

CAYAMI SCHULTZ CHIOVITTI CAVALCANTE

Indústria 4.0 na pré-fabricação: modelo de maturidade e quadro atual
de desenvolvimento tecnológico de fabricantes da construção
industrializada

São Paulo

2023

CAYAMI SCHULTZ CHIOVITTI CAVALCANTE

**Indústria 4.0 na pré-fabricação: modelo de maturidade e quadro atual
de desenvolvimento tecnológico de fabricantes da construção
industrializada**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Inovação na Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Rogerio Corrêa

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de junho de 2023

Assinatura do autor: Cayami S. C. Cavalcante

Assinatura do orientador: 

Catálogo-na-publicação

Cavalcante, Cayami

Indústria 4.0 na pré-fabricação: modelo de maturidade e quadro atual de desenvolvimento tecnológico de fabricantes da construção industrializada / C. Cavalcante -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

206 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Indústria 4.0 2. Pré-fabricação 3. Construção civil 4. Industrialização da construção 5. Modelo de Maturidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.

CAVALCANTE, Cayami Schultz Chiovitti

Indústria 4.0 na pré-fabricação: modelo de maturidade e quadro atual de desenvolvimento tecnológico de fabricantes da construção industrializada

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Assinatura:

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Assinatura:

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, minha mais profunda gratidão pelo apoio e paciência ao longo de minha jornada para concluir meu mestrado, mesmo durante os momentos mais desafiadores.

RESUMO

Na indústria de modo geral, uma tendência iniciada a partir da integração de ferramentas de projeto com maquinário automatizado de produção como as máquinas CNCs, e posteriormente desenvolvida para permitir a integração do sensoriamento do chão de fábrica com os sistemas de gestão da empresa, culmina na atualidade com a convergência de uma série de novas tecnologias, como a Internet das Coisas e os Sistemas Ciberfísicos, implantadas nas fábricas e dá origem à Indústria 4.0. Essa nova fase de desenvolvimento industrial é caracterizada por sistemas produtivos flexíveis e inteligentes com capacidades avançadas de autoconfiguração, auto-otimização. As fábricas inteligentes da Indústria 4.0 serão capazes de se adaptarem às incertezas de logística e produção e às demandas variáveis de mercado de modo que a individualização da produção seja possível com custo equiparável à da produção em massa. Entende-se que há um potencial para aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 no setor da construção, e em especial na pré-fabricação. A construção industrializada baseada na pré-fabricação de elementos para sistemas construtivos industrializados apresenta potencial mitigar muitas das causas-raiz dos problemas de produtividade na construção civil. Além disso, o BIM atualmente exerce função importante na digitalização da cadeia produtiva da construção. A variabilidade das tipologias dos edifícios, que apresenta desafio para a pré-fabricação, poderá ser enfrentada pela implementação de BIM para produção automatizada e de tecnologias da Indústria 4.0. Mas qual é o nível de maturidade dos fabricantes da construção industrializada no que se refere à implementação de tecnologias da Indústria 4.0? Para responder à questão de pesquisa, propõem-se criar um Modelo de Maturidade (MM-FCI4.0), uma ferramenta de avaliação para fabricantes da construção industrializada desenvolvida por meio da metodologia de *Design Science Research*. A estrutura conceitual do modelo proposto possui três dimensões: Dimensão de Tecnologias e Conceitos, Dimensão Operacional e Dimensão dos Objetivos da Indústria 4.0. As respostas ao MM-FCI4.0 foram fornecidas por 29 Fabricantes da Construção Industrializada dos setores de pré-fabricação dando embasamento para a realização de um diagnóstico nacional.

Palavras-Chave: Indústria 4.0, Construção Industrializada, Modelo de Maturidade

ABSTRACT

Industrial production systems have evolved in recent decades by incorporating greater levels of flexible manufacturing capabilities, specifically through the approximation of digital design tools and automated production machinery. The digital integration of the shop floor by the expansion of sensing abilities which feed data into multilevel enterprise management systems is now taken to another level with the introduction of the Internet of Things and Cyber-Physical Systems into manufacturing environments, leading to the emergence of Industry 4.0. This new phase of industrial development is characterized by flexible and intelligent production systems with advanced self-configuration and self-optimization capabilities. Industry 4.0 smart factories will be able to adapt to logistics and production uncertainties and changing market demands so that the individualization of production is possible at a cost comparable to that of mass production. It is understood that there is potential for applying Industry 4.0 concepts in the construction sector, and in particular in prefabrication. Industrialized construction based on the prefabrication of elements for industrialized construction systems has the potential to mitigate many of the root causes of productivity problems faced by the construction industry. In addition, Building Information Modeling currently plays an important role in the digitization of the construction lifecycle. The variability of building typologies, which presents a challenge for prefabrication, can be tackled by implementing BIM for automated production and Industry 4.0 technologies. But what is the level of maturity of industrialized construction manufacturers with regard to the implementation of Industry 4.0 technologies? To answer the research question, this study proposes the creation of a Maturity Model (MM-FCI4.0), an evaluation tool for manufacturers of industrialized construction developed through the methodology of Design Science Research. The conceptual structure of the proposed model has three dimensions: the Technological Dimension, the Operational Dimension and the Industry 4.0 Objectives Dimension. The responses to the MM-FCI4.0 were provided by 29 Manufacturers of Industrialized Construction in the prefabrication ranging from prefabricated concreted structures, steel structures, and wood-frame as well as Modular Construction companies providing the basis for carrying out a national diagnosis of Industry 4.0 maturity.

Keywords: Industry 4.0, Industrialized Construction, Maturity Model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia de pesquisa DSR e relações entre etapas de pesquisa e produtos.	25
Figura 2 - Metodologia de desenvolvimento do modelo de maturidade.	28
Figura 3 - Modelo CIM integra todos os níveis da produção industrial.....	45
Figura 4 – Ilustração das relações entre IoT, Computação em Nuvem e Analítica de Big Data	54
Figura 5 - Níveis de integração digital.	57
Figura 6 - Mapeamento científico das coocorrências de palavras-chave das tecnologias da Indústria 4.0 no contexto da pré-fabricação e construção modular ...	68
Figura 7 - Corte e dobra automática de armaduras.....	74
Figura 8 – Máquina de solda automática de telas de aço	74
Figura 9 - Robô de montagem de fôrmas.....	75
Figura 10 - Distribuidor automático de concreto.....	75
Figura 11 - Fabricação robótica de vigas de aço.....	76
Figura 12 - Máquina multifuncional porticada para fabricação de painéis de madeira	77
Figura 13 - Diagrama de interações dos agentes analisados no Modelo de Maturidade proposto.	96
Figura 14 - Estrutura Conceitual do MM-FCI4.0.....	99
Figura 15 - Exemplo de Questão com somente um Item de Maturidade	100
Figura 16- Exemplo de Questão com diversos Itens de Maturidade agrupados	100
Figura 17 - Ilustração da Multiplicação Matricial.....	105
Figura 18 - Distribuição de respondentes e PIB por UF	119
Figura 19 – Resumo Visual do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico da Indústria 4.0	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese da ocorrência de tecnologias nas revisões sistemáticas da I4.043	
Quadro 2 - Termos de busca na pesquisa bibliográfica e número de artigos identificados	64
Quadro 3 - Palavras-chave identificados na análise de coocorrência pelo VOSviewer	67
Quadro 4 - Relação de artigos selecionados e os correspondentes índices WoS Core	70
Quadro 5 - Agrupamentos na Dimensão Tecnológica.....	95
Quadro 6 - Dimensão Operacional do Modelo de Maturidade	97
Quadro 7 - Dimensão Objetivos da Indústria 4.0.....	99
Quadro 8 - Exemplo de Item de Maturidade.....	102
Quadro 9 – Estrutura da Matriz de Pesos	104
Quadro 10 – Exemplo de Item de Maturidade.....	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Série histórica de publicações	65
Gráfico 2 - Matriz de dispersões dos pesos atribuídos aos objetivos da Indústria 4.0	109
Gráfico 3 - Respondentes por subsetor de atuação	117
Gráfico 4 - Número de respondentes por tamanho de empresa	117
Gráfico 5 - Número de respondentes por faturamento anual	118
Gráfico 6 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT1	123
Gráfico 7 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT2	127
Gráfico 8 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT3	131
Gráfico 9 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT4	134
Gráfico 10 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT5	137
Gráfico 11 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT6	140
Gráfico 12 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT7	144
Gráfico 13 - Diagrama radar das médias amostrais dos Fatores da Dimensão Tecnológica	145
Gráfico 14 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP1	150
Gráfico 15 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP2	152
Gráfico 16 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP3	154
Gráfico 17 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP4	155
Gráfico 18 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP5	156
Gráfico 19 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP6	157
Gráfico 20 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP7	158
Gráfico 21 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP8	159
Gráfico 22 - Nível de maturidade ao longo da Dimensão Operacional.....	160
Gráfico 23 - Distribuição de FCIs quanto ao IMI4.0.....	161
Gráfico 24 - Gráfico de radar da Dimensão Tecnológica da empresa outlier	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de correlação de Pearson dos pesos atribuídos pelos especialistas consultados para Integração Digital	108
Tabela 2 - Somatória de pesos por Objetivo da I4.0 após ponderação.....	113
Tabela 3 - Faturamento anual x Tamanho da empresa	118
Tabela 4 - Itens de maturidade do GT1.....	121
Tabela 5 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT1	122
Tabela 6 - Intervalo de confiança da média populacional do índice de maturidade em GT1	124
Tabela 7 - Itens de maturidade do GT2.....	125
Tabela 8 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT2	126
Tabela 9 - Itens de maturidade do GT3.....	128
Tabela 10 - Itens de maturidade do GT4.....	132
Tabela 11 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT4	133
Tabela 12 - Intervalo de confiança da média populacional do índice de maturidade em GT4	135
Tabela 13 - Itens de maturidade do GT5.....	135
Tabela 14 - Itens de maturidade do GT6.....	138
Tabela 15 - Itens de maturidade do GT7.....	142
Tabela 16 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT7	143
Tabela 17 - Matriz de correlações de Pearson dos Fatores da Dimensão Tecnológica	146
Tabela 18 - Matriz de valores-p das correlações entre os Fatores da Dimensão Tecnológica.....	147
Tabela 19 - Resumo dos resultados da segunda regressão linear	148
Tabela 20 - Médias dos itens de maturidade do OP2	153
Tabela 21 - Tabela de Tau de Kendall entre fatores de análise do modelo e faturamento anual	162
Tabela 22 - Tabela de Tau de Kendall entre fatores de análise do modelo e tamanho da empresa	163

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABCEM	Associação Brasileira da Construção Metálica
ABCIC	Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto
ABD	Analítica de Big Data
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria Materiais de Construção
ACATECH	Academia Alemã de Ciência e Engenharia
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AGV	Automated Guided Vehicle
AI	Artificial Intelligence
AMHS	Automated Material Handling System
ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modeling
BIMe	BIM Excellence Maturity Matrix
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CLP	Controlador Lógico Programável
CN	Computação em Nuvem
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CPPS	Cyber-Physical Production System
CPS	Cyber-Physical System
CRM	Customer Relationship Management
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DSR	Design Science Research
DT	Digital Twin
EOP	Eficiência Operacional
ERP	Enterprise Resource Management
ETO	Engineered-to-Order
FMS	Flexible Manufacturing System

FCI	Fabricante da Construção Industrializada
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GT	Grupo Tecnológico (Fator da Dimensão Tecnológica)
H2H	Human to Human Communication
H2M	Human to Machine Communication
I	Item do Modelo de Maturidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Integração Digital
IFC	Industry Foundation Classes
IMI4.0	Índice de Maturidade da Indústria 4.0
IP	Individualização da Produção
IPD	Integrated Project Delivery
I/O	Input/Output
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IoT/S	Internet of Things and Services
IoS	Internet of Services
I4.0	Indústria 4.0
LADAR	Laser Detection and Ranging
LIDAR	Light Detection and Ranging
LOD	Level of Development (BIM)
LoRa	Long Range (Radio Communication)
MES	Manufacturing Execution System
MLCC	Madeira Laminada Colada Cruzada
MM-FCI4.0	Modelo de Maturidade para Fabricantes da Construção Industrializada 4.0
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBIMS-CMM	National Building Information Modeling Standards - Capability Maturity Model
NC	Numerical Control
NFC	Near Field Communication
OP	Processo (Fator da Dimensão Operacional)

PIB	Produto Interno Bruto
PLM	Product Lifecycle Management
RANSAC	Random Sample Consensus
RFID	Radio Frequency Identification
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCM	Supply Chain Management
SCO	Smart Construction Object
SOA	Service Oriented Architecture
SVM	Support Vector Machines
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UF	Unidade Federativa
VDC	Virtual Design and Construction
WoS	Web of Science

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE QUADROS	9
LISTA DE GRÁFICOS.....	10
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. OBJETIVO	23
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2. METODOLOGIA	25
2.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	26
2.2. CONSCIENTIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	26
2.2.1. Contextualização da Construção Industrializada	26
2.2.2. Sistematização das Tecnologias da Indústria 4.0.....	26
2.2.3. Configuração da Indústria 4.0 para FCIs	27
2.3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MATURIDADE	28
2.4. COLETA E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	30
2.5. CONCLUSÃO	31
3. CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA E PRÉ-FABRICAÇÃO	32
3.1. O PROBLEMA DA PRODUTIVIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	32
3.1.1. Complexidade e dinamicidade do canteiro de obras	32
3.1.2. Complexidade e variabilidade dos edifícios.....	33
3.1.3. Coordenação deficitária no processo de projeto.....	33
3.1.4. Necessidade de melhor execução e gestão de obras	33
3.1.5. Baixa digitalização e inovação no setor.....	34
3.2. CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA COMO RESPOSTA À BAIXA PRODUTIVIDADE	35
3.3. ABORDAGENS PARA MAIOR PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E FLEXIBILIDADE NA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA	36
3.3.1. Princípios de Design Modular.....	37
3.3.2. BIM para Pré-fabricação.....	37
3.3.2.1. Automação de projetos detalhados de componentes	37
3.3.2.2. Ciclos iterativos de projeto reduzidos.....	38
3.3.2.3. Construção virtual	38

3.3.2.4.	Logística e Processo.....	39
3.3.2.5.	BIM na Execução da Obra.....	39
3.3.2.6.	BIM e Produção Automatizada.....	39
3.4.	RECAPITULAÇÃO.....	40
4.	CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0.....	42
4.1.	ORIGEM DO CONCEITO - INDÚSTRIA 4.0.....	42
4.2.	SISTEMATIZAÇÃO DO ESCOPO TECNOLÓGICO.....	43
4.3.	DEFINIÇÕES DAS TECNOLOGIAS-CHAVE.....	44
4.3.1.	Automação Industrial e Robótica.....	44
4.3.1.1.	Manufatura Integrada por Computador.....	44
4.3.1.2.	Sistemas Flexíveis de Manufatura.....	45
4.3.1.3.	CNC – CAD/CAM.....	46
4.3.1.4.	CLP.....	47
4.3.1.5.	AMHS.....	47
4.3.1.6.	Robôs Industriais.....	48
4.3.2.	Internet das Coisas e Serviços.....	48
4.3.3.	Computação em Nuvem.....	50
4.3.4.	Análítica de Big Data.....	51
4.3.5.	Modelagem, Simulação e Gêmeos Digitais.....	55
4.3.6.	Sistemas Ciberfísicos.....	60
4.4.	CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA E INDÚSTRIA 4.0.....	62
5.	INDÚSTRIA 4.0 NA PRÉ-FABRICAÇÃO.....	63
5.1.	ANÁLISE QUANTITATIVA.....	63
5.2.	ANÁLISE QUALITATIVA.....	72
5.3.	REQUISITOS ESPECÍFICOS DOS FCIs.....	80
5.4.	MODELOS DE MATURIDADE E ANÁLISES DE APLICABILIDADE.....	82
5.4.1.	Modelos de Maturidade da Indústria 4.0.....	82
5.4.2.	Modelos de Maturidade BIM.....	85
5.4.3.	Síntese da Aplicabilidade de Modelos de Maturidade.....	89
6.	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MATURIDADE.....	91
6.1.	VISITAS TÉCNICAS E ENTREVISTAS.....	91
6.2.	REQUISITOS DO MODELO DE MATURIDADE.....	92
6.2.1.	Foco no Fabricante.....	92
6.2.2.	Foco Tecnológico.....	92

