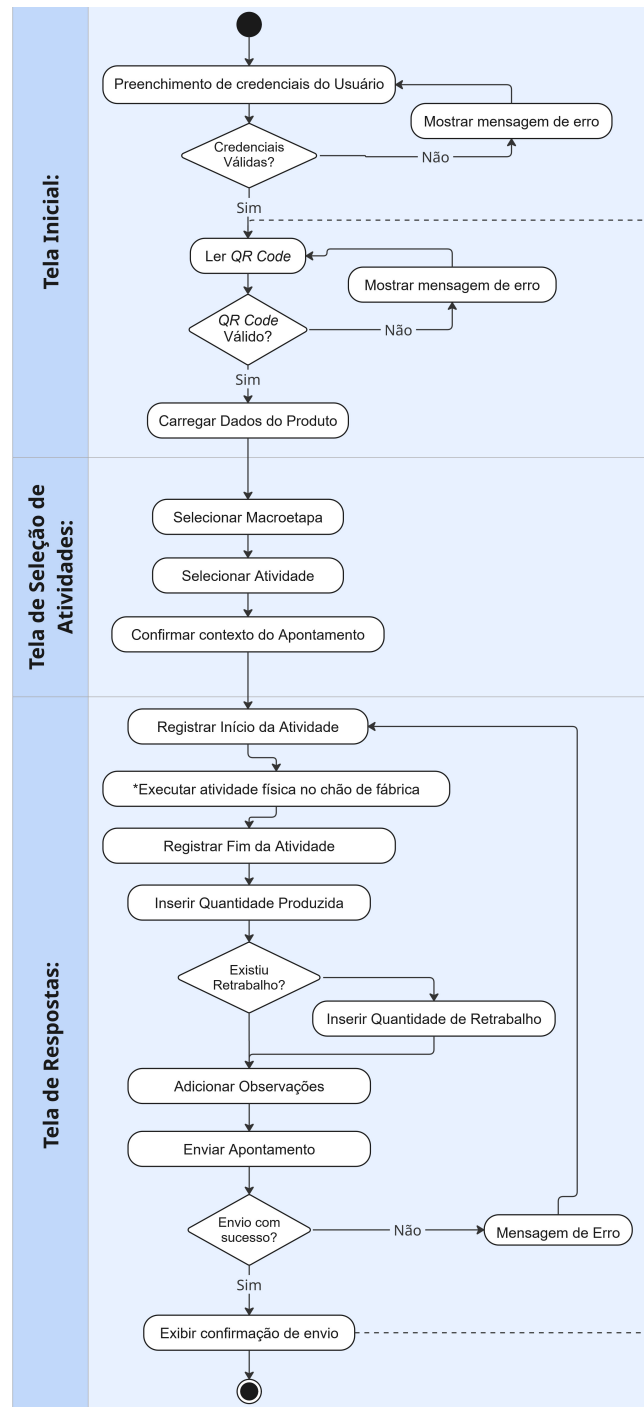


Fonte: O Autor.

Com base nas funcionalidades descritas no diagrama de casos de uso, foi elaborado o diagrama de atividades apresentado na Figura 22, que descreve o fluxo operacional do aplicativo. O processo se inicia na autenticação do operador e segue com a identificação do produto, seleção da macroetapa e da atividade, registro do início da atividade, execução da tarefa no ambiente físico, registro do fim da atividade, preenchimento das quantidades produzidas e de retrabalho, além de observações complementares, quando aplicável.

Após o preenchimento de todos os dados, o operador realiza o envio do apontamento para o banco de dados. O sistema então processa a submissão, retornando uma mensagem de confirmação em caso de sucesso, ou uma mensagem de erro, caso ocorra alguma falha durante o envio. Com o registro concluído, o operador pode optar por encerrar a operação ou iniciar um novo apontamento, retornando ao menu inicial do aplicativo.

Figura 22 – Diagrama de atividades do aplicativo de registro da produtividade.