6.2.3.	Foco Operacional	93
6.2.4.	Autoavaliação	93
6.2.5.	Prático – quantitativo	93
6.2.6.	Adaptabilidade	93
6.3.	ESTRUTURA CONCEITUAL DO MODELO	94
6.3.1.	Dimensão Tecnológica	94
6.3.2.	Dimensão Operacional	95
6.3.3.	Dimensão dos Objetivos da Indústria 4.0	97
6.4.	ESTRUTURA PRÁTICA DO MODELO	99
6.5.	ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO	100
6.5.1.	Ferramenta de Coleta	100
6.5.2.	Itens de Maturidade	100
6.5.2.1.	Perguntas	101
6.5.2.2.	Escalas de Respostas	101
6.5.3.	Testes Iniciais e Iterações do Questionário	102
6.6.	ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE PESOS	103
6.6.1.	Atribuição de Pesos às Dimensões (Tecnológica e Operacional)	103
6.6.2.	Cálculo dos Níveis de Maturidade dos Fatores	104
6.6.3.	Atribuição de Pesos à Dimensão Objetivos da Indústria 4.0	105
6.6.4.	Definição do Índice da Maturidade	113
6.7.	MÉTODOS E CANAIS DE DISTRIBUIÇÃO	114
6.7.1.	Webinar da Indústria 4.0	114
6.7.2.	Coleta de Dados	115
7.	RESULTADOS	116
7.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS RESPONDENTES	116
7.2.	ANÁLISE DA DIMENSÃO TECNOLÓGICA	120
7.2.1.	GT1 - Tecnologias de Projeto	120
7.2.2.	GT2 – Máquinas de Produção	125
7.2.3.	GT3 - Redes Industriais	128
7.2.4.	GT4 - Sensores	132
7.2.5.	GT5 - Analítica de Dados	135
7.2.6.	GT6 - Gêmeos Digitais	138
7.2.7.	GT7 – Sistemas de Produção Ciberfísicos	141
7.2.8.	Análise Cruzada entre Fatores da Dimensão Tecnológica	145

7.3.	ANÁLISE DA DIMENSÃO OPERACIONAL	150
7.3.1.	OP1 - Desenvolvimento de Projeto.....	150
7.3.2.	OP2 - Entrada de Parâmetros de Produção	151
7.3.3.	OP3 - Produção	153
7.3.4.	OP4 - Logística	154
7.3.5.	OP5 - Captura de Dados	155
7.3.6.	OP6 - Transmissão de Dados.....	156
7.3.7.	OP7 - Armazenamento e Processamento de Dados	157
7.3.8.	OP8 - Aplicações Avançadas	158
7.3.9.	Perfil de Maturidade ao Longo da Cadeia de Produção	159
7.4.	ÍNDICE DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0	161
7.4.1.	Resultados por Faturamento Anual	162
7.4.2.	Resultados por Número de Funcionários	163
7.4.3.	Análise do Outlier	164
7.5.	SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	165
7.5.1.	Resumo do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico do Setor	165
7.5.2.	Caminhos para Avanço da Indústria 4.0 nos FCIs.....	168
8.	CONCLUSÃO	170
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	186
	APÊNDICE B – MATRIZ DE PESOS	204

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 40 anos, a computação e a conectividade se tornaram ubíquas transformando radicalmente o mundo com um impacto comparável ao da mecanização e da eletricidade nas duas primeiras Revoluções Industriais (KAGERMANN, WAHLSTER; HELBIG, 2013). Além disso, nos últimos dez anos, a internet extrapolou os domínios do desktop tradicional, permitindo acesso por smartphones e por outros dispositivos inteligentes através da Internet das Coisas (IoT, do Inglês, *Internet of Things*), potencializado por recursos computacionais disponíveis em nuvem.

Atualmente, a conexão entre usuários e objetos sensorizados pela internet gera uma série de novas aplicações e serviços. A disponibilidade de dados em enormes volumes e variedades exige uma gestão sistemática destes com novas técnicas e ferramentas que permitam extrair informações e gerar novos conhecimentos. A associação de diferentes bases de conhecimento fundamentados em modelos físicos, operacionais e estatísticos, adicionados a dados históricos e dados fornecidos por sensores em tempo real, permite a usuários e computadores criarem um espelho digital de ativos e processos físicos.

A introdução e a convergência dessas e outras novas tecnologias no ambiente das fábricas estão transformando novamente o mundo da produção. O termo Indústria 4.0 (I4.0) descreve 'mudanças iminentes do cenário da indústria' (BRETTEL *et al.*, 2014), se referindo à quarta revolução industrial, que se desenvolve a partir das três primeiras: I1.0 - Mecanização; I2.0 – Emprego de eletricidade e linhas de produção; I3.0 - Tecnologias de informação e comunicação e automação.

Como 'resultado da transformação digital' (KREINSEN *et al.*, 2019), a ampliação das capacidades dos computadores embarcados nos sistemas de automação industrial pela conexão à internet resulta numa maior intersecção do mundo físico e do mundo virtual na forma de Sistemas Ciberfísicos (CPS, do inglês, *Cyber-Physical Systems*). No contexto das fábricas inteligentes da Indústria 4.0, o maquinário do chão-de-fábrica e de equipamentos que executam a logística interna podem se conectar às ferramentas e bases de conhecimento pela internet, estendendo a evolução na indústria além da automação e envolvendo maior flexibilidade operacional em decorrência de capacidades de autoconfiguração, auto otimização dos sistemas produtivos em tempo real.

Através da integração digital, as empresas adquirem a capacidade de ajustar parâmetros de execução a fim de alcançar maior eficiência operacional, não somente em pontos discretos de aplicação, mas simultaneamente, ao longo de toda a cadeia produtiva. Através de sistemas flexíveis e reconfiguráveis de produção, a fabricação de produtos customizados, podem ser manufaturados com a eficiência e a preços de produção em massa. Além disso, novas estruturas organizacionais surgem em redes horizontais colaborativas, em que capacidades de produção podem ser distribuídas de maneira autônoma permitindo o melhor uso de recursos flexíveis de produção.

A antecipação das possibilidades da I4.0 movimenta um empenho coletivo de industrialistas, acadêmicos, e governos para a sua realização e carrega, inerentemente, as incertezas da previsão de desenvolvimentos tecnológicos futuros. No entanto, as oportunidades vislumbradas para a indústria da manufatura despertam o interesse de outros setores na implantação de um novo paradigma de produção industrial.

A construção civil em geral apresenta características distintas das indústrias de manufatura, automobilística e aeronáutica, onde os conceitos da I4.0 já ganharam maior tração. Apesar de sua importância para as economias nacionais, (variando entre 4,0% e 8,0% do PIB brasileiro entre 1995 e 2020, segundo dados do IBGE), o setor da construção civil é um dos menos digitalizados no mundo (MCKINSEY, 2017), embora pesquisas na área já tenham comprovado que, por exemplo, a utilização de ferramentas computacionais e sistemas de informação aumenta a produtividade e evita a ocorrência de erros, em análise do segmento de construção de edifícios (CARDOSO, 2005). Falta na área, uma cultura de inovação (PAN *et al.*, 2020) e a fragmentação da indústria dificulta a concentração de recursos e esforços para a introduzir novos métodos e ferramentas de trabalho. Esses fatores e outros característicos do setor como a complexidade e dinamicidade do canteiro de obras, variabilidade das edificações e dificuldades na integração de projeto e construção, resultam numa estagnação da produtividade.

O aumento da geração de valor para todos os agentes da cadeia produtiva da construção exige o crescimento da produtividade pelo avanço da industrialização no setor, que por sua vez, se desenvolve a partir do avanço dos meios de produção (métodos, processos e sistemas construtivos) e da evolução tecnológica (aplicação de conhecimento científico para aplicações práticas como o desenvolvimento de máquinas, equipamentos e ferramentas de diversos tipos).

A pré-fabricação de componentes e elementos para edifícios exerce papel importante na industrialização da construção. Pré-fabricação significa a produção de produtos construtivos através de técnicas industriais em plantas especializadas onde elementos podem ser manufaturados independentemente de clima e debaixo de condições ótimas de produção (STÄIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008). Do contexto controlado sucede a redução de incertezas que apresentam riscos ao planejamento da produção. A repetibilidade de processos permite a eliminação de desperdícios e otimização operacional resultando, por fim, em vantagens como qualidade constante e a redução de prazos e custos de construção.

Sistemas construtivos industrializados utilizam componentes pré-fabricados com elevados níveis de industrialização e organização (SABBATINI, 1989). A pré-fabricação industrial de componentes para sistemas construtivos industrializados surgiu junto com a primeira revolução industrial no século XIX, com a produção serial de elementos estruturais em aço (STÄIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008). Outros exemplos de sistemas construtivos industrializados incluem concreto pré-moldado/protendido, *light steel frame*, *wood frame*, Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC) e construção modular, tratados neste trabalho pelo termo Fabricantes da Construção Industrializada (FCIs).

Apesar da pré-fabricação industrial para construção não ser um conceito novo, há uma renovação recente de interesses tanto da academia quanto da indústria (RAZKENARI *et al.*, 2019; BERTRAM *et al.*, 2019) devido aos benefícios potenciais como reduções de prazos e de custos de construção, a crescente conscientização sobre a construção sustentável e a ampla adoção de tecnologias digitais como ferramentas de Modelagem de Informação de Construção (BIM, do inglês *Building Information Modeling*) por profissionais da construção (RAZKENARI *et al.*, 2019). De acordo com (BERTRAM *et al.*, 2019), as tecnologias digitais aumentam a qualidade e variabilidade do projeto, melhoram a precisão e a produtividade no processo de fabricação e ainda facilitam a coordenação logística entre agentes da cadeia de valor.

A modelagem da informação da construção viabiliza e amplifica os ganhos potenciais da pré-fabricação pela integração e coordenação de informações permitindo a avaliação conjunta de múltiplas disciplinas envolvidas no processo construtivo. Além disso, dados paramétricos de modelos podem ser utilizados para gerar comandos numéricos para diversas máquinas automatizadas de produção, possibilitando maiores ganhos de produtividade e flexibilidade de design. A

variabilidade de tipologias dos edifícios ainda apresenta um desafio para construção industrializada, exigindo processos de projeto, planejamento e engenharia dedicados para cada obra.

A pré-fabricação de sistemas construtivos industrializados é o ponto onde a construção civil mais se aproxima da manufatura. Com a quarta revolução industrial chegando na indústria da manufatura, entende-se que há um potencial semelhante para aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 na pré-fabricação, inclusive para abordar o desafio da variabilidade dos edifícios. Embora a indústria da construção esteja atrasada nos processos de industrialização e digitalização, neste momento, surge a questão central que este trabalho se propõe a responder:

No Brasil, em que estágio Fabricantes da Construção Industrializada (FCIs) se encontram, no que se refere à implementação de tecnologias da Indústria 4.0?

Para responder esta questão, surge uma segunda questão que também deverá ser respondida pela pesquisa:

Como os Fabricantes da Construção Industrializada (FCIs) podem ser caracterizados quanto à maturidade de desenvolvimento tecnológico rumo à implementação da Indústria 4.0?

Para responder estas questões, este trabalho propõem a criação do Modelo de Maturidade para Fabricantes da Construção Industrializada 4.0 (MM-FCI4.0), uma ferramenta de avaliação para FCIs associada a um sistema de pontuação para determinar o Índice de Maturidade da Indústria 4.0. O Modelo de Maturidade servirá tanto para a caracterização individual do nível de desenvolvimento tecnológico-industrial das empresas quanto para a informar o Quadro de Desenvolvimento Tecnológico do setor em um momento de aplicação, sendo a avaliação da maturidade dos fabricantes um ponto de partida importante para a realização da Indústria 4.0 no setor da construção.

Vale ressaltar que a dinamicidade das aplicações de conhecimento científico para criar novas ferramentas implica na evolução constante do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico do setor. Sendo assim, considera-se que a

instanciação do uso do modelo seja fundamental para validar a ferramenta de avaliação e seja uma contribuição mais significativa para a pesquisa que a própria caracterização do setor em um instante histórico específico.

1.1. OBJETIVO

Esta pesquisa tem por objetivo criar o Modelo de Maturidade para Fabricantes da Construção Industrializada 4.0 (MM-FCI4.0) no paradigma proposto pela literatura da Indústria 4.0 e implementar o modelo a fim de validar o artefato e fornecer um Quadro Atual de Desenvolvimento Tecnológico do Setor.

Os objetivos específicos envolvem:

- a) Sistematizar as tecnologias da Indústria 4.0;
- b) Propor uma configuração das tecnologias da Indústria 4.0 para FCIs a partir do conjunto de tecnologias sistematizadas para a Indústria 4.0;
- c) Elaborar um Modelo de Maturidade tecnológica para FCIs no paradigma da Indústria 4.0;
- d) Validar o MM-FCI4.0 através da aplicação direcionada à FCIs brasileiros, fornecendo um Quadro Atual de Desenvolvimento Tecnológico do Setor.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da dissertação é constituída por oito Capítulos, de acordo com a descrição a seguir.

O Capítulo 1 exhibe a Introdução da pesquisa, contendo a contextualização, a justificativa, a questão de pesquisa formalizada, o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 descreve a metodologia de pesquisa, de desenvolvimento do modelo de maturidade e de análise dos resultados.

O Capítulo 3 inicia a conscientização do problema com uma fundamentação teórica para contextualização da construção industrializada por meio de sistemas construtivos industrializados, com ênfase da fase de pré-fabricação.

O Capítulo 4 continua a fundamentação teórica apresentando o conceito da Indústria 4.0, a sistematização do escopo tecnológico e as definições das tecnologias-chave identificadas, seus pré-requisitos e inter-relações.

O Capítulo 5 descreve as aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 na pré-fabricação de componentes e elementos para sistemas construtivos industrializados, conforme documentadas pela literatura científica. Inclui a avaliação de modelos de maturidade e ferramentas de avaliação concebidas para diagnosticar empresas quanto à maturidade na Indústria 4.0 e implementação de BIM.

O Capítulo 6 descreve o processo de desenvolvimento do Modelo de Maturidade e apresenta a ferramenta.

O Capítulo 7 apresenta e analisa os resultados da instanciação do Modelo de Maturidade no contexto da pré-fabricação brasileira.

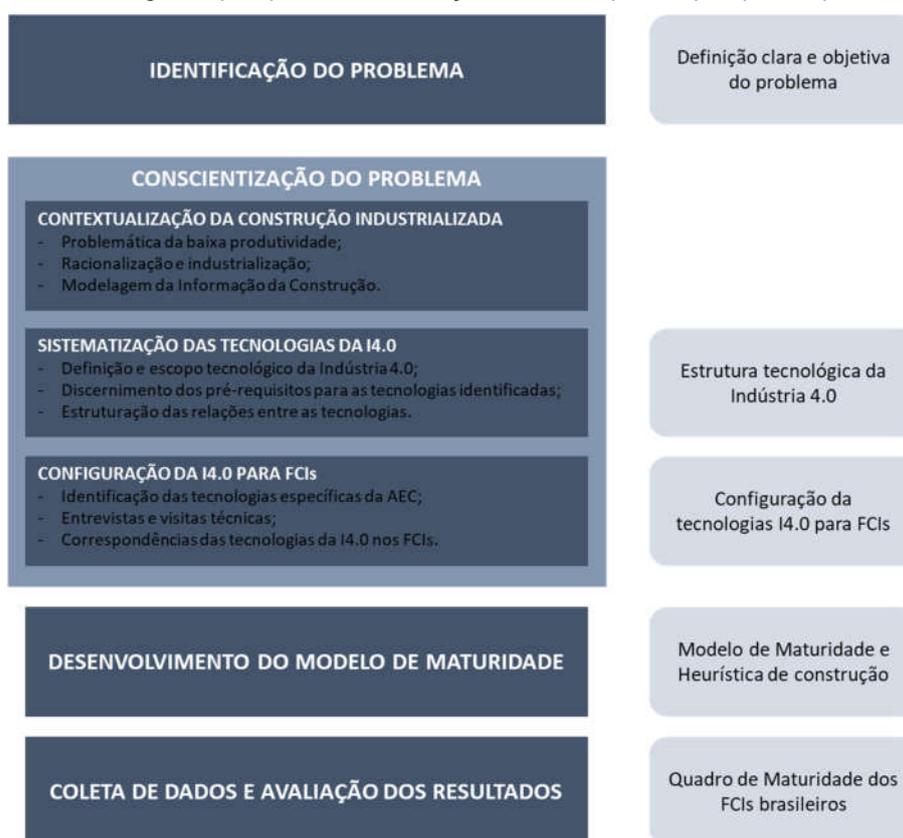
O Capítulo 8 conclui o trabalho, explicitando os conhecimentos elucidados, expondo as contribuições da pesquisa para os campos teórico e prático, e indicando as potencialidades de trabalhos futuros.

Por fim, os Apêndices compartilham o MM-FCI4.0, composto pelo Questionário e pela Matriz de Pesos.

2. METODOLOGIA

O método utilizado é a Design Science Research (DSR), “abordagem metodológica prescritiva orientada à solução de problemas específicos do mundo real, por meio da construção e avaliação de artefatos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

Figura 1 - Metodologia de pesquisa DSR e relações entre etapas de pesquisa e produtos.



Fonte: Próprio Autor.

Justifica-se a escolha da DSR por cinco motivos:

- A pesquisa possui validade pragmática sendo orientada à solução de um problema real e relevante;
- Os produtos da pesquisa são artefatos: Modelo de Maturidade e Quadro de Desenvolvimento Tecnológico;
- O Modelo de Maturidade é uma prescrição, ou solução projetada para um problema real;

- d) O Modelo de Maturidade passa por avaliação a fim de demonstrar sua utilidade;
- e) As soluções propostas para o problema podem ser generalizáveis para uma classe de problemas.

A metodologia de pesquisa segue o esquema apresentado pela Figura 1.

2.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com o DSR, a pesquisa se inicia pela identificação do problema que surge, principalmente, do interesse do pesquisador em encontrar resposta para um problema prático importante (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015). Dessa etapa resulta a definição clara e objetiva do problema.

2.2. CONSCIENTIZAÇÃO DO PROBLEMA

Em seguida, a conscientização do problema envolve o esforço para compreensão abrangente e profunda do mesmo, de suas facetas, causas e contexto. A pesquisa divide a conscientização do problema em três etapas.

2.2.1. Contextualização da Construção Industrializada

A conscientização do problema se inicia pela compreensão da problemática da baixa produtividade na indústria da construção civil. Efetua-se uma análise da orientação de abordagens para aumento de produtividade com os conceitos de racionalização e industrialização do setor. Apresentam-se as definições de conceitos de sistemas construtivos industrializados e pré-fabricação e analisa-se o papel da Modelagem da Informação da Construção em conjunto com a pré-fabricação para abordar as causas da baixa produtividade e viabilizar os ganhos possíveis.

2.2.2. Sistematização das Tecnologias da Indústria 4.0

A conscientização do problema prossegue com a sistematização das tecnologias da Indústria 4.0. Essa etapa se inicia pela definição da Indústria 4.0 e escopo da mesma pela identificação de tecnologias-chave. Essa etapa é marcada pela consulta a revisões sistemáticas e publicações técnicas mais citadas no tema. A revisão sistemática da literatura permite consulta às bases de conhecimento fazendo uso de conceitos e informações relevantes ao problema construídos anteriormente. O

segundo passo nessa etapa é o discernimento dos pré-requisitos para as tecnologias identificadas pelo aprofundamento da compreensão das tecnologias da Indústria 4.0, dos antecessores técnicos, elementos e arquiteturas que as definem. Por fim, são estruturadas as relações entre as tecnologias identificadas. A Sistematização das Tecnologias da Indústria 4.0 tem como produto a Estrutura Tecnológica da Indústria 4.0, segundo a literatura acadêmica e técnica.

2.2.3. Configuração da Indústria 4.0 para FCIs

A contextualização do paradigma da Indústria 4.0 para FCIs exige a análise de condicionantes específicos ao setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Para tanto, são identificadas as tecnologias específicas da AEC que representam o sentido de desenvolvimento do setor com potencial para confluir com a concepção da Indústria 4.0. Aqui, é realizada uma revisão sistemática da literatura para investigar a ocorrência simultânea de palavras-chave nas áreas das tecnologias da Indústria 4.0 e da pré-fabricação utilizando a base da Web of Science.

Além da revisão sistemática da literatura, um direcionamento mais efetivo da pesquisa ao contexto dos FCIs atuantes no mercado brasileiro é feito através de entrevistas de funcionários em cargos de gerência e diretoria dessas empresas, assim como observações diretas efetuadas em visitas às fábricas. A inclusão dessas atividades no método de pesquisa permite orientar o escopo de análise e identificar temas de maior relevância ao contexto atual do setor no Brasil. O último passo da conscientização do problema, por fim, é a estruturação das correspondências entre as tecnologias da Indústria 4.0 e os FCIs criando a configuração das tecnologias da Indústria 4.0 para FCIs.

A solução desse problema complexo utiliza um método de solução de problemas sistêmico, ou seja, a projeção do desenvolvimento de tecnologias industriais e as inter-relações entre essas tecnologias no contexto da fabricação para sistemas construtivos industrializados. Essa análise sistêmica permite organizar os relacionamentos entre essas tecnologias orientando a configuração das tecnologias da Indústria 4.0 para FCIs, que por sua vez, fundamentarão o desenvolvimento do Modelo de Maturidade e do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico (artefatos da pesquisa).

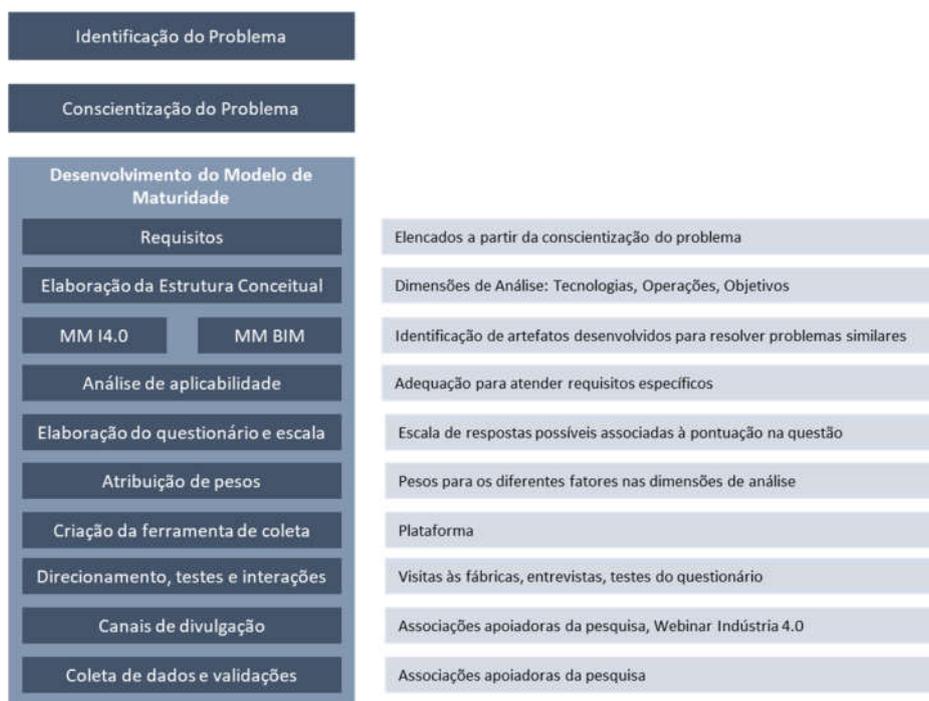
2.3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MATURIDADE

De maneira geral, um modelo de maturidade é uma ferramenta utilizada para coletar e avaliar informações a respeito da implementação e utilização de tecnologias nas operações de uma empresa, associada a uma ou mais escalas que permitam a compreensão de seu nível de maturidade.

O desenvolvimento do modelo de maturidade, segundo Dresch; Lacerda; Antunes Júnior (2015) deverá apresentar duas saídas: o artefato em seu estado funcional e a heurística de construção formalizada a partir do desenvolvimento do artefato.

O desenvolvimento do Modelo de Maturidade nesse trabalho segue uma metodologia baseada na proposta por Mittal *et al.* (2018) adaptada ao contexto da fabricação de componentes e elementos para a construção industrializada, ilustrada pela Figura 2.

Figura 2 - Metodologia de desenvolvimento do modelo de maturidade.



Fonte: Próprio Autor.

Primeiramente, a partir do embasamento teórico na conscientização do problema, procura-se identificar quais são as características tecnológicas e operacionais específicas dos FCIs que deverão ser abordados pelo Modelo de Maturidade. Com isso são estabelecidos os requisitos para o Modelo de Maturidade

considerando o foco de análise, a funcionalidade e desempenho do artefato. São determinados os escopos das análises a serem realizadas, no que se refere à tecnologias, operações e objetivos da Indústria 4.0. As maneiras como essas dimensões de análise são abordadas no modelo de maturidade formam a estrutura conceitual do Modelo de Maturidade.

A partir desses exercícios, são então feitas avaliações de modelos de maturidade existentes da Indústria 4.0 e ferramentas de avaliação de maturidade em BIM, a fim de considerar se os requisitos específicos dos FCIs são adequadamente contemplados. São consideradas maneiras de adaptar as ferramentas existentes, aproveitando as contribuições de estudos anteriores. Adicionalmente, são identificadas lacunas nos modelos existentes, onde um novo modelo poderá atender melhor as necessidades do FCIs.

As questões e escalas de respostas do modelo de maturidade proposto são, em grande parte, adotadas e adaptadas a partir de modelos de maturidade existentes, de forma que os requisitos específicos dos FCIs e o escopo tecnológico e operacional do estudo seja coberto.

Cada questão com sua escala de respostas, chamado de item, contribui em alguma proporção diferente para o nível de maturidade nos fatores analisados pelo modelo, como as diferentes tecnologias ou diferentes processos. A fim de estabelecer estas relações numéricas, são atribuídos pesos ao modelo. Os pesos indicam a importância de um item para o fator analisado.

Depois da criação da ferramenta, são realizados testes para verificar o seu funcionamento. Iterações ao Modelo de Maturidade permitem convergir a uma solução que atenda satisfatoriamente aos requisitos estabelecidos. Avaliações iniciais do funcionamento do modelo são feitas no contexto real, com os próprios FCIs.

Com o Modelo de Maturidade em estágio de desenvolvimento satisfatório, são escolhidos os canais de divulgação de maneira a atingir o maior número de respondentes do grupo de interesse, a fim de validar o funcionamento da ferramenta e coletar dados que possam dar indício do quadro geral da pré-fabricação no Brasil no que se refere à implementação de tecnologias da Indústria 4.0.

2.4. COLETA E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A coleta e avaliação das informações obtidas pelo Modelo de Maturidade permite a compreensão do status quo desse setor da indústria com relação à implementação das tecnologias-chave da Indústria 4.0.

O *Google Forms* foi a ferramenta coleta de dados utilizada. Baseada na Web, permite criar pesquisas on-line, questionários para coleta e análise de dados. Os dados coletados do *Google Forms* foram exportados para *Microsoft Excel*. Neste software de planilha, os dados foram explorados, analisados e organizados. Os cálculos matriciais para relacionar as respostas aos itens individuais aos fatores das dimensões de análise foram executados em *Microsoft Excel*.

Foi criado um *Notebook Jupyter*, com o objetivo de expandir as funcionalidades de análise de dados utilizando *Python*, através de bibliotecas como *NumPy*, *Pandas*, *Matplotlib*, *Scipy*, *Scikit Learn* e *Seaborn*.

Os resultados dos itens individuais são utilizados para plotar histogramas que auxiliam no entendimento dos dados, ajudando a identificar o formato e o centro da distribuição, variabilidade, padrões e assimetrias.

O gráfico de KDE (estimativa de densidade de kernel, do inglês, *Kernel Density Estimation*), auxilia na visualização da distribuição de pontos observados pela estimativa da função de densidade de probabilidade dos dados.

São utilizados alguns testes diferentes para verificar a qualidade do ajuste das distribuições. O teste de ajuste qui-quadrado é usado para determinar se há uma diferença significativa entre a distribuição de frequência observada de uma variável nominal ou ordinal e a distribuição de frequência esperada. O teste utilizado para averiguar a normalidade de uma distribuição de frequência é o teste de Shapiro-Wilk.

Tabelas de contingência são utilizadas para visualizar a relação entre duas variáveis categóricas. A medida de associação estatística entre duas variáveis categóricas pode ser dada pelo Tau de Kendall, um método não paramétrico baseado em classificação.

Gráficos de dispersão de pontos permitem a visualização do relacionamento entre duas variáveis contínuas, de forma análoga às tabelas de contingência. A medida de associação linear entre duas variáveis contínuas é dada pelo cálculo do coeficiente de correlação de Pearson. O coeficiente fornece uma medida da força e direção do relacionamento entre as duas variáveis. É importante, no entanto, ter

cuidado para não interpretar os resultados como relações de causalidade entre as variáveis estudadas.

O teste-t de Student é utilizado para fazer inferências sobre a média de variável populacional a partir de uma média amostral com determinado nível de confiança, assumindo uma distribuição populacional aproximadamente normal.

2.5. CONCLUSÃO

Os conhecimentos obtidos durante o processo de pesquisa serão explicitados, tanto os pontos de sucesso quanto os pontos de insucesso para que este estudo possa servir de referência e subsídio para a geração de conhecimento adicional, em prática e em teoria (Dresch; Lacerda; Antunes Júnior, 2015). Por fim, a conclusão da pesquisa será formalizada, apontando suas limitações e direções para trabalhos futuros. Também na conclusão, será discutida a possibilidade de generalizar a heurística de construção da pesquisa para uma classe de problemas, lidando com a evolução tecnológica de sistemas produtivos.

3. CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA E PRÉ-FABRICAÇÃO

3.1. O PROBLEMA DA PRODUTIVIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A produtividade, de modo geral, mensura a capacidade de se agregar valor a um produto ou serviço, relativo aos recursos utilizados. A produtividade do trabalho é definida pela produção econômica real por hora de trabalho sendo impulsionada essencialmente pelo investimento em capital físico (ferramental, equipamentos e instalações), progresso tecnológico (informatização, automação, novos modos de organizar a produção) e desenvolvimento do capital humano (educação e especialização) (RASURE, 2020).

Na indústria da construção, a produtividade é destacadamente inferior à de outras indústrias (SABBATINI, 1989) e tem caído gradualmente ao longo dos últimos 50 anos (TEICHOLZ, 2004; TEICHOLZ, 2013).

Isso é um problema marcante do setor, segundo McKinsey (2017), pois o aumento da produtividade é o único modo de conjuntamente: aumentar o número de construções de qualidade superior com custo mais baixo para proprietários e investidores, aumentar a lucratividade para construtoras e empreiteiras, e proporcionar maiores salários para trabalhadores.

Baixa produtividade na construção civil tem causas como regulamentação, dependência de setor público, informalidade, corrupção, fragmentação do setor, aversão a risco, reduzida colaboração entre agentes, além de fatores operacionais que abrangem capacidades fundamentais de execução de agentes da cadeia. Destacam-se na sequência os fatores operacionais dentre as causas da baixa produtividade que poderiam ser mitigadas com o emprego de novas tecnologias associada a conceito da Indústria 4.0.

3.1.1. Complexidade e dinamicidade do canteiro de obras

A atividade de construir edifícios é sujeita a condições dinâmicas complexas que se diferenciam de outras indústrias. Características únicas de canteiros de obras incluindo localização e disposição em relação a outras construções, vias de acesso, linhas de transmissão e diversos outros obstáculos fazem de cada produto construtivo um desafio diferente. Somam-se ainda as propriedades de solo, e exposição direta a condições de clima. Todos esses são motivos que dificultam a otimização do

conhecimento e utilização de métodos intensivos em capital, que podem não funcionar em projetos futuros (TEICHOLZ, 2013).

3.1.2. Complexidade e variabilidade dos edifícios

O nível de complexidade na construção de edifícios tem aumentado significativamente nas últimas décadas (CARDOSO, 2005). Essa complexidade está diretamente associada não somente ao tamanho dos projetos, mas também a uma variabilidade cada vez maior de suas tipologias (CARDOSO, 2005). A complexidade técnica das edificações tem por consequência, a multiplicação dos pontos de decisão e do potencial para interferências no processo de produção.

3.1.3. Coordenação deficitária no processo de projeto

De acordo com Teicholz (2013), na indústria da construção, a colaboração entre membros da equipe de projeto é deficitária. Projetos são, frequentemente, produzidos por escritórios diferentes que são contratados sob demanda. O estabelecimento de processos padronizados de troca de informações e compatibilização de projetos é dificultada pela natureza ad hoc do grupo de trabalho ao invés de equipes com relacionamentos mais estreitos com claras definições de papéis e responsabilidades. O resultado é um processo de projeto subótimo com grande potencial de perdas de informações, interferências entre subsistemas prediais e propagação de erros e ineficiências no decurso do programa. Assim, dissintonias nas etapas de projeto, que surgem em grande parte devido a essa fragmentação, reproduzem a dificuldade de integração da etapa de projeto durante a construção. Os desalinhamentos, erros e omissões de informações geram impactos diretos na qualidade de execução da obra. Por outro lado, lições aprendidas ao nível da realização de atividades construtivas podem gerar valiosas orientações para o projeto do edifício focado em sua construtibilidade, mas dificilmente encontram o rumo à montante.

3.1.4. Necessidade de melhor execução e gestão de obras

Frequentemente, é a transição do planejamento para a construção que vai mal e leva ao pobre desempenho da execução do projeto. O gerenciamento apropriado do projeto pode se beneficiar de maior adesão a processos de planejamento colaborativo entre equipes de projeto, planejamento e execução. Adicionalmente,

maior proximidade nos relacionamentos com fornecedores pode resultar em melhor desempenho da execução da obra.