Fonte: O Autor.

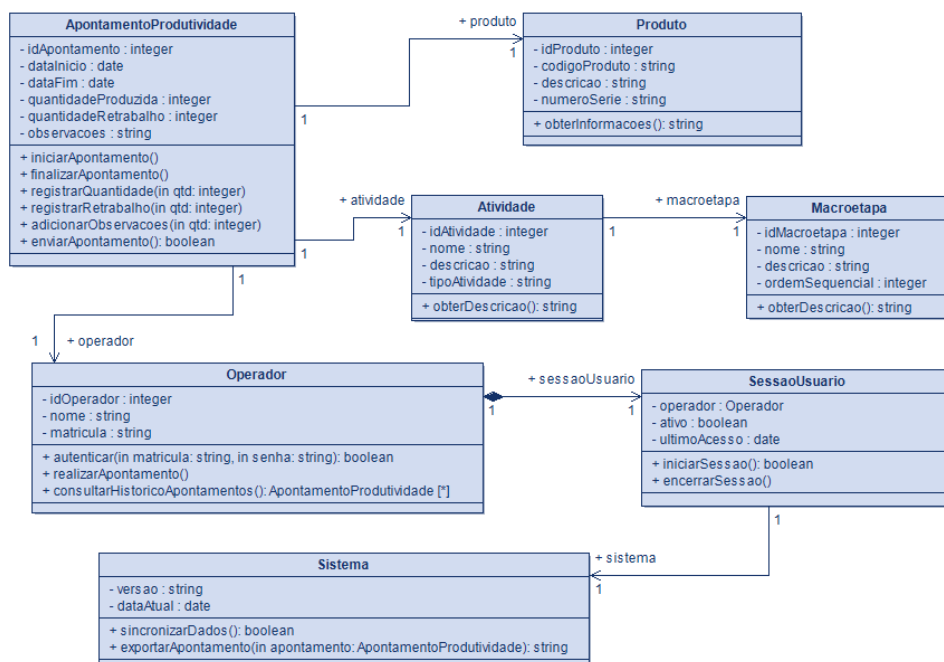
Adicionalmente, foi desenvolvido o diagrama de classes, apresentado na Figura 23, que descreve a estrutura lógica dos dados e das funcionalidades do aplicativo. No centro do modelo está a classe **ApontamentoProdutividade**, que consolida os dados operacionais referentes a cada ciclo de trabalho. Esta classe armazena informações como data e hora de início e fim, quantidade produzida, quantidade de retrabalho e observações, além

de métodos que permitem iniciar e finalizar o apontamento, registrar as quantidades e submeter os dados ao banco de dados.

O apontamento está diretamente vinculado a um **Produto**, identificado previamente por meio do QR Code, e a uma **Macroetapa** e uma **Atividade**, que contextualizam em qual parte do processo produtivo aquele apontamento está inserido. A relação entre macroetapas e atividades reflete a hierarquia natural dos processos produtivos, onde cada macroetapa agrupa um conjunto de atividades operacionais.

A classe **Operador** representa o usuário responsável pelo registro dos apontamentos, armazenando informações como nome, matrícula e credenciais de acesso, além de métodos para autenticação, realização de novos apontamentos e consulta ao histórico. Para o gerenciamento da sessão ativa, a classe **SessaoUsuario** está associada diretamente ao **Operador**, garantindo que todas as ações estejam devidamente vinculadas a um usuário autenticado. Por fim, a classe **Sistema** concentra as operações relacionadas à sincronização dos dados e à exportação dos apontamentos, funcionando como uma interface de comunicação entre o aplicativo e os sistemas administrativos.

Figura 23 – Diagrama de classes do aplicativo de registro da produtividade.



Fonte: O Autor.

5.2.4 Proposta de Monitoramento dos Dados e Gestão dos Indicadores

A digitalização dos processos de coleta de dados proposta neste trabalho viabiliza, em uma etapa subsequente do projeto, a construção de um sistema de monitoramento

operacional baseado em indicadores-chave de desempenho (KPIs). Essa camada da arquitetura digital tem como finalidade transformar os dados registrados em informações úteis à gestão, fornecendo visibilidade dos processos produtivos e subsidiando a tomada de decisão baseada em dados.

Conforme discutido na Seção 2.7, a viabilidade de utilização de métricas como o OEE adaptado depende da coleta estruturada de dados sobre produtividade, tempos de execução e conformidade da produção. Os dados capturados por meio de formulários digitais e apontamentos operacionais permitirão, no futuro, calcular indicadores como: tempo de execução por atividade, quantidade produzida, índice de retrabalho e taxa de conformidade dos *Check Lists*.

Embora tais indicadores não tenham sido aplicados diretamente no escopo deste trabalho, sua estruturação metodológica foi planejada de forma a possibilitar sua implementação em uma fase posterior. A proposta prevê o uso de ferramentas de BI (*Business Intelligence*), como Power BI, integradas ao banco de dados da solução desenvolvida. Tais ferramentas permitirão a criação de *dashboards* dinâmicos, nos quais os dados poderão ser filtrados por período, operador, produto ou ordem de produção, facilitando análises específicas e contextualizadas.

A partir dessas informações, tornam-se viáveis os seguintes indicadores operacionais:

- **Tempo de execução das atividades:** obtido pela diferença entre os registros de início e fim das atividades, permitindo avaliar o tempo efetivamente dedicado às operações.
- **Quantidade produzida por atividade e por produto:** consolidada a partir dos apontamentos de produtividade, possibilita análises de desempenho por processo, operador ou produto.
- **Quantidade de retrabalho:** métrica fundamental para a dimensão *qualidade*, que permite monitorar não apenas a quantidade absoluta, mas também a proporção de retrabalho em relação ao total produzido.
- **Taxa de conformidade dos *Check Lists* de qualidade:** percentual de respostas conformes em relação ao total de perguntas obrigatórias, funcionando como um indicador direto da aderência aos padrões operacionais de qualidade.
- **Índice de preenchimento dos *Check Lists*:** avalia o cumprimento dos procedimentos padrão, mensurando a proporção de checklists devidamente preenchidos em relação ao total de processos executados.
- **OEE Adaptado:** calculado a partir das dimensões de disponibilidade (tempo registrado), performance (quantidade produzida versus meta) e qualidade (conforme versus total produzido), possibilitando uma visão do desempenho operacional, mesmo em ambientes sem sensores ou automação.

A definição completa dos indicadores e sua aplicação prática deverão compor o escopo de um projeto futuro, no qual será possível avaliar a efetividade da solução implantada e medir os ganhos em termos de produtividade, qualidade e rastreabilidade.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo propor uma abordagem estruturada para a digitalização de sistemas de produção em uma indústria hipotética de materiais elétricos que opera sob o modelo *Engineer-to-Order* (ETO) e possui baixo grau de maturidade digital. A pesquisa foi orientada por quatro objetivos específicos: (i) caracterizar um cenário industrial representativo das limitações e desafios enfrentados por empresas brasileiras de perfil semelhante; (ii) propor um método de avaliação da maturidade digital, fundamentado na metodologia de Santos (2018) e na abordagem da Acatech; (iii) definir uma estratégia de digitalização orientada à superação dos principais gargalos identificados; e (iv) projetar uma arquitetura digital conceitual capaz de iniciar essa transformação.

A primeira etapa do trabalho consistiu na elaboração de um diagnóstico da situação inicial da empresa hipotética, caracterizada por processos majoritariamente manuais, ausência de integração digital entre as áreas e inexistência de mecanismos sistemáticos para coleta e análise de dados operacionais. Esse cenário reflete, de forma realista, a condição de uma parcela significativa da indústria brasileira, especialmente aquelas de perfil ETO, onde a variabilidade dos produtos e a baixa padronização dos processos tornam ainda mais desafiadora a adoção de tecnologias digitais.