3.1.5. Baixa digitalização e inovação no setor

As tecnologias da informação e comunicação facilitam as interações entre agentes de projeto e construção aumentando a velocidade e acurácia na transmissão de informações essenciais para tomada de decisão.

A indústria da construção está entre os setores menos digitalizados do mundo com reduzido desenvolvimento de ativos digitais, baixa utilização e capacitação para uso de ferramentas computacionais, além de baixos investimentos em tecnologia da informação, segundo o McKinsey Global Institute (2017). Demonstra resistência para introduzir novos métodos e ferramentas de trabalho. Conforme Blayse (2004 apud PAN *et al.*, 2020), a natureza fragmentada da indústria muitas vezes a torna relutante em aceitar mudanças e inovações, faltando também, uma cultura de inovação (PAN *et al.*, 2020). Segundo Teicholz (2013), pelo fato da indústria da construção ser caracterizada por muitas empresas pequenas, os agentes muitas vezes enfrentam dificuldades para investir em tecnologias e métodos de trabalho mais intensivos em capital.

Bock (2015) também cita alguns motivos para a vagareza da inovação do segmento, entre eles a complexidade e variabilidade dos produtos e os longos ciclos de vida dos edifícios. Além disso, os baixos orçamentos de pesquisa e desenvolvimento na área representam uma limitação para o desenvolvimento e adoção de novas estratégias e tecnologias.

3.2. CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA COMO RESPOSTA À BAIXA PRODUTIVIDADE

A evolução da produtividade da construção de edifícios de maneira que atenda as demandas diversas de qualidade e necessidades dos agentes envolvidos passa necessariamente pela racionalização, envolvendo a otimização do emprego dos recursos em todas as fases de construção através de um conjunto sistematizado de conhecimentos científicos e empíricos (BARROS, 1996) e a melhoria contínua de processos compreendidos (EASTMAN *et al.* 2014).

A industrialização da construção apresenta um avanço que vai além da racionalização, reorganizando o trabalho e introduzindo tecnologias que aumentem a capacidade de criar valor no processo de transformação de recursos em produtos. O termo sistema construtivo industrializado se refere a 'avançadas formas de construção industrializada' (1980, apud SABBATINI, 1989), nas quais conjunto de elementos (partes do todo) que possuem relações determinadas entre si (SEBESTYÉN, 1980 apud SABBATINI, 1989), são organizados para servir a um objetivo comum (WARSZAWSKI, 1977), apresentando um elevado grau de determinismo (STÄIB; DORRHOFER; ROSENTHAL, 2008). Exemplos incluem concreto pré-moldado e protendido, estruturas metálicas, light-steel frame, light-wood frame, Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), entre outros. Os Sistemas Construtivos Industrializados permitem a padronização de elementos e interfaces que podem ser combinados de formas variadas permitindo que a repetição de elementos construtivos reduzindo significativamente as ineficiências que se devem à variabilidade e complexidade das edificações.

A fabricação para sistemas construtivos industrializados implica na produção dos elementos por meio de técnicas industriais, nas quais o trabalho do canteiro de obras é transferido para plantas especializadas, onde elementos construtivos podem ser manufaturados independentemente das condições de clima e debaixo de condições ótimas de produção (STÄIB; DÖRRHÖFER; ROSENTHAL, 2008). Elementos pré-fabricados são então, posteriormente transportados para o canteiro de obras onde são montados, reduzindo a carga de trabalho in loco. A previsibilidade do contexto das fábricas proporciona um maior nível de controle dos parâmetros de produção associado à pré-fabricação, e conseqüentemente, um melhor desempenho produtivo, impossível de ser alcançado em canteiro de obras como: a redução de tolerâncias

espaciais, redução de estoques, a eliminação de movimentos desnecessários, a redução do tempo de produção, a melhor utilização de máquinas e recursos humanos. As regularidades do ambiente de fábrica permitem a aplicação mais rigorosa de técnicas de otimização às atividades produtivas e tem o potencial de eliminar a maioria das causas-raiz da baixa produtividade. Como resultado, são alcançadas melhorias na qualidade e na previsibilidade, controle da produção, e redução de custos e de prazos.

3.3. ABORDAGENS PARA MAIOR PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E FLEXIBILIDADE NA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA

A Construção Industrializada por meio de Sistemas Construtivos Industrializados, apresenta alguns desafios próprios. Na indústria, acréscimos simultâneos de produtividade e qualidade se devem, em grande parte, a ganhos de escala. Na construção, existe o desafio adicional de atender a requisitos variados específicos das edificações. A pré-fabricação de elementos para os sistemas construtivos industrializados exige o detalhamento de dimensões e das especificações técnicas de cada peça da montagem. Em canteiro, conflitos na montagem que podem exigir retrabalhos como uma nova análise da situação, novos projetos de produção dos componentes, fabricação, transporte e montagem dos componentes. Há também dificuldades adicionais de logística que obrigam exame cuidadoso do planejamento e acurácia na gestão. Para que os maiores ganhos de produtividade, qualidade e flexibilidade sejam possíveis com o uso de Sistemas Construtivos Industrializados, existem uma série de abordagens estabelecidas que são detalhadas a seguir.

3.3.1. Princípios de Design Modular

Os Sistemas Construtivos Industrializados devem fazer proveito da modularidade que é um princípio de design que atua como um elo entre a padronização e a personalização. Conjuntos de elementos e interfaces padronizados que podem ser arranjados em um grande número de maneiras diferentes, permitem a personalização na oferta de soluções construtivas dentro de um envelope de possibilidades, minimizando a variabilidade dos processos de produção. Peças produzidas sob demanda que façam parte de um catálogo de opções padronizadas, reduzem significativamente o trabalho de detalhamento (EASTMAN *et al.*, 2014).

3.3.2. BIM para Pré-fabricação

A maior clareza de informações de projeto e colaboração entre agentes envolvidos no processo de projeto e construção podem ser alcançadas por ferramentas computacionais que lhes deem suporte. O conjunto de tecnologias e processos que produzem uma metodologia para gerenciar o projeto e planejamento da construção e dos dados do projeto em formato digital através do ciclo de vida da edificação é Modelagem da Informação da Construção (BIM) (PENTTILÄ, 2006 apud SUCCAR, 2007).

BIM viabiliza e amplifica os ganhos potenciais da construção industrializada. Por exemplo, uma pesquisa da Dodge Analytics (2020) com empresas de pré-fabricação mostrou que 22% das empresas que não utilizam BIM indicaram melhorias em desempenho de cronograma de obras enquanto as empresas que utilizam BIM, 61% reportaram melhorias de desempenho de cronograma. A influência da utilização de BIM no desempenho de custos também apresenta uma tendência similar.

O BIM pode integrar processos de projeto, manufatura e construção aumentando o nível de transparência e interoperabilidade entre parceiros em projetos de construção que usam componentes pré-fabricados (BABIC; PODBREZNIK; REBOLJ, 2010, apud LEE *et al.*, 2019). De acordo com Eastman *et al.* (2014), ferramentas BIM já estão permitindo um maior grau de pré-fabricação.

3.3.2.1. Automação de projetos detalhados de componentes

No domínio da construção industrializada, as informações apresentadas pelos projetos devem ser dotadas de especificações detalhadas do produto como as

interfaces entre componentes de um sistema construtivo e ligações entre sistemas distintos. Essas informações sobre o processo de fabricação e montagem devem ser avaliadas e disponibilizadas entre os agentes da cadeia produtiva (ABDI, 2015).

Relações paramétricas entre os objetos do modelo da construção e seus atributos permitem que alterações no projeto arquitetônico possam ser automaticamente refletidas nos desenhos de produção das peças individuais e em tabelas com informações que alimentam o processo de fabricação. Essa coordenação automática reduz os custos de detalhamento de projeto e praticamente elimina os retrabalhos associados a inconsistências comuns na produção de desenhos em CAD-2D (EASTMAN *et al.*, 2014).

3.3.2.2. Ciclos iterativos de projeto reduzidos

A transferência da tomada de decisão para um ambiente virtual permite encurtar o ciclo de iterações de projeto, acelerando a convergência para uma solução que melhor atende aos requisitos de projeto.

3.3.2.3. Construção virtual

A força dos sistemas BIM é inerente à sua capacidade de construir um projeto em um ambiente virtual antes que os empreiteiros possam começar a construí-lo na realidade (VERNIKOS, 2012 apud ABANDA; TAH; CHEUNG, 2017). A construção virtual implica necessariamente na avaliação conjunta de múltiplas disciplinas envolvidas no processo construtivo.

Com a finalidade de aumentar o detalhamento do planejamento, bem como eliminar interferências de montagem, o processo de projeto e planejamento da construção industrializada exige maior integração dos agentes envolvidos (fabricantes, projetistas e construtoras) e das informações geradas e difundidas por eles (ABDI, 2015). O nível de precisão alcançada através das ferramentas computacionais e processos integrados para criação dos modelos digitais da construção dá segurança para atender o maior rigor de coordenação necessário para correto aproveitamento de sistemas construtivos industrializados.

Chave para a construção racionalizada, o trabalho em equipe é aprimorado por processos e ferramentas que estimulam a colaboração pelo compartilhamento de informações acuradas e significativas. Usando formatos interoperáveis de dados

como IFC (*Industry Foundation Classes*), BIM facilita a importação de dados de projeto para softwares de análise sem necessidade de se digitar novamente os valores, diminuindo os erros.

3.3.2.4. Logística e Processo

Segundo Carvalho (2005 apud ABDI, 2015), o planejamento logístico consiste na gestão da aquisição de materiais e serviços, de movimentação e armazenamento de equipamentos e materiais e de mão de obra. O BIM oferece oportunidades para coordenar o fornecimento e as atividades de montagem em obra, integrando as decisões e reconhecendo as interdependências existentes para minimizar o custo total de gerenciamento de materiais (SAID; EL-RAYES, 2014 apud ABANDA; TAH; CHEUNG, 2017). Com o BIM, ocorre a redução de estoques de componentes pré-fabricados e seu desperdício associado: os custos de armazenagem, manuseio múltiplo, partes danificadas ou perdidas, transportes, etc. (EASTMAN *et al.*, 2014).

3.3.2.5. BIM na Execução da Obra

A transferência eficaz de conhecimento da parte do fabricante para o construtor é fundamental para viabilizar os ganhos de produtividade por meio de Sistemas Construtivos Industrializados. Através da integração antecipada de agentes nas etapas de projeto e planejamento, possíveis conflitos são identificados permitindo a mitigação dos riscos para que não ocorram as ineficiências na etapa de montagem. O BIM proporciona a metodologia e o ferramental necessário para essa colaboração.

3.3.2.6. BIM e Produção Automatizada

Os fabricantes de componentes e elementos pré-fabricados de construção podem utilizar a entrada de dados de objetos BIM para auxiliar o processo de fabricação. Dados paramétricos de fabricação podem ser extraídos dos modelos BIM e servir de entrada para codificação de diversos equipamentos automatizados de manufatura como máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) (LEE *et al.*, 2019), máquinas de corte à laser ou a jato de água, máquinas de corte de dobra de vergalhões de aço para estruturas de concreto armado, serras, brocas e projetores a laser para fabricação de treliças de madeira ou para formas de concreto, entre outros (EASTMAN *et al.*, 2014).

De acordo com Lee *et al.* (2019), 'a metodologia de fabricação digital baseada em BIM fornece minimização de erros, redução de tempo e reforço de eficiência de colaboração na execução de tarefas como fabricação 3D, automação de projeto' e geração de instruções computacionais para manufatura de componentes.

A automação na fabricação digital de componentes com geometrias distintas suportada pelas capacidades de construção virtual e modelagem paramétrica de BIM possibilita ganhos simultâneos de produtividade e flexibilidade de design necessários para atender as variabilidades de tipologias de edifícios por meio de sistemas construtivos industrializados.

Alguns autores argumentam que o maior crescimento na produtividade na construção vai ser proveniente da automação de atividades de pré-fabricação facilitadas por BIM (GOULDING *et al.*, 2012 apud ABANDA; TAH; CHEUNG, 2017).

3.4. RECAPITULAÇÃO

Algumas das causas de baixa produtividade na construção civil podem ser enfrentadas através da pré-fabricação de componentes para sistemas construtivos industrializados e a montagem racionalizada em canteiro de obras.

A construção industrializada, caracterizada por pré-fabricação de elementos de Sistemas Construtivos Industrializados, encontra alguns desafios próprios associados a variabilidade das tipologias das edificações e particularidades operacionais que devem ser abordados a fim de viabilizar os ganhos de produtividade.

A Modelagem da Informação da Construção permite abordar muitos desses desafios através de uma metodologia integrada de projeto e planejamento de obra baseada na colaboração entre os diversos agentes responsáveis. BIM é capaz de orquestrar os complexos arranjos multidisciplinares dos Sistemas Construtivos Industrializados no que corresponde a projeto, planejamento e controle da execução e ainda proporciona o embasamento para utilização de tecnologias de produção mais avançadas.

A automação de atividades na manufatura de componentes para Sistemas Construtivos Industrializados integrado aos dados de projeto e planejamento por meio de BIM, é o ponto de partida dos fabricantes da cadeia produtiva da construção rumo à Indústria 4.0. Entre os conceitos discutidos no contexto da Indústria 4.0 está o desenvolvimento da capacidade de fabricação de produtos individualizados com o mesmo nível de desempenho da produção em massa, questão essa que se alinha às

necessidades da construção industrializada. No próximo capítulo, o tema da Indústria 4.0 será examinado, explicitando as tecnologias constituintes, os pré-requisitos tecnológicos e relações entre as tecnologias.

4. CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

Indústria 4.0 é o principal termo usado por pesquisadores, formuladores de políticas e empresários ao descrever como os sistemas industriais no mundo todo irão evoluir no futuro próximo, aproveitando as tecnologias conectadas à Internet para gerar novo valor agregado para as organizações e a sociedade (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016 apud CHIARELLO *et al.*, 2018). Resultado da transformação digital, a Indústria 4.0 é uma nova etapa na produção na qual os Sistemas Ciberfísicos, Gêmeos Digitais e Aprendizado de Máquina viabilizam a otimização autônoma sob condições dinâmicas que requerem flexibilidade das soluções fabris (KREINSEN *et al.*, 2019).

4.1. ORIGEM DO CONCEITO - INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 surgiu em 2011 na ACATECH (Academia Nacional de Ciências e Engenharia da Alemanha) como uma abordagem para fortalecer a competitividade da indústria manufatureira alemã (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). Envolve um processo de transformação na indústria além da automação desenvolvendo um monitoramento mais inteligente e adicionando processos de tomada de decisão autônomos através da Internet das Coisas baseada em Sistemas Ciberfísicos (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011). A visão é de atingir a capacidade de otimizar logística e produção não somente de empresas individuais, mas de redes de valor completas em tempo real.

Além da otimização operacional, a Indústria 4.0 viabiliza novos modelos de negócios são viabilizados, mais focadas em atendimento de requisitos individuais customizados de forma ágil (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

A partir do momento que o governo federal da Alemanha apoiou a ideia anunciando que Indústria 4.0 seria uma parte integral da política “*High-Tech Strategy 2020 for Germany*” com meta de consolidar a liderança em inovação tecnológica do país, o tema se tornou muito discutido entre acadêmicos e agentes da indústria (DAIS, 2014 apud HERMANN, PENTEK, OTTO, 2015), não somente no país de origem, mas também no mundo todo.

4.2. SISTEMATIZAÇÃO DO ESCOPO TECNOLÓGICO

A grande diversidade de agentes interessados na Indústria 4.0 entre academia, indústria e governantes levou ao surgimento de uma multiplicidade de óticas sobre o tema. A fim de sistematizar as tecnologias e os conceitos envolvidos no campo, pesquisadores propuseram algumas soluções por métodos diferentes. A avaliação de revisões sistemáticas da literatura da Indústria 4.0 e outros trabalhos científicos que utilizam métodos diferentes e exploram o tema com enfoques distintos permite uma compreensão abrangente da temática abordada, organizar o escopo tecnológico envolvido e estabelecer prioridades para composição de tecnologias que poderão ser implementadas no contexto da construção industrializada off-site. Um resumo dessa análise se encontra no Quadro 1.

Quadro 1 - Síntese da ocorrência de tecnologias nas revisões sistemáticas da I4.0

TECNOLOGIA	Brettel <i>et al.</i> (2014)	Herman, Pentek, Otto (2015)	Klingenberg, Borges, Antunes Jr. (2019)	Chiarello <i>et al.</i> (2018)	Schlund, Baaij (2018)	Ghobakhloo (2018)
Sistemas Ciberfísicos (CPS)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Internet das Coisas e Serviços (IoT/loS)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Analítica de Big Data (ABD)	✓		✓	✓		✓
Computação em Nuvem e Serviços Web (CN)	✓		✓	✓	✓	✓
Automação Industrial e Robótica	✓	✓			✓	✓
Simulação e Modelagem	✓	✓	✓		✓	✓
Gêmeos Digitais (DT)		✓				✓

Fonte: Próprio Autor.

4.3. DEFINIÇÕES DAS TECNOLOGIAS-CHAVE

4.3.1. Automação Industrial e Robótica

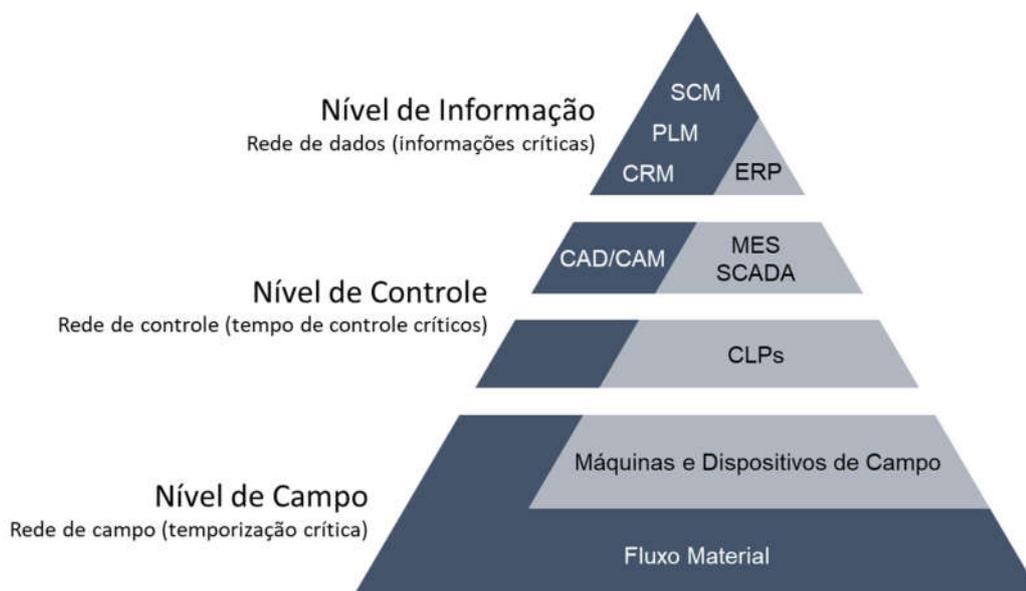
Conforme as pesquisas de Brettel *et al.* (2014), Herman, Pentek; Otto (2015) e Ghobakhloo (2018) a Automação Industrial e Robótica são apresentados como tecnologias principais da terceira revolução industrial. Apesar de não haver menção direta a automação industrial, a análise de Schlund; Baaij (2018) atribui pontuação elevada para sensores, atuadores e microcontroladores, componentes essenciais dos sistemas de automação industrial contemporâneos.

Automação se define pela substituição dos esforços físicos por máquinas que se movimentam sozinhas. A tendência para aumento da automação existiu desde o início da revolução industrial visando a redução do número de operadores necessários, melhorias de qualidade e aumento de volumes de produção (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018).

4.3.1.1. Manufatura Integrada por Computador

Os atuais ambientes de manufatura são integrados com processos computacionais através de redes e podem ser descritos pelo modelo de Manufatura Integrada por Computadores (CIM, do inglês, *Computer Integrated Manufacturing*). A camada inferior do modelo é composta por sensores, atuadores e microcontroladores embarcados. A camada intermediária é a camada de controle onde os controladores industriais são conectados, como os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), que são dispositivos computacionais projetados e configurados para operar em ambientes industriais. A integração vertical de dados operacionais com a camada mais alta permite a supervisão e gerenciamento por SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*) e sistemas de gestão de produção como MES (Sistema de Execução da Manufatura, do inglês, *Manufacturing Execution System*) e sistemas de gestão empresariais como ERP (do inglês, *Enterprise Resource Planning*). Essa arquitetura simplificada de três camadas é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Modelo CIM integra todos os níveis da produção industrial.



Fonte: Adaptado de (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018).

Os sistemas industriais integrados por computadores, eletrônica avançada e tecnologias da informação caracterizam o nível de automação e avanço tecnológico característico da terceira revolução industrial, com início na década 1970 (OZTEMEL; GURSEV, 2018) e constituem o ponto de partida para o desenvolvimento das fábricas inteligentes na Indústria 4.0.

4.3.1.2. Sistemas Flexíveis de Manufatura

Na literatura da Indústria 4.0, a ideia da evolução de sistemas produtivos envolve uma apresentação de maior flexibilidade para responder às demandas de mercado e contratempos de forma ágil. Kagermann, Wahlster, Helbig (2013) discutem que fábricas inteligentes são capazes de gerenciar a complexidade e são menos propensas a interrupções como paradas inesperadas para manutenção de máquinas e equipamentos, defeitos na produção, entre outros. Vyatkin *et al.* (2007 apud BRETTEL *et al.*, 2014) e Wadhwa, Rao, Chan (2005) discutem que os sistemas de manufatura flexíveis são adaptados a desenvolver e fabricar novos produtos em curtos períodos de tempo.

A flexibilidade na fabricação, de modo geral, pode ser classificada como relacionada ao produto ou relacionada ao processo. A flexibilidade relacionada ao produto se refere à variedade de opções de produto resultantes da arquitetura do

mesmo (ULRICH, 1995, apud WADHWA; RAO; CHAN, 2005). Envolve conceito de modularidade em que produtos são formados por módulos diferentes podem ser facilmente combinados de maneiras variadas resultando em novas configurações.

A flexibilidade relacionada ao processo emana das características do sistema de manufatura (WADHWA; RAO; CHAN, 2005). Um Sistema de Manufatura Flexível (FMS, do inglês, *Flexible Manufacturing System*), de acordo com Negahban, Smith (2014), é um sistema de produção integrado que consiste em máquinas multifuncionais numericamente controladas (NC), um sistema automatizado de manuseio de materiais (AMHS, do inglês, *Automated Material Handling System*) e um sistema de controle de computador para integrar as máquinas NC e o AMHS. Pode-se acrescentar à lista de recursos flexíveis de produção o CAD/CAM (Desenho e manufatura assistidos por computador, do inglês, *Computer Aided Design and Manufacturing*), os CLPs, AGVs (Veículos Guiados Automaticamente, do inglês, *Automatic Guided Vehicles*) e Robôs Industriais.

O conceito da modularidade aparece novamente no contexto da flexibilidade relacionada ao processo. Hermann, Pentek, Otto (2015) e Bloch (2017) descrevem que os sistemas de produção modulares são capazes de se adaptar com flexibilidade às mudanças de requisitos, substituindo ou expandindo módulos individuais ajustando-se facilmente a flutuações sazonais ou alterações nas características do produto.

4.3.1.3. CNC – CAD/CAM

A criação e utilização de módulos de produção flexíveis e complexos de produção para processamento de materiais implica na aquisição e uso em massa de máquinas de controle numérico computadorizado (CNC). Incluem equipamentos de corte a laser, plasma ou jato d'água, dobra e corte de vergalhões de aço, serras, tornos, furadeiras, máquinas de solda, fresadoras, projetores a laser, além de impressoras 3D. Essas máquinas permitem a manufatura de componentes de geometria complexa com elevada precisão com baixa necessidade de intervenção por parte de operadores.

As dimensões físicas dos componentes a serem fabricados em máquinas CNC são definidos por meio de software CAD (Desenho assistido por computador, do inglês, *Computer-Aided Design*). Na etapa de projeto, engenheiros podem utilizar de recursos de CAE (Engenharia assistida por computador, do inglês, *Computer-Aided*

Engineering) para avaliar através de simulação diferentes aspectos de desempenho e durabilidade das peças e do processo de manufatura. A partir do projeto, as instruções numéricas para movimento das ferramentas, como código G e código M, são geradas em programas CAM (Manufatura assistida por computador, do inglês, *Computer-Aided Manufacturing*) e são carregadas na máquina CNC.

4.3.1.4. CLP

CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) são instrumentos de controle que transformaram os complexos circuitos de controle industriais que eram formados por relés, temporizadores cíclicos eletromecânicos e controladores de malha fechada dedicados (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018; WAYAND, 2020). Alterações a processos eram custosos, demorados e cheias de complicações. Com software reprogramável de forma flexível, os CLPs são computadores robustos que operam com alta confiabilidade suportando variações de temperatura e qualidade de energia, impactos e sujeira dos ambientes industriais. O acréscimo de módulos I/O (Entrada/Saída, do inglês, *Input/Output*) para receber dados de sensores e enviar comandos a atuadores permite fácil extensão de funcionalidades dos sistemas de controle. Os CLPs são componentes essenciais para executar a lógica de controle em tempo real em sistemas de automação industrial contemporâneos, incluindo linhas de montagem e dispositivos robóticos.

4.3.1.5. AMHS

Os sistemas automatizados de manuseio de materiais (AMHS, do inglês, *Automated Material Handling System*) executam o transporte de material de um local para outro na área de manufatura usando informações de rota e etapa de processo fornecidas pelo MES. Os principais equipamentos incluem transportadores como esteiras, elevadores e veículos autoguiados (AGV, do inglês, *Automated Guided Vehicles*), além de paletizadores e classificadores. A identificação do material é realizada por meio de tecnologias de identificação, como código de barras, QR-Code, RFID, ou visão computacional para detectar a localização de ativos (SYSTEMA, 2021; ROCKWELL AUTOMATION, 2021). Negahban, Smith (2014) descrevem que tais sistemas desempenham um papel importante nos sistemas de manufatura flexíveis,

uma vez que podem ser facilmente modificados para responder a diferentes mudanças no sistema.

4.3.1.6. Robôs Industriais

Um robô é um manipulador industrial versátil e reprogramável usado em automação. Pode ter configurações fixas ou móveis e é programável em múltiplos eixos. O robô é composto por um manipulador com atuadores, um controlador com interfaces de programação e comunicação. De acordo com o padrão ANSI R15.06-1986, um sistema de robô industrial inclui o robô, os efetores e os equipamentos necessários. Os efetores são ferramentas presas ao pulso do robô, como garras, trocadores de ferramentas e pistolas de solda (ATI Industrial Automation, 2021).

Com versatilidade de movimentos e efetores finais, robôs de diferentes configurações mecânicas introduzem grande flexibilidade aos ambientes de manufatura. Máquinas CNC possuem algumas semelhanças pela capacidade de executar comandos numéricos complexos, mas tipicamente apresentam desempenho mais elevado em conjuntos de processos mecânicos muito mais específicos (OWEN-HILL, 2019).

Em seguida, explora-se como a introdução de novas tecnologias como a Internet das Coisas, Computação em Nuvem e Análítica de Big Data conferem aos sistemas de produção automatizados e robotizados contemporâneos maior flexibilidade e inteligência para adaptação de comportamentos.

4.3.2. Internet das Coisas e Serviços

A Internet das Coisas (IoT, do inglês, *Internet of Things*) refere-se à rede de dispositivos físicos interconectados, veículos, aparelhos e outros objetos incorporados com sensores, software e recursos de conectividade que permitem coletar e trocar dados. Essa rede permite a integração dos mundos físico e digital, permitindo monitoramento remoto, controle e automação de vários processos.

A Internet das Coisas e Serviços (IoT/S, do inglês, *Internet of Things and Services*) é um conceito que se expande na Internet das Coisas (IoT) ao integrar não apenas dispositivos físicos, mas também os serviços e aplicações a eles associados. Envolve a conexão e interação entre dispositivos inteligentes, serviços baseados em nuvem e plataformas digitais para permitir funcionalidade aprimorada, análise de

dados e criação de valor. Essa integração permite o desenvolvimento de modelos de negócios inovadores, soluções personalizadas e experiências de usuário aprimoradas, aproveitando os recursos dos dispositivos IoT e os serviços que eles fornecem. A Internet das Coisas e Serviços (IoT/S, do inglês, *Internet of Things and Services*) exerce papel central na configuração da Indústria 4.0 e o termo é citado frequentemente como sinônimo da Indústria 4.0, (KLINGENBERG; BORGES; ANTUNES JR., 2019).

Na internet, através da modularidade e interoperabilidade entre aplicações proporcionado pela Arquitetura Orientada a Serviços (SOA, do inglês, *Service Oriented Architecture*), blocos funcionais desacoplados fornecem serviços específicos de forma especializada direcionada para solução robusta de um problema específico. Com isso, serviços implantáveis de modo independente podem ser associados para criar novos produtos e serviços oferecidos pela web.

Li, Xu, Zhao (2014) apresentam uma arquitetura para IoT baseado em SOA composta de quatro camadas. Na Camada de Sensoriamento, sistemas inteligentes são capazes de captar dados do ambiente e trocar estes dados entre dispositivos. Os componentes físicos incluem sensores, atuadores, microcontroladores ou microprocessadores além de tecnologias como RFID (Identificação por Radiofrequência, do inglês, *Radio Frequency Identification*) que permitem a atribuição de identidades digitais para produtos ou ativos físicos para monitoramento remoto. A Camada de Rede é a infraestrutura para suportar conexões sem fio ou com fio, a longas ou curtas distâncias. Permite a troca de dados e informações entre os diversos objetos interligados. A Camada de Serviço consiste em um conjunto de requisitos comuns de aplicativos, interfaces de programação de aplicativos (API, do inglês, *Application Programming Interface*) e protocolos que suportam aplicativos e serviços necessários. Todas as atividades orientadas a serviços são realizadas nessa camada, como: troca e armazenamento de informações, gerenciamento de dados, mecanismos de busca e comunicação, análise, processamento, filtragem, aprendizado e validação de dados. A Camada de Interface consiste nos métodos de interação com usuários através de sites na internet ou aplicativos para celulares e tablets.

A aplicação da IoT no contexto das fábricas é comumente chamada de Internet Industrial das Coisas (IIoT, do inglês, *Industrial Internet of Things*) (WANG, *et al.*, 2016 apud GHOBAKHLOO, 2018). Na IIoT, máquinas, equipamentos e dispositivos físicos com sensores e software em rede podem coletar e transmitir dados, comunicar-se

entre si e tomar decisões de roteamento inteligentes sem intervenção humana (LOBO, 2016 apud KLINGENBERG; BORGES; ANTUNES, 2019).

A funcionalidade dessas "coisas" pode variar desde simples detecção e atuação até controle e operação totalmente autônomos (CONWAY, 2015). A IIoT permite a aquisição e processamento de dados operacionais relacionados à produção, qualidade e logística, permitindo ajustes operacionais mais precisos. Além dos ganhos de eficiência operacional, a IIoT possibilita a oferta de novos serviços por meio de produtos inteligentes, como atualização remota de firmware, manutenção remota e sugestões de upgrade. Isso também leva a novas formas de cooperação entre diferentes empresas facilitadas pela troca de informações precisas e em tempo real, permitindo ajustes eficientes nas cadeias de valor.

4.3.3. Computação em Nuvem

Hoje, grande parte dos processos de fabricação industrial são suportados por Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e existe uma tendência de cada vez mais infraestrutura e serviços de TIC migrarem para a Computação em Nuvem. De acordo com Mell, Grance (2011):

A Computação em Nuvem é um modelo de computação que permite o acesso onipresente, conveniente e sob demanda por rede a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis (por exemplo, redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços) que podem ser rapidamente provisionados e liberados com mínimo esforço de gerenciamento ou interação com o provedor de serviços.

No passado, a hospedagem de aplicativos de dados somente era possível através da aquisição de hardware e software de custo elevado e a construção de espaços para alocar os centros de dados onde esses recursos seriam alocados. O investimento necessário para criar a infraestrutura que desse suporte aos serviços digitais era impeditivo para pequenas empresas. Além disso, a imobilização de capital para criação desses recursos enrijecia a possibilidade de expandir ou retrair conforme demandas.

Atualmente, através da computação em nuvem, é possível oferecer os mesmos serviços a aplicações sem necessidade de elevadas despesas de capital. Dessa forma, a Computação em Nuvem fornece a flexibilidade para Sistemas de Informação de maneira análoga aos Robôs ou máquinas CNC no chão de fábrica.

No contexto da Internet das Coisas, ocorre a geração de enormes quantidades de dados que precisam ser armazenados, processados e apresentados de uma forma contínua, eficiente e facilmente interpretável (GUBBI *et al.*, 2013). A Computação em Nuvem é reconhecida como um paradigma para armazenamento e análise para esses grandes volumes de dados (LIN, *et al.*, 2016) minimizando restrições de memória, processamento e consumo energético. A capacidade de monitoramento e atuação com os dispositivos inteligentes na Internet das Coisas é expandida e viabilizada por esse conjunto de serviços baseados na web.

A pesquisa de Schlund e Baaij (2018) aponta que os serviços web e Computação em Nuvem revolucionam os sistemas de TI (Tecnologia da Informação) nas redes de produção simplificando a troca de dados entre diferentes aplicativos e permitindo otimização em tempo real dentro de uma fábrica e entre locais de produção separados.