Para a avaliação da maturidade digital, foi adotada uma abordagem que combina duas perspectivas complementares: o modelo perceptivo proposto por Santos (2018), que permite analisar a visão dos líderes e gestores em relação à estratégia, cultura, estrutura organizacional, capacitação das equipes e prontidão para a transformação digital; e a metodologia observacional adaptada a partir do modelo Acatech, que possibilita avaliar objetivamente o grau de digitalização efetivo presente nos processos produtivos do chão de fábrica. A análise dos resultados revelou que, enquanto a percepção da liderança indica ausência de estratégias estruturadas para digitalização e carência de iniciativas de capacitação, a avaliação dos processos demonstrou que as operações permanecem majoritariamente manuais, com registros informais e sem integração sistêmica. No enquadramento da metodologia Acatech, a empresa hipotética encontra-se predominantemente no estágio *Inexistente*, com indícios iniciais de *Informatização*, mas ainda distante dos estágios mais avançados, como *Transparência*, *Capacidade Preditiva* e *Adaptabilidade*, evidenciando a necessidade de atuar de forma simultânea tanto na construção de uma visão organizacional clara quanto na implementação de tecnologias que viabilizem a digitalização dos processos.

Diante desse diagnóstico, a estratégia de digitalização proposta priorizou a obtenção de visibilidade operacional como etapa fundamental. Isso foi traduzido na definição de uma arquitetura digital conceitual composta por modelos de dados relacionais, identificação dos fluxos de informação e mecanismos de rastreabilidade baseados em QR Codes. Além disso, foram concebidos aplicativos para a digitalização da coleta de dados de produtividade e qualidade no chão de fábrica, assegurando a centralização e consistência das informações

operacionais.

A principal contribuição deste trabalho reside na demonstração de como é possível estruturar uma jornada de transformação digital mesmo em cenários marcados por forte dependência de processos manuais, ausência de integração entre sistemas e limitações estruturais recorrentes em empresas brasileiras. A abordagem adotada combina rigor metodológico com viabilidade prática, ao privilegiar soluções acessíveis.

Além disso, o trabalho evidencia que a transformação digital não se restringe à adoção de tecnologias isoladas, mas exige uma reestruturação dos processos de gestão da informação, bem como o desenvolvimento de competências organizacionais voltadas à cultura digital e à utilização sistemática de dados na tomada de decisão.

A partir das limitações e oportunidades identificadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, destacam-se algumas direções promissoras para pesquisas futuras. Entre elas, propõe-se o desenvolvimento de um modelo quantitativo de avaliação de retorno sobre investimento (ROI) específico para projetos de digitalização em empresas ETO, que considere não apenas os ganhos de produtividade, mas também os impactos sobre rastreabilidade, qualidade e redução de não conformidades. Sugere-se também a expansão da arquitetura digital proposta para integrar módulos de planejamento avançado, rastreabilidade em tempo real e sistemas de apoio à decisão, incorporando recursos de análise preditiva e IA. Outra possibilidade relevante é a aplicação do método desenvolvido em empresas reais, de diferentes portes e setores, com o objetivo de validar empiricamente os resultados e aprimorar os instrumentos de avaliação de maturidade digital. Além disso, recomenda-se investigar os impactos culturais e organizacionais da transição digital em ambientes produtivos com alta variabilidade, abrangendo estudos sobre gestão da mudança, capacitação e resistência dos colaboradores. Por fim, destaca-se a oportunidade de evolução do modelo, com o desenvolvimento de uma arquitetura para coleta automática dos dados de produtividade e qualidade.

Conclui-se, portanto, que a adoção de uma abordagem estruturada, baseada em metodologias consolidadas, permite não apenas avaliar de forma consistente o grau de maturidade digital de empresas industriais, mas também direcionar os esforços de transformação digital de forma alinhada às suas capacidades e desafios específicos. Embora o caminho até os estágios mais avançados da Indústria 4.0 envolva complexidade, o presente trabalho traz um caminho para que os primeiros passos possam ser dados de forma objetiva, incremental e alinhada às reais necessidades do contexto industrial brasileiro.