De acordo com Ghobakhloo (2018), IoT e Computação em Nuvem podem criar interconectividade entre fabricantes, levando a novos ecossistemas de manufatura onde as empresas podem comunicar automaticamente suas necessidades e capacidades de manufatura. Vários serviços de manufatura de diferentes empresas podem colaborar para executar tarefas complexas de manufatura. A indústria de manufatura está explorando a computação em nuvem (HUYNH; QUAN, 2008 apud HE; XU, 2015) para melhorar as estruturas existentes, compartilhar serviços de manufatura em rede e atender melhor às necessidades específicas da empresa. Ao combinar Computação em Nuvem e sistemas de manufatura flexíveis e reconfiguráveis, surge o conceito de manufatura em nuvem, permitindo que um conjunto compartilhado de recursos de manufatura configuráveis se integrem em redes de valor colaborativo, incluindo ferramentas de software, máquinas e equipamentos de manufatura (HE; XU, 2015).

4.3.4. Analítica de Big Data

A quantidade de dados que as empresas recebem por meio de diversos canais tem aumentado exponencialmente (BAESENS, 2014), principalmente pela internet. Em abril de 2022, a internet atingia 63% da população mundial, representando cerca de 5 bilhões de pessoas (DOMO, 2022). Além de dados provenientes de usuários, sensores e processadores com custo cada vez menor embarcados em número crescente de produtos inteligentes, coletam e processam dados de utilização e os

disponibilizam para serviços diversos através da internet. Com isso, a quantidade total de dados criada, capturada e consumida globalmente em 2022 é estimada em 97 zettabytes, projetado para crescer para 181 zettabytes até 2025 de acordo com Statista (2022 apud DOMO, 2022).

Existe um potencial enorme para mudar a maneira como organizações fazem descobertas, conduzem negócios e orientam suas atividades baseadas em análise de dados. Os dados proporcionam uma redução da subjetividade no processo de tomada de decisão permitindo a validação do planejamento antes do comprometimento em investir recursos.

De fato, a economia será amplamente afetada pelo uso de dados (OECD, 2017 apud KLINGENBERG; BORGES; ANTUNES, 2019). Os dados estão no centro da digitalização e são o recurso essencial da nova etapa industrial (UNIDO AND POLICY LINKS, 2017; EUROPEAN COMMISSION, 2014, BÖHMER *et al.*, 2017; SCHOLZ *et al.*, 2018 apud KLINGENBERG; BORGES; ANTUNES, 2019) e cria oportunidades com potencial de transformar a manufatura (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2014 apud KLINGENBERG; BORGES; ANTUNES, 2019).

No ambiente industrial, existe uma riqueza de dados provenientes de sensores de diversos tipos em máquinas ao longo de linhas de produção, em dispositivos de campo nos centros logísticos de entrada e saída além de dados provindos de laboratórios de qualidade. Esses dados já estão disponíveis nos sistemas de informação contemporâneos e a implementação da Internet das Coisas e Computação em Nuvem vai aumentar significativamente a quantidade de dados. Isso cria grandes oportunidades para gerar melhor compreensão, gestão e exploração estratégica através da analítica de dados. Relacionamentos complexos entre indicadores distintos, anteriormente desconhecidos, baseados em valores capturados por sensores e dos modelos matemáticos induzidos podem ser utilizados para ajustar a operação visando otimizar métricas de desempenho eleitas.

A implementação otimizada de recursos e afinamentos operacionais viabilizados pela análise de dados se traduzem efetivamente em um aumento na eficiência do trabalho e do capital (DIAB *et al.*, 2017). Com efeito, aumentar a produtividade dos processos por meio do uso intensivo de dados é um dos benefícios atribuídos à Indústria 4.0 (KLINGENBERG; BORGES; ANTUNES, 2019). Além disto, o aumento da confiabilidade do planejamento proporciona contração do risco operacional e consequente redução do custo de capital.

Embora existam muitas definições ou usos diferentes para o termo, Big Data compreende dados que não podem ser tratados com software tradicional e que nem mesmo poderiam ser armazenados em uma única máquina (CORRÊA, 2015). Big Data se caracteriza, tradicionalmente por seu volume (grande quantidade), variedade (diferentes formatos de dados como bases numéricas, imagens, vídeos, documentos escritos, desenhos CAD, modelos 3D e nuvens de pontos) e velocidade (conteúdo dos dados está em constante mudança).

Analítica de Dados, ou ciência de dados, pode ser amplamente definida como uma disciplina que transforma dados em informações por meio de análise sistemática (DIAB, et. al., 2017), envolvendo a extração de padrões e modelos para dar suporte a tomada de decisões. Muitos dos métodos de análise podem ser classificados como aprendizado de máquina.

Bishop (2006) descreve que Analítica de Dados é o conjunto de técnicas onde os modelos matemáticos de determinados fenômenos não estão disponíveis, mas onde os padrões que os caracterizam podem surgir dos dados disponíveis e que, portanto, poderiam ser usados no lugar de um modelo formal. Envolve toda a metodologia de processamento de dados, desde a definição do objetivo da análise até a seleção de fontes de dados adequadas e a realização da análise exploratória inicial. Os dados são então limpos e filtrados para eliminar inconsistências e dados ausentes, antes de serem processados para criar um modelo analítico usando análise estatística e técnicas de aprendizado de máquina. A etapa final envolve a interpretação das informações modeladas para extrair insights.

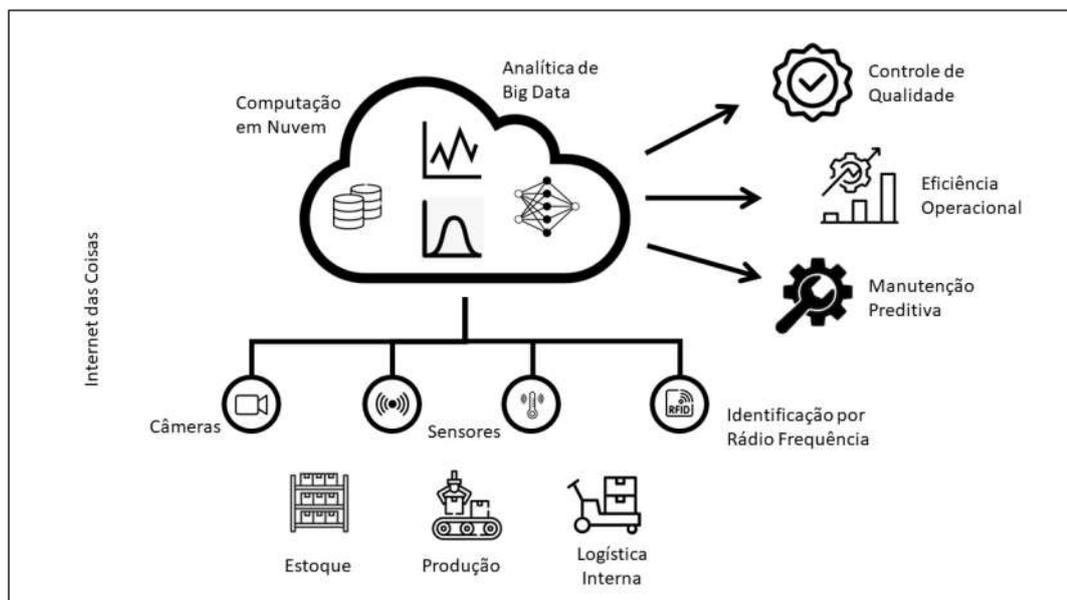
Conforme anteriormente descrito, a Analítica de Big Data se diferencia da Analítica de Dados de maneira geral devido ao volume, a variedade e velocidade dos dados o que aumenta a complexidade e custo dos processos envolvidos. Projetos dessa natureza exigem armazenamento e processamento além da capacidade de computadores tradicionais, necessitando de processamento em paralelo com grande número de servidores. Assim, o uso de recursos computacionais em nuvem potencializa a implementação de projetos desta escala.

Duas maneiras que Analítica de Big Data pode ser empregada no ambiente de fábrica que ainda não foram mencionadas é pela visão computacional e manutenção preditiva. A visão computacional pode ser usada em uma fábrica para automatizar processos de controle de qualidade e monitorar linhas de produção para operações eficientes e precisas. Para que o computador seja capaz de identificar objetos ou

movimentos com uma câmera digital e extrair informações significativas, é necessário que um algoritmo de seja treinado em uma grande quantidade de imagens e vídeos. A manutenção preditiva é outro exemplo de Análítica de Big Data porque envolve a análise de grandes volumes de dados coletados de sensores, máquinas e outras fontes para identificar padrões, tendências e anomalias que podem prever falhas de equipamentos ou necessidades de manutenção, permitindo ações de manutenção proativas e eficientes para ser tomados.

A Figura 4 mostra, de maneira simplificada, a relação entre a IoT, a computação em nuvem e análise de Big Data. Sensores coletam dados do ambiente de fabricação e os enviam para a plataforma IoT que conecta os sensores e permite a transmissão de dados para a infraestrutura de computação em nuvem, onde os dados são armazenados e processados. Análítica de Big Data é aplicada na nuvem para analisar os dados coletados e extrair informações acionáveis. Da nuvem, os dados analisados encontram diversas aplicações como a manutenção preditiva que aproveita os dados para prever falhas de equipamentos e programar a manutenção proativamente. O controle de qualidade utiliza análise de dados para detectar defeitos e garantir a qualidade do produto. O aumento da eficiência operacional utiliza as descobertas da análise de dados para otimizar os processos de produção e a alocação de recursos.

Figura 4 – Ilustração das relações entre IoT, Computação em Nuvem e Análítica de Big Data



Fonte: Próprio Autor.

4.3.5. Modelagem, Simulação e Gêmeos Digitais

Modelagem, simulação e tomada de decisão estão intimamente ligadas e se tornaram tecnologias essenciais na ciência e na engenharia. Segundo Rosen *et al.* (2015), nas últimas décadas, a simulação se desenvolveu de uma tecnologia restrita a especialistas em computação para uma ferramenta padrão comumente usada por engenheiros para tomar decisões de projeto, validação e teste de propriedades do sistema, prever falhas e otimizar operações.

Um modelo é uma representação informativa de um objeto ou sistema com o propósito de ser estudado elaborado a partir da formulação de um problema e definição dos objetivos do estudo. O modelo é 'aprimorado pela capacidade de abstrair as características essenciais de um problema sem exceder a complexidade necessária para cumprir os propósitos aos quais o modelo se destina (BANKS *et al.*, 2005).

Uma simulação computacional é uma imitação aproximada da operação de um processo ou sistema que representa seu funcionamento ao longo do tempo com o propósito de estudo, utilizando ferramentas computacionais. Previsões podem ser feitas sobre o comportamento do sistema dentro de um envelope de possibilidades alterando as configurações da modelagem ou dos parâmetros de entrada. De forma simplificada, 'um modelo representa as características de algo, enquanto uma simulação representa seu comportamento' (NASA, 2010).

Tradicionalmente, tanto modelos quanto simulações são 'artefatos digitais usados principalmente em projeto' (BOSCHERT, 2018). No processo de projeto, por meio da combinação da modelagem e simulação, é possível verificar se os diferentes requisitos de projeto estão sendo atendidos e antecipar as modificações. Quanto antes as mudanças puderem ser feitas, menores os custos associados. Se defeitos ou não-conformidades forem necessários durante a produção, as despesas acarretadas se tornam muito altas e, possivelmente, até inviabilizam as modificações necessárias.

A simulação é utilizada também na operação de sistemas. Possibilita examinar sistemas grandes, caros ou perigosos sem estar com o sistema fisicamente presente. Em sistemas de manufatura, interrupções à produção podem gerar custos operacionais elevados para fabricantes. Através da simulação, o teste e validação de decisões ocorre sem a parada na produção para experimentar as soluções propostas.

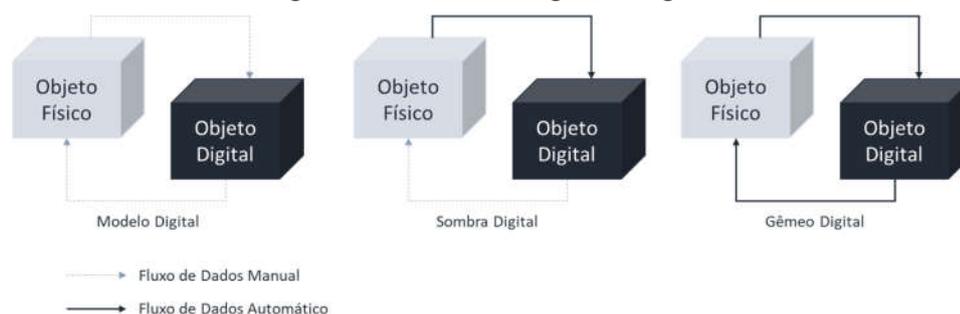
A capacidade de diagnosticar problemas e explorar as causas através de experimentação virtual se torna indispensável para entender, controlar e reduzir as incertezas (BANKS *et al.*, 2003).

Conforme descrito anteriormente, no ambiente de Manufatura Integrada por Computadores, o chão de fábrica é sensoriado por diversos dispositivos de campo ao longo de linhas de produção e outros pontos das operações. Os dados coletados alimentam sistemas de informação verticalmente integrados como SCADA, MES, ERP, PLM (Sistemas de Gestão de Ciclo de Vida, do inglês, Product Lifecycle Management). Comumente, ocorre o desalinhamento entre informações em diferentes sistemas de TI, devido a erros humanos na entrada de dados, desafios de integração de dados ou falta de padronização. Uma fonte única de verdade de informações é criada quando a integração das bases de dados garante que não haja divergência de informações, de forma a suportar a colaboração das diversas atividades da organização. A integração e compatibilização das diferentes bases de conhecimento como modelos baseados em física e conhecimento de matéria e modelos baseados em dados, fomentados por dados de sensores, levam ao surgimento da Sombra Digital.

Na literatura no contexto da manufatura inteligente, predomina a utilização do termo Gêmeo Digital para denotar a integração das bases do conhecimento atualizadas com dados em tempo real. No entanto, este trabalho adota a terminologia proposta por Kritzinger *et al.* (2018) que descreve três níveis crescentes de integração entre objetos físicos e suas contrapartidas digitais indicada pela Figura 5.

- a) Um modelo digital é uma representação digital mais ou menos abrangente de um objeto físico existente ou planejado que não usa nenhuma forma de troca automatizada de dados entre o objeto físico e o objeto digital;
- b) A sombra digital acrescenta ao modelo digital o fluxo automático de informações de estado do objeto físico ao digital;
- c) A integração completa de estados em ambos os sentidos dá origem ao gêmeo digital.

Figura 5 - Níveis de integração digital.



Fonte: Adaptado de (KRITZINGER *et al.*, 2018).

O conceito de gêmeo digital, portanto, implica na realimentação de aprendizagens obtidas em um ciclo de controle fechado. Em seguida, é explorado o que constitui o gêmeo digital, introduzindo o papel que exerce na integração ciberfísica. A diferença entre a integração ciberfísica e o ciclo de controle tradicional é explorado na Seção 4.3.6 a seguir, sob o tópico de Sistemas Ciberfísicos.

A primeira definição do termo gêmeo digital foi criada pela NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço do governo federal dos Estados Unidos, do inglês, *National Aeronautics and Space Administration*) em seu roteiro de desenvolvimento integrado de modelagem, simulação, tecnologia da informação e processamento (NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap) (NEGRI; FUMAGALLIA; MACCHIA, 2017).

Um gêmeo digital é uma simulação probabilística, multifísica e multiescala integrada de um veículo ou sistema que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico de frota, etc., para espelhar a vida de seu gêmeo voador (SHAFTO *et al.*, 2010).

A visão de Gêmeo Digital apresentada pela NASA tem foco na ‘alta fidelidade física de modelos’ para simulação e tomada de decisão sobre operação de ativos que não estão presentes fisicamente. Outra questão que se destaca na conceituação apresentada pela NASA é a necessidade de integrar modelos de sistemas importantes e interdependentes do sistema monitorado (no caso, veículo), como propulsão, armazenamento de energia, aviônicos, suporte de vida, etc. O gerenciamento contínuo e em tempo real de recursos e de estado de saúde desses veículos durante suas missões se mostra uma das aplicações fundamentais dos Gêmeos Digitais.

As dimensões do conceito de Gêmeos Digitais apresentado pela NASA também se aplicam de maneira geral aos sistemas de manufatura.

A simulação probabilística é particularmente importante para sistemas de eventos discretos como um método de aproximar os detalhes de um sistema que não podem ser modelados ou que não necessita de modelagem detalhada explícita. Os sistemas de manufatura são amplamente estocásticos por natureza, ou seja, possuem variáveis de comportamentos aleatórios, porém com distribuição estatística conhecida como uma distribuição normal ou distribuição Gumbell (ABDELGHANY; ABDELGHANY, 2009). Uma vez que não há um resultado definitivo sobre como os processos irão evoluir ao longo do tempo, eles são frequentemente chamados de não determinísticos.

Simulação multifísica aborda a integração de diferentes fenômenos físicos de dinâmica contínua, ou seja, descritos pela mecânica clássica na qual a passagem do tempo é inexorável e a simultaneidade é intrínseca (LEE, 2008). Os fenômenos físicos nesse contexto, apresentam continuidade no domínio do tempo e podem ser descritos por equações diferenciais ou integrais. Pode-se argumentar ainda que no contexto da Indústria 4.0, a simulação multifísica contempla a intersecção dos sistemas de dinâmica contínua e dos sistemas de eventos discretos nos quais a variável de estado muda apenas em um conjunto discreto de pontos no tempo.

A integração de bases isoladas de conhecimento permite a expansão das dimensões de análise, investigação e descoberta de conhecimentos por inferências permitindo diagnóstico (relações causais) e prognóstico (previsão).

No contexto dos sistemas de manufatura da Indústria 4.0, acrescenta-se aos objetivos dos Gêmeos Digitais a ideia de que a previsão e otimização de comportamento deverá ocorrer entre produtos de uma mesma família (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017). Dados compreensivos de famílias de produtos ao longo de toda a operação dão subsídios para melhorias de design, apoio técnico e fornecimento de serviços agrupados que possam agregar valor aos usuários para próximas gerações dos produtos. Em produtos inteligentes, o processo de implementação de melhorias e funcionalidades pode ser feito periodicamente, quantas vezes quanto for necessária, ao longo da vida do produto sem necessidade de esperar o lançamento de outra geração. Uma fonte única de verdade proporciona uma base de conhecimento para o estabelecimento dos direcionamentos técnicos operacionais nas funcionalidades de produtos inteligentes.

A área de desenvolvimento digital conjunta de produtos e sistemas de produção cresceu muito nas últimas décadas. O aumento do poder computacional reduziu

significativamente o tempo necessário para análises dos protótipos virtuais: de semanas para horas e minutos. A capacidade de explorar várias configurações dentro do espaço de possibilidades com apoio no poder computacional permite a convergência para soluções que melhor atendem os requisitos multidisciplinares. Na proporção em que a definição global de desempenho seja mais concreta, é possível aplicar técnicas de otimização para que a convergência dos parâmetros de controle resulte no melhor produto, processo ou sistema de interesse.

O uso crescente de sensores em linhas de produção e em produtos inteligentes permite a captura de dados que podem ser realimentados em modelos e simulações criados durante o desenvolvimento do produto ou utilizados para criar novos modelos baseados em dados e descobrir conhecimentos inéditos.

Conforme Negri, Fumagalli, Macchi (2017), as informações geradas na fase de projeto de um sistema de produção não são exploradas durante as fases operacionais, embora possam ser altamente valiosas. As informações geradas em cada etapa do ciclo de vida do produto podem ser disponibilizadas de forma integrada para as etapas subsequentes (ROSEN, 2015) para facilitar a avaliação do desempenho e decisões de gerenciamento durante as operações de produção (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017).

Os dados reais permitem ajustes de configurações de máquinas para o próximo produto da linha com base em simulações no mundo virtual antes da troca física, reduzindo os tempos de configuração da máquina e aumentando a qualidade (SÖDERBERG *et al.*, 2017).

Na Indústria 4.0, os Gêmeos Digitais associam as bases de conhecimentos, dados de sensores em dispositivos IoT e modelos resultantes de Análise de Big Data, suportando as ferramentas multidisciplinares. A capacidade de vincular grandes quantidades de dados à simulação rápida e realimentar as aprendizagens no sistema de produção automatizado possibilita a otimização em tempo real de produtos e processos (SÖDERBERG *et al.*, 2017).

Além do mais, integrados por ontologias ou por modelos de linguagem natural, os Gêmeos Digitais podem fornecer conceituações de ativos e processos para suportarem as capacidades autônomas de sistemas de produção inteligentes. A integração ciberfísica é descrita em maior detalhe na seção seguinte.

4.3.6. Sistemas Ciberfísicos

Sistemas Ciberfísicos (CPS) formam o campo tecnológico que ocorre consistentemente em maior frequência na literatura da Indústria 4.0. Segundo Lee (2008):

Sistemas Ciberfísicos são integrações de computação com processos físicos. Computadores e redes incorporados monitoram e controlam os processos físicos, geralmente com loops de feedback, onde os processos físicos afetam os cálculos e vice-versa.

O conceito de CPS se desenvolve a partir dos fundamentos dos sistemas embarcados mais diferencia por ser mais compreensivo e mais interdisciplinar. A pesquisa de Sistemas Ciberfísicos visa integrar o conhecimento e os princípios de engenharia nas disciplinas computacionais e de engenharia.

Tradicionalmente, os sistemas embarcados eram vistos simplesmente como pequenos computadores com recursos limitados (baixo poder de processamento, pequena memória). A engenharia desses sistemas tinha foco na otimização, ou seja, no uso eficiente de recursos (LEE; SESHIA, 2017). Devido à crescente integração de objetos físicos e processos computacionais, o termo Sistemas Ciberfísicos foi introduzido. Tais sistemas são sistemas de engenharia que são construídos e dependem da sinergia de componentes computacionais e físicos (MARWEDEL, 2011).

No CPS, o tempo que leva para realizar uma tarefa pode ser crítico para o funcionamento correto do sistema. A redução de atraso de sinal pela aceleração do processamento pode não ser suficiente para atender as demandas de temporização rigorosa de alguns sistemas. O projeto de tais sistemas, segundo Lee; Seshia (2017), portanto, requer a compreensão da dinâmica conjunta de computadores, software, redes e processos físicos. É este estudo da dinâmica conjunta que diferencia esta disciplina.

O conceito de CPS, apesar de ser centralizado na integração de computação e processos físicos, não se restringe a isso. Ao introduzir o termo em 2006, Helen Gill da Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos, apresentou CPS como uma nova geração de sistemas com recursos computacionais e físicos integrados que podem interagir com humanos por meio de muitas novas modalidades. A capacidade de interagir e expandir as capacidades do mundo físico por meio de computação,

comunicação e controle é um capacitador fundamental para futuros desenvolvimentos de tecnologia (BAHETI; GILL, 2011). Lee (2008) também argumenta que os Sistemas Ciberfísicos mais interessantes e revolucionários serão conectados em rede. A combinação com outras tecnologias para processamento e análise de dados coletados, amplificam as potenciais aplicações dos CPS. Surge, no entanto, um desafio técnico significativo de alcançar temporização precisa do sistema integrado com tecnologias tipicamente imprecisas nesse quesito (LEE, 2008).

O tema de CPS é abordado de diferentes pontos de vista pela comunidade científica de acordo com Bordel *et al.* (2017). Escopos variam em amplitude, tipicamente a depender do domínio tecnológico dos pesquisadores. Os pontos de vista mais abrangentes ao tema de CPS incluem elementos de análise de dados, elementos computacionais e componentes de comunicação, estendendo a definição de CPS de maneira que se funde aos conceitos de Internet das Coisas, Big Data e Computação em Nuvem.

O interesse em Sistemas Ciberfísicos por comunidades acadêmicas distintas permitiu a ampliação do conceito que chega a incluir todos os elementos envolvidos na integração digital verticalizada como mundo físico, transdutores componentes de controle, elementos computacionais (embarcados, em sistemas locais ou em nuvem) e componentes de comunicação.

Na literatura da Indústria 4.0, frequentemente são associados a sistemas inteligentes, autônomos com capacidade de comunicação e colaboração adaptável a contexto. Percebe-se um interesse na ideia dos sistemas de produção autônomos possibilitados pela integração de hardware automático flexível e software inteligente. Amparado por sensores, e capacidades de processamento e armazenamento, aprendizagem, comunicação e associação de bases de conhecimentos, as entidades de produção evoluem a partir de seus predecessores mecânicos para ganhar ciência de contexto e habilidades de autorregulação, auto-otimização, entre outras habilidades autônomas indicadas por auto-x. Uma nova tipologia de produção industrializada que se baseia na integração de recursos do mundo físico e do mundo virtual (cibernético) recebe a denominação CPPS (Sistema de Produção Ciberfísico, do inglês, *Cyber-Physical Production System*).

Pode-se dizer que recebem atribuições, informalmente, resultantes da culminação dos avanços das demais tecnologias descritas neste capítulo: Automação

Industrial, Internet das Coisas e Serviços, Computação em Nuvem, Análítica de Big Data e Gêmeos Digitais.

4.4. CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA E INDÚSTRIA 4.0

O problema da baixa produtividade e a estagnação do seu crescimento na construção civil tradicional pode ser explicada em termos de uma série de causas-raiz entre as quais se encontram fatores operacionais. A pré-fabricação de elementos para sistemas construtivos industrializados é solução para grande parte desses fatores, e os ganhos de produtividade são viabilizados e potencializados pela implementação de BIM e principalmente, pela integração digital de BIM com a manufatura automatizada de elementos construtivos.

A ideia da Indústria 4.0 parte dos sistemas de manufatura integrados por computadores (CIM) que possuem capacidades avançadas de CAD/CAM utilizando CNC e robótica a fim de criar sistemas de produção mais flexíveis. Sistemas de informação, planejam, controlam e monitoram a produção, integrados com outras funções organizacionais. O avanço e integração de tecnologias da Indústria 4.0 permitirá um estágio superior de otimização operacional de toda a cadeia produtiva em tempo real apresentando aos sistemas de manufatura maior capacidade de atender requisitos individuais customizados de forma ágil.

É possível identificar que ocorre um alinhamento dos objetivos operacionais da construção industrializada e da Indústria 4.0 indicando a possibilidade de enfrentar o desafio de aumentar a produtividade e atender a grande variabilidade das tipologias das edificações simultaneamente.

5. INDÚSTRIA 4.0 NA PRÉ-FABRICAÇÃO

A fim de estabelecer uma configuração da Indústria 4.0 para Fabricantes da Construção Industrializada, foi realizada uma revisão sistemática da literatura. Utilizando a base da Web of Science na língua inglesa, foram procuradas no campo tópico (inclui título, resumo, palavras-chave do autor e palavras-chave adicionais), sem restrição de período de publicação as ocorrências simultâneas de palavras chave de dois grupos: Indústria 4.0 e Pré-fabricação.

No grupo de palavras-chave relacionadas à Indústria 4.0, foram selecionadas as tecnologias identificadas discutidas no Capítulo 4, incluindo não somente as tecnologias-chave, mas também precedentes tecnológicos necessários para sua implementação. Um exemplo disso é a inclusão de Sistemas Embarcados devido à relação direta com Sistemas Ciberfísicos. Outro exemplo é a inclusão de Tecnologia de Informação pois possui relação direta com o Conceito de Integração Digital que se expande no contexto da Internet das Coisas. Analítica de Big Data é claramente indicada como uma tecnologia-chave da Indústria 4.0, mas em muitas pesquisas ou aplicações, são os conceitos relacionados de Aprendizado de Máquina ou Inteligência Artificial que são indicados.

No grupo de palavras-chave relacionadas à Pré-fabricação, foram utilizados os termos Pré-fabricação e Construção Modular. O termo Construção Modular (*Modular Construction*, em inglês) na literatura em inglês se refere, normalmente, ao método de construção e montagem de componentes individuais ou módulos fora do local, que são então transportados para o local desejado para a montagem final. Tipicamente, esses módulos são volumétricos, consistindo em cômodos inteiros, com elevado grau de acabamento, reduzindo assim o número de atividades de construção a serem executadas em canteiro de obras.

A busca foi realizada separadamente para cada par de termos utilizados, ou seja, foram realizadas 34 buscas separadas.

5.1. ANÁLISE QUANTITATIVA

O resultado foi a identificação inicial de 1737 artigos, sendo muitos duplicados. Filtrando por título e abstract, o número de artigos foi reduzido para 617, incluindo artigos duplicados. A relação completa do número de artigos identificados para cada busca realizada, após realizar esse filtro, encontra-se no Quadro 2.

Desse conjunto de documentos obtidos, a pesquisa por Pré-fabricação e BIM contém 112 artigos enquanto Construção Modular e BIM contém 54 artigos, demonstrando a relevância de BIM no campo de pesquisa em pré-fabricação e construção modular. Tecnologia da Informação também ocupa lugar de destaque na listagem, assim como Automação e Robótica. A pesquisa também revela que existem muitos avanços recentes em Internet das Coisas aplicada no contexto da construção industrializada. Os conceitos mais avançados de Sistemas Ciberfísicos e Gêmeos Digitais são apenas tangenciados pela literatura atual no domínio da construção industrializada. É interessante notar que não foram encontradas publicações sobre a aplicação de CNC ou Analítica de Big Data na Construção Modular.

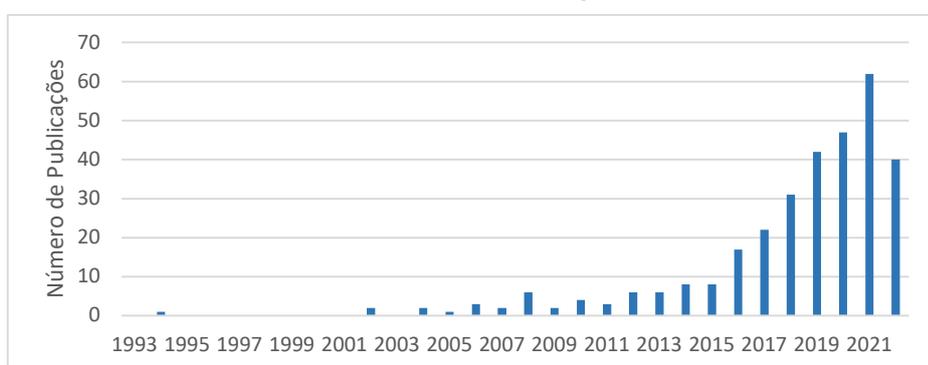
Quadro 2 - Termos de busca na pesquisa bibliográfica e número de artigos identificados

Termo de Busca 1 (Contexto de Pesquisa)	Termo de Busca 2 (Tecnologias)	Número de artigos identificados
Prefabrication	BIM	112
Prefabrication	Information Technology	65
Modular Construction	BIM	54
Modular Construction	Information Technology	49
Prefabrication	Automation	46
Modular Construction	Robotics	44
Modular Construction	Automation	34
Prefabrication	Robotics	33
Prefabrication	Internet of Things	21
Modular Construction	Sensors	19
Modular Construction	Internet of Things	15
Prefabrication	RFID	13
Prefabrication	Sensors	11
Prefabrication	Industry 4.0	11
Modular Construction	Digital Twin	10
Modular Construction	Machine Learning	9
Modular Construction	CAM	8
Modular Construction	Artificial Intelligence	7
Modular Construction	Industry 4.0	7
Prefabrication	CNC	7
Modular Construction	Cyber-Physical Systems	6
Prefabrication	Artificial Intelligence	5
Prefabrication	Digital Twin	4
Prefabrication	Machine Learning	4
Modular Construction	Embedded Systems	4
Prefabrication	Embedded Systems	4
Modular Construction	RFID	4
Prefabrication	Cyber-Physical Systems	3
Prefabrication	CAM	3
Prefabrication	Big Data Analytics	2
Prefabrication	Cloud Computing	2
Modular Construction	Cloud Computing	1
Modular Construction	Big Data Analytics	0
Modular Construction	CNC	0
TOTAL		617

Depois de criar estas 34 listas de buscas independentes, as listas foram fundidas a fim de criar uma base única de pesquisa, removendo os documentos duplicados e deixando 315 artigos de referência.

O Gráfico 1 mostra a evolução histórica de publicações sobre as tecnologias mais relevantes à Indústria 4.0 no contexto da pré-fabricação e da construção modular. Note que a pesquisa foi realizada (atualizada) em junho de 2022, por isso o número menor de publicações indicadas neste ano. Como pode ser observado, há uma tendência crescente acelerada de publicações neste conjunto de temas.

Gráfico 1 – Série histórica de publicações



Fonte: Próprio Autor.

As revistas científicas que mais se destacam nessa seleção de artigos são Automation in Construction (49 artigos), Journal of Cleaner Production (17), Buildings (13), Journal of Construction Engineering and Management (12), Journal of Building Engineering (10), Journal of Computing in Civil Engineering (8), Engineering Construction and Architectural Management (8).

Os países que mais publicaram foram China (92), EUA (59), Austrália (41), Canada (37), Alemanha (30), Inglaterra (28), Itália (14), Coreia do Sul (12), Polônia (11) e Singapura (11).

A estrutura do corpo de conhecimento abrangido nesta revisão se estende além da temática originalmente focada e pode ser explorada através das indicações representadas pelas palavras-chave e das relativas coocorrências das mesmas.