REFERÊNCIAS

ACATECH. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0**. Munich, Germany: National Academy of Science e Engineering, 2016.

AGÊNCIA BRASIL. **Entenda o Programa Nova Indústria Brasil**. Acesso em: 14 jun. 2025. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-01/entenda-o-programa-nova-industria-brasil>.

BERTRAND, J Will M; MUNTSLAG, Dennis R. Production control in engineer-to-order firms. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 30, p. 3–22, 1993.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J. **UML: guia do usuário**. [S.l.]: Elsevier, 2006. ISBN 9788535217841.

CODD, E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. **Communications of the ACM**, v. 13, n. 6, p. 377–387, 1970.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **A Difusão das Tecnologias da Indústria 4.0 em Empresas Brasileiras**. [S.l.], 2020. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2020/9/difusao-das-tecnologias-da-industria-40-em-empresas-brasileiras/>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Sondagem Especial Indústria 4.0: Cinco Anos Depois**. [S.l.], 2022. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-83-industria-40-cinco-anos-depois/>.

DE BRUIN, Tonia; FREEZE, Ronald; KAULKARNI, Uday; ROSEMAN, Michael. Understanding the main phases of developing a maturity assessment model. In: AUSTRALASIAN Conference on Information Systems (ACIS). Sydney, Australia: [s.n.], 2005. p. 8.

DUMITRESCU, Roman; RIEMENSPERGER, Frank; SCHUH, Günther. **acatech Maturity Index Smart Services – Shaping the Transformation of Businesses to Smart Service Providers**. [S.l.]: acatech – National Academy of Science e Engineering, 2023.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Sistemas de Banco de Dados**. 6. ed. [S.l.]: Editora Pearson, 2010.

FORTES, Carlos S; TENERA, Alexandra B; CUNHA, Pedro F. Engineer-to-order challenges and issues: A systematic literature review of the manufacturing industry. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 219, p. 1727–1734, 2023.

GOSLING, Jonathan; NAIM, Mohamed M. Engineer-to-Order Supply Chain Management: A Literature Review and Research Agenda. **International Journal of Production Economics**, v. 122, n. 2, p. 741–754, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2021**. [S.l.: s.n.], 2021. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2024**. [S.l.: s.n.], 2024. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 28 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 18004:2018 – Information technology – QR Code bar code symbology specification**. [S.l.: s.n.], 2018.

MAGAL, Simha R; WORD, Jeffrey. **Integrated business processes with ERP systems**. [S.l.]: Wiley Publishing, 2011.

MESA. **MES Explained: A High Level Vision**. Pittsburgh, USA: MESA International, 1997.

MONOSTORI, László; KÁDÁR, Botond; BAUERNHANSL, Thomas et al. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 621–641, 2016.

MUCHIRI, Peter; PINTELON, Liliane. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. **International journal of production research**, Taylor & Francis, v. 46, n. 13, p. 3517–3535, 2008.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM**. [S.l.]: Productivity Press, 1988.

OBJECT MANAGEMENT GROUP. **Business Process Model and Notation (BPMN) Specification**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2/PDF>.

OHNO, Taiichi. **Toyota production system: beyond large-scale production**. [S.l.]: Productivity press, 2019.

OLIVEIRA JÚNIOR, Libório. **Proposta de um modelo de avaliação de maturidade organizacional para a Indústria 4.0 em pequenas e médias empresas brasileiras**. 2018. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR.

PORTER, M.E.; HEPPELMANN, J.E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. **Harvard Business Review**, v. 93, n. 11, p. 64–88, 2015.

PWC. **Industry 4.0: Building the Digital Enterprise**. [S.l.], 2016.

RODRIGUES, Thales Volpe; FERNADES, Carlos Henrique;
SANJULIÃO, Lo-Ruana Karen Amorim Freire. Abordagens conceituais da Indústria 4.0.

RÜSSMANN, Michael; LORENZ, Markus; GERBERT, Philipp; WALDNER, Manuela;
JUSTUS, Johannes; ENGEL, Pascal; HARNISCH, Michael. Industry 4.0: The future of
productivity and growth in manufacturing industries. **Boston Consulting Group**, v. 9,
p. 54–89, 2015.

SANTOS, Reginaldo Carreiro. **Proposta de modelo de avaliação de maturidade
da Indústria 4.0**. 2018. Diss. (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia de
Coimbra, Coimbra. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial.

SCHUH, Günther; ANDERL, Reiner; DUMITRESCU, Roman; KRÜGER, Antonio;
HOMPEL, Michael ten. **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital
Transformation of Companies – Update 2020**. [S.l.]: acatech – National Academy
of Science e Engineering, 2020.

SCHUH, Günther; ANDERL, Reiner; DUMITRESCU, Roman; KRÜGER, Antonio;
HOMPEL, Michael ten. **Using the Industrie 4.0 Maturity Index in Industry:
Current Challenges, Case Studies and Trends**. [S.l.]: acatech – National Academy
of Science e Engineering, 2020.

SCHUMACHER, Andreas; EROL, Selim; SIHN, Wilfried. A maturity model for
assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. In:
ELSEVIER. *PROCEDIA CIRP*. [S.l.: s.n.], 2016. v. 52, p. 161–166.

VDMA, IMPULS-Stiftung des. **Industrie 4.0 Readiness**. [S.l.], 2016. Accessed:
2025-06-14. Disponível em: [https://impuls-stiftung.de/wp-
content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-english.pdf](https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-english.pdf).

WANG, S.; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0:
An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1,
2016.

WHITE, Stephen A.; MIERS, Derek. **BPMN Modeling and Reference Guide:
Understanding and Using BPMN**. [S.l.]: Future Strategies Inc., 2011.

APÊNDICE A – Questionário de Avaliação de Maturidade Organizacional para a Indústria 4.0

O questionário a seguir foi elaborado com base no modelo de avaliação de maturidade proposto por Santos (2018), estruturado em cinco dimensões principais: (1) Estratégia, Estrutura e Cultura Organizacional; (2) Equipes de Trabalho; (3) Fábricas Inteligentes; (4) Processos Inteligentes; e (5) Produtos e Serviços Inteligentes. Seu objetivo é avaliar o grau de maturidade digital da organização frente aos princípios da Indústria 4.0.

Cada questão deve ser respondida considerando uma escala de maturidade que varia de 0 a 5, conforme os critérios a seguir:

- **Nível 0** — Baixo ou nenhum grau de implementação;
- **Nível 1** — Em planejamento ou desenvolvimento de ações piloto;
- **Nível 2** — Início da implementação de ações, com alguns benefícios observados;
- **Nível 3** — Implementação parcial de ações, que elevam a competitividade da empresa;
- **Nível 4** — Implementação avançada de ações, com claros retornos econômicos;
- **Nível 5** — Referência na aplicação dos conceitos e implementação de tecnologias da Indústria 4.0.

1. ESTRATÉGIA, ESTRUTURA E CULTURA ORGANIZACIONAL

1. A empresa analisa continuamente os impactos da Indústria 4.0 para sua competitividade no médio e longo prazos?
2. Incorpora os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 como fatores-chave na estratégia competitiva?
3. Possui indicadores apropriados para monitorar o desdobramento das ações da Indústria 4.0, alinhados a metas e objetivos realistas?
4. Planeja e realiza investimentos necessários para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0?
5. A estrutura organizacional está orientada à inovação e à incorporação de novas tecnologias?
6. A alta administração e as gerências disponibilizam recursos para viabilizar as ações de transformação digital?
7. Existe comunicação ágil e digitalizada com clientes para aquisição de informações?

8. As ações estratégicas e operacionais da Indústria 4.0 possuem como foco os requisitos do cliente?
9. Há compartilhamento de informações relevantes com outras empresas da cadeia de valor para uma tomada de decisão ágil?
10. Existe uma coordenação central formalizada para a condução das ações de transformação digital?

2. EQUIPES DE TRABALHO

11. As equipes possuem as habilidades técnicas e gerenciais necessárias para implementar as ações da Indústria 4.0?
12. A empresa realiza capacitações contínuas para desenvolvimento dessas competências?
13. A estrutura organizacional e os processos de decisão promovem flexibilidade e autonomia das equipes?
14. Existe incentivo à criatividade e ao empoderamento dos colaboradores frente aos desafios da transformação digital?
15. Observa-se abertura dos colaboradores à inovação, ao aprendizado contínuo e uma atuação responsiva às mudanças de contexto?

3. FÁBRICAS INTELIGENTES

16. As instalações e os equipamentos de produção possuem cópias digitais que reproduzem virtualmente o ambiente físico?
17. Existe atualização bidirecional de informações entre os ativos físicos e suas cópias digitais?
18. A infraestrutura fabril possui sistemas embarcados que permitem processamento de dados e comunicação entre sistemas?
19. Os sistemas de informação, comunicação e operação são integrados e atendem aos requisitos de interoperabilidade?
20. São adquiridos dados a partir de sensores e atuadores de forma automatizada e em tempo real?
21. Os equipamentos são dotados de inteligência artificial, permitindo aprendizado contínuo e decisões autônomas?
22. Os layouts de produção são reconfiguráveis de forma ágil, permitindo atender variações de produtos e demanda?

23. A empresa faz uso de dispositivos móveis inteligentes para flexibilizar e otimizar as operações?

4. PROCESSOS INTELIGENTES

24. São utilizadas tecnologias de hardware e software para armazenamento e processamento de dados em nuvem?
25. São adotadas práticas de segurança cibernética, proteção física dos ativos e proteção contra roubos ou uso indevido dos dados?
26. Os processos produtivos operam de forma autônoma, auxiliados por sistemas de aprendizado de máquina?
27. Os processos de negócio são projetados para uma partilha ágil de informações dentro da empresa e com parceiros externos?
28. Os processos estão digitalizados e incorporados em sistemas integrados de informação e comunicação?
29. Existem recursos digitais para modelagem e simulação do desempenho dos processos?
30. São utilizados recursos de computação visual, como realidade aumentada, realidade virtual e sistemas supervisórios?
31. Esses recursos de computação visual oferecem informações e interfaces contextualizadas às tarefas?
32. Os processos são suportados por sistemas de mineração de dados que processam grandes volumes de dados de forma sistemática e em tempo real?

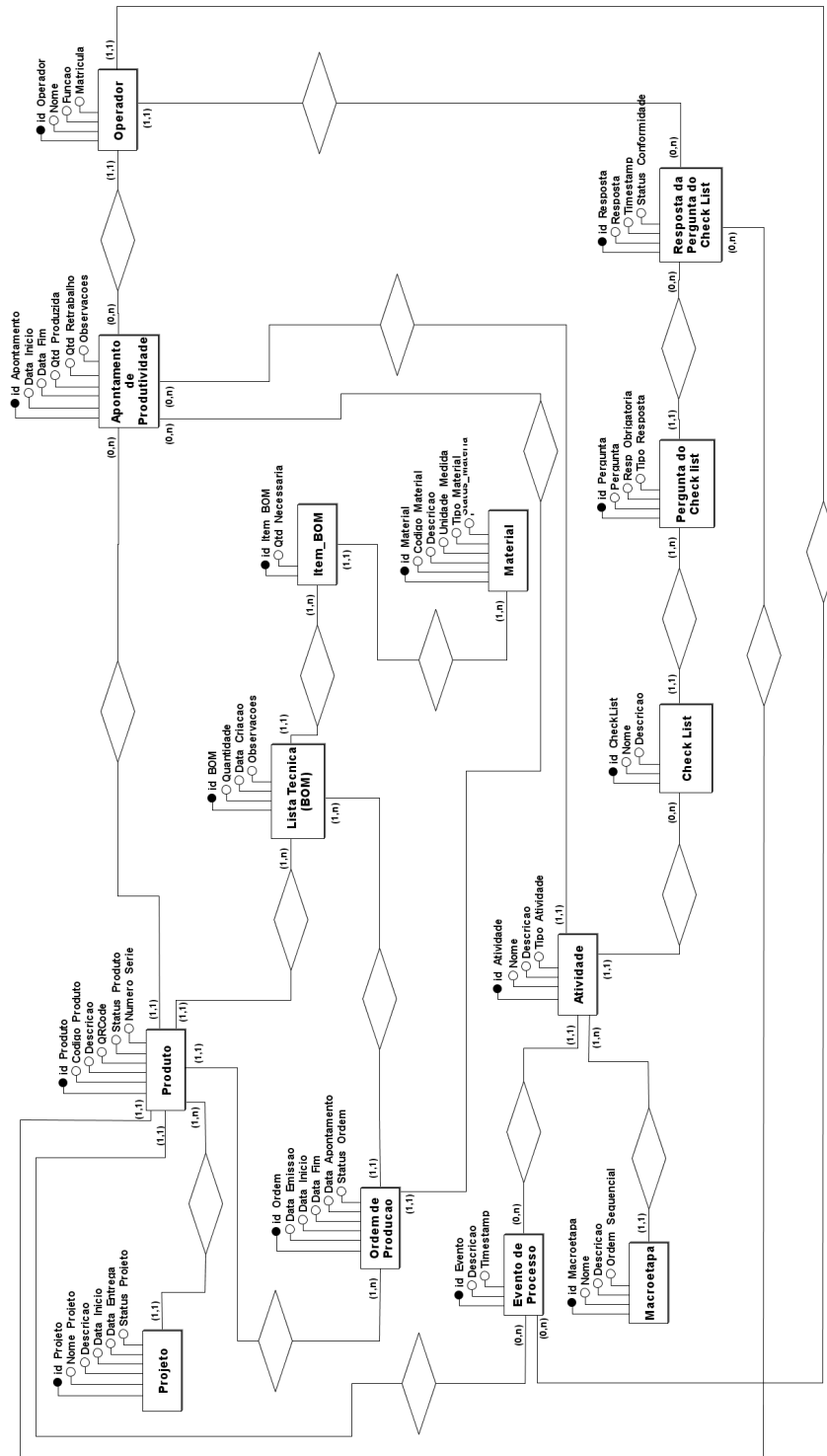
5. PRODUTOS E SERVIÇOS INTELIGENTES

33. Os produtos possuem sistemas embarcados e são inteligentes?
34. Os produtos são dotados de sistemas de inteligência artificial que permitem auto-otimização e monitoramento do desempenho?
35. Os sistemas embarcados possibilitam comunicação com a fábrica e análise das condições de uso?
36. A empresa oferta serviços complementares aos produtos, baseados na análise de dados dos clientes e das condições de operação?
37. Os produtos possuem projeto digitalizado que pode ser compartilhado com fornecedores e parceiros da cadeia de valor?
38. São utilizados recursos de simulação digital das condições de uso e do desempenho dos produtos?

- 39. Os produtos e serviços são individualizados, atendendo às demandas específicas dos clientes?
- 40. A sistemática e os recursos disponíveis permitem reconfigurar rapidamente as características dos produtos?
- 41. Os sistemas embarcados nos produtos se integram aos sistemas operacionais e gerenciais da empresa?

APÊNDICE B – Modelo Conceitual do Banco de Dados Proposto

Figura 24 – Modelo conceitual do banco de dados proposto para a digitalização dos processos da empresa hipotética.



Fonte: O Autor.