Uma rede de palavras-chave providencia um quadro acurado da produção de conhecimento científico em termos de padrões, relacionamentos e organização intelectual dos tópicos tratados (VAN ECK *et al.*, 2014 apud HOSSEINI, *et al.*, 2018).

Uma análise de coocorrências de palavras-chave foi feita utilizando o VOSviewer, uma ferramenta de software usada para visualizar e analisar redes bibliométricas de grande escala. Ele funciona importando dados bibliográficos e criando um mapa interativo exibindo relações entre autores, artigos, periódicos e instituições, que podem ser analisados e explorados por meio de várias representações visuais.

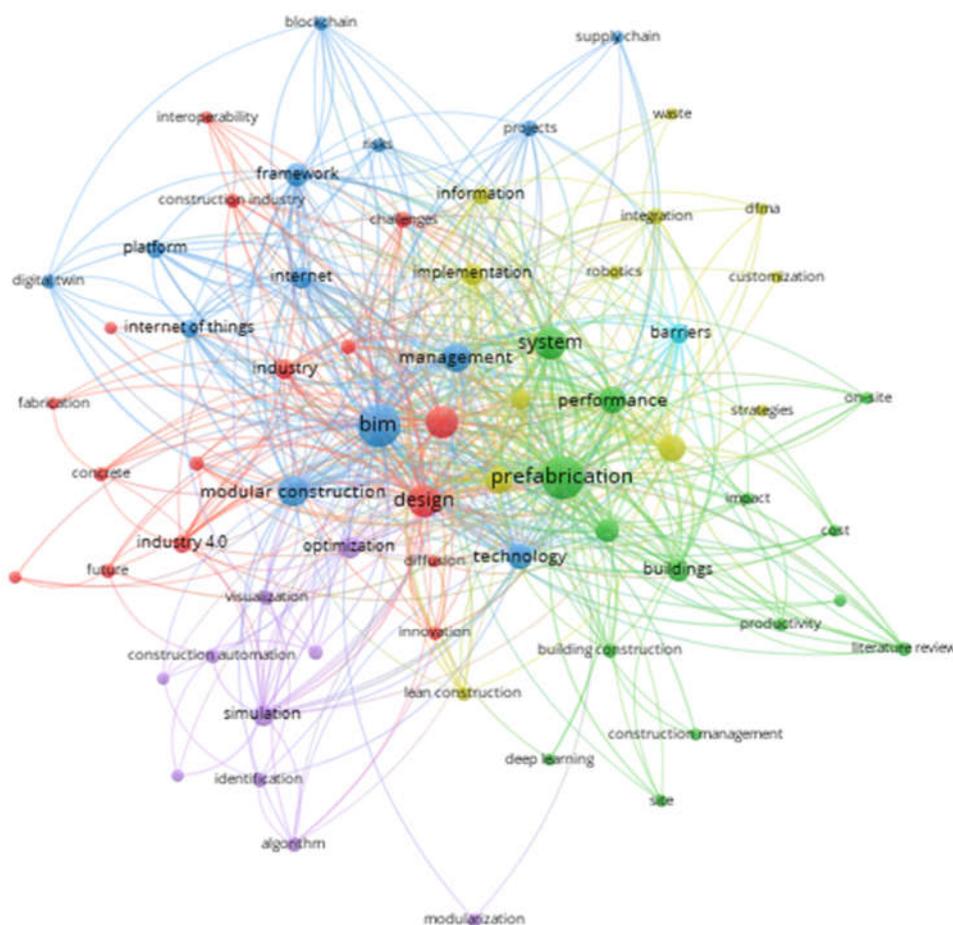
Foram escolhidas palavras-chave da lista de todas as palavras-chave, que inclui palavras-chave do autor e palavras-chave Plus que são palavras muito utilizadas ao longo da publicação, identificadas automaticamente pela Web of Science. O número mínimo de ocorrências de uma palavra-chave escolhido para a análise é 5 publicações distintas, resultando na escolha de 91 palavras-chave, do total de 1239 palavras-chave contidas no conjunto de publicações. Como ocorreu de aparecer uma série de termos sinônimos escritos de maneiras diferentes, foi criado um dicionário de sinônimos (thesaurus) em arquivo texto para fundir essas ocorrências. Exemplos disso podem ser dados como '*building information modeling*' e 'BIM', '*industry 4*' e '*industry 4.0*', '*internet of things*' e '*iot*', '*off-site construction*' e '*offsite construction*', '*prefabricated construction*' e '*prefabrication*'. Além da fusão de sinônimos, foram omitidas algumas palavras-chave relacionadas ao local onde as pesquisas foram realizadas: 'China', 'Hong Kong', 'Hong-Kong', 'UK house builders'. Dessa forma, o número de palavras-chave da seleção foi reduzido de 91 para 68. O Quadro 3 enumera as palavras-chave identificadas na análise de coocorrência pelo VOSviewer e o mapeamento científico resultante está indicado na Figura 6.

Quadro 3 - Palavras-chave identificados na análise de coocorrência pelo VOSviewer

Palavra-chave	Ocorrências	Palavra-chave	Ocorrências
prefabrication	122	digital twin	8
bim	121	construction industry	8
construction	58	building construction	8
system	54	Safety	7
design	52	Productivity	7
modular construction	50	Modularization	7
off-site construction	44	literature review	7
management	41	lean construction	7
model	37	industrialized construction	7
performance	33	Identification	7
technology	31	Future	7
sustainability	24	Concrete	7
framework	23	Blockchain	7
internet	21	Algorithm	7
implementation	21	Waste	6
simulation	20	Tracking	6
optimization	20	Things	6
buildings	20	Impact	6
internet of things	18	Cost	6
industry	18	construction management	6
barriers	18	architecture	6
automation	17	supply chain	5
industry 4.0	15	strategies	5
information	14	site	5
platform	12	panelized construction	5
integration	11	on-site	5
projects	10	interoperability	5
challenges	10	fabrication	5
risks	9	diffusion	5
construction automation	9	dfma	5
adoption	9	deep learning	5
visualization	8	customization	5
robotics	8	computational design	5
innovation	8	augmented reality	5

Fonte: Próprio Autor.

Figura 6 - Mapeamento científico das cocorrências de palavras-chave das tecnologias da Indústria 4.0 no contexto da pré-fabricação e construção modular



Fonte: Dados obtidos do Web of Science e mapeamento criado pelo VOSviewer.

Como era de se esperar, os termos BIM e pré-fabricação ocupam lugares de destaque, com relações fortes com a maioria dos outros termos. Tanto BIM quanto pré-fabricação demonstram centralidade muito superior até mesmo à palavra-chave Indústria 4.0, que serviu como ponto de partida para desenvolvimento desta pesquisa e escolha dos termos de busca. De fato, a presença do BIM é ubíqua na digitalização na indústria da construção, possuindo interface com as demais tecnologias mais relevantes à Indústria 4.0. O termo Sistemas Ciberfísicos, muitas vezes usado até como sinônimo da Indústria 4.0 no contexto da indústria manufatureira, nem mesmo consta na lista de palavras-chave prioritárias desta seleção.

Nesta análise, termos que foram identificadas na sistematização de tecnologias da Indústria 4.0, com menor importância como Blockchain e realidade aumentada, também constam neste compêndio de artigos no contexto da pré-fabricação e construção modular, apesar de não terem sido utilizados como termos de busca.

Outro ponto evidenciado nesta análise é a relação da temática desta pesquisa com os conceitos de construção enxuta e sustentabilidade, que compartilham com a Indústria 4.0 de muitos dos mesmos objetivos como otimizar a utilização de recursos.

Os 315 artigos encontrados e filtrados foram organizados em uma planilha Excel segundo os termos de pesquisa e o número de vezes citado (WoS Core). Foi estabelecido um critério para seleção de artigos para leitura completa. Para exemplificar o processo, escolhe-se o artigo “Extending automation of building construction - Survey on potential sensor technologies and robotic applications” (VÄHÄ *et al.*, 2013). Este artigo tinha, na ocasião da análise, um WoS Core de 88, considerado alto relativo aos outros artigos da seleção. Este artigo, foi encontrado em cinco das buscas independentes, sendo relacionado às palavras chave da Indústria 4.0: BIM, Automação, Tecnologia da Informação, Robótica, Sensores. Sendo selecionado, este artigo contribui 88 pontos para cada uma dessas tecnologias estudadas. A seleção de outro artigo, como “Building information modelling for off-site construction: Review and future directions” (YIN *et al.*, 2019), soma mais 108 pontos para Análise de Big Data, BIM, Tecnologia da Informação e Robótica, pois foi encontrado em cada uma destas buscas independentes.

Os objetivos na seleção dos artigos foram, primeiro, cobrir todas as tecnologias usadas no grupo de palavras-chave da Indústria 4.0 e, segundo, maximizar a pontuação de cada uma das palavras-chave com um número reduzido de artigos. Dessa forma, foram selecionados 33 artigos para leitura completa desse compêndio, além das outras leituras complementares. A relação de artigos selecionados e os correspondentes índices WoS Core se encontram no Quadro 4.

Quadro 4 - Relação de artigos selecionados e os correspondentes índices WoS Core

	Times Cited, WoS Core	Inteligência Artificial	Automação	Análítica de Big Data	BIM	Computação em Nuvem	CPS	Gêmeos Digitais	Sistemas Embarcados	Indústria 4.0	TI	IoT	Aprendizado de Máquina	RFID	Robótica	Sensores	CNC	CAM
A review on the interactions of robotic systems and lean principles in offsite construction (GUSMAO BRISSI <i>et al.</i> , 2022)	2	0	2	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0
BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study (HE, Rui <i>et al.</i> , 2021)	28	28	28	0	28	0	28	28	0	0	28	28	0	0	28	0	0	28
Activity identification in modular construction using audio signals and machine learning (RASHID; LOUIS, 2020)	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	14	0	0	14	0	0
A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0 (WANG, <i>et al.</i> , 2020)	40	40	0	0	40	0	0	0	0	40	40	40	0	40	40	40	0	0
Geometric quality inspection of prefabricated MEP modules with 3D laser scanning (GUO; WANG; PARK, 2020)	23	0	0	0	23	23	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0
An Internet of Things-enabled BIM platform for modular integrated construction: A case study in Hong Kong (ZHAI <i>et al.</i> , 2019)	46	0	0	0	46	0	0	0	0	0	46	46	0	0	0	46	0	0
Development of Intelligent Prefabs Using IoT Technology to Improve the Performance of Prefabricated Construction Projects (ZHAO; LIU; MBACHU, 2019)	15	0	0	0	15	15	0	0	0	0	15	0	0	15	0	15	0	0
Precast supply chain management in off-site construction: A critical literature review (WANG, <i>et al.</i> , 2019)	38	0	0	0	38	0	0	0	0	0	38	0	0	38	0	0	0	0
Trending topics and themes in offsite construction(OSC) research The application of topic modelling (LIU; NZIGE; LI, 2019)	23	0	23	0	23	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0
Industry 4.0 for the Construction Industry-How Ready Is the Industry? (MASKURIY <i>et al.</i> , 2019)	53	0	0	0	53	0	53	0	0	53	53	0	0	0	0	0	0	0
Building information modelling for off-site construction: Review and future directions (YIN <i>et al.</i> , 2019)	108	0	0	108	108	0	0	0	0	0	108	0	0	0	108	0	0	0
Integrating Building Information Modeling and Prefabrication Housing Production (LI, Xiao <i>et al.</i> , 2019)	79	0	0	0	79	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0	0
Optimal facility layout planning for AGV-based modular prefabricated manufacturing system (CHEN, Chen <i>et al.</i> , 2019)	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0
A vision-based system for pre-inspection of steel frame manufacturing (MARTINEZ; AHMAD; AL-HUSSEIN, 2019)	37	0	37	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0

A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018 (JIN <i>et al.</i> , 2018)	121	0	0	0	121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction (HWANG; SHAN; LOOI, 2018)	107	0	0	0	107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis (HOSSEINI, <i>et al.</i> 2018)	212	0	0	0	212	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RBL-PHP: Simulation of Lean Construction and Information Technologies for Prefabrication Housing Production (LI, Xiao <i>et al.</i> , 2018)	61	0	0	0	61	0	0	0	0	0	61	61	0	61	0	0	0	
RFID and BIM-Enabled Prefabricated Component Management System in Prefabricated Housing Production (QI; CHEN; COSTIN, 2018)	10	0	0	0	10	0	0	0	10	0	10	0	0	10	0	0	0	
BIM Investment, Returns, and Risks in China's AEC Industries (JIN <i>et al.</i> , 2017)	54	0	0	0	54	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	
Integrating RFID and BIM technologies for mitigating risks and improving schedule performance of prefabricated house construction (LI, Clyde Zhengdao <i>et al.</i> , 2017)	105	0	0	0	105	0	0	0	0	0	105	0	0	105	0	0	0	
Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization (WON; CHENG, 2017)	68	0	0	0	68	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	
Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things (ZHONG <i>et al.</i> , 2017)	160	0	0	0	160	0	0	0	0	0	160	160	0	160	0	0	0	
Schedule risks in prefabrication housing production in Hong Kong: a social network analysis (LI, Clyde Zhengdao <i>et al.</i> , 2016)	131	0	0	0	131	0	0	0	0	0	0	131	0	0	0	0	0	
SWOT analysis and Internet of Things-enabled platform for prefabrication housing production in Hong Kong (LI, Clyde Zhengdao <i>et al.</i> , 2016)	77	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0	
Smart Construction Objects (NIU <i>et al.</i> , 2016)	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	66	0	0	0	0	0	
BIM-enabled Modular and Industrialized Construction in China (ZHANG <i>et al.</i> , 2016)	39	0	0	0	39	0	0	0	0	0	39	0	0	0	39	0	0	
Critical review of the research on the management of prefabricated construction (LI; SHEN; XUE, 2014)	211	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	211	0	0	0	
Extending automation of building construction - Survey on potential sensor technologies and robotic applications (VÄHÄ <i>et al.</i> , 2013)	88	0	88	0	88	0	0	0	0	0	88	0	0	0	88	88	0	
A service oriented framework for construction supply chain integration (CHENG <i>et al.</i> , 2010)	112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	0	0	0	0	0	0	
Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics (RICHARD, 2005)	53	0	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	0	0	
The Cost-Effectiveness of Integrating Digital Fabrication for Concrete Formworks (FARDHOSSEINI <i>et al.</i> , 2020)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Automating the Digital Fabrication of Concrete Formwork in Building Projects: Workflow and Case Example (FARDHOSSEINI <i>et al.</i> , 2019)	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	
SOMATÓRIA DE WoS Core	2202	68	231	108	1725	38	81	28	10	95	1207	609	53	640	358	240	7	28

Esta seleção concentrada de artigos mais relevantes ao tema foi examinada minuciosamente a fim de gerar maior clareza sobre as intersecções dos avanços da Indústria 4.0 com a construção industrializada, no contexto do chão de fábrica.

5.2. ANÁLISE QUALITATIVA

Nesta seção, são discutidos os conceitos encontrados na revisão sistemática da literatura que descreve a configuração da Indústria 4.0 para FCIs. São investigadas as maneiras como cada uma das tecnologias da Indústria 4.0 está sendo empregada no contexto da pré-fabricação, os problemas operacionais abordados pela implementação dessas tecnologias e os desafios que são enfrentados nestas propostas de soluções. Adicionalmente, são identificadas lacunas em pesquisa no que se refere à implementação de tecnologias da Indústria 4.0 nos ambientes de pré-fabricação.

A discussão de BIM no contexto da pré-fabricação já foi realizada na Seção 3.3.2. Brevemente, BIM pode amplificar os ganhos potenciais da construção industrializada proporcionando a integração de processos de projeto, manufatura e construção, aumentando o nível de transparência e interoperabilidade entre parceiros em projetos de construção que usam componentes pré-fabricados.

Podem-se acrescentar à discussão anterior contribuições relevantes da revisão bibliográfica presente. Zhang *et al.* (2016) apresentaram como a construção industrializada habilitada por BIM pode ajudar a resolver vários problemas na indústria de construção chinesa, como aumento dos custos de mão de obra, baixa qualidade dos componentes pré-fabricados, alto consumo de energia, acidentes de segurança frequentes e poluição ambiental significativa. Exemplos práticos na China demonstraram que detecção de interferências e estudos de construtibilidade por modelos BIM facilitam gerenciamento de construção industrializada.

A pesquisa realizada Jin *et al.* (2017) identificou o valor agregado mais amplamente percebido do BIM é proporcionado pelo aprimoramento visualização, comunicação e compreensão multipartidária. O artigo enfatiza a prioridade de investimento nas colaborações internas e externas em projetos de construção industrializada.

He *et al.* (2021) descreveram como BIM pode suportar o projeto e a fabricação digital de edifícios industrializados. O BIM permite a simulação de estratégias de fabricação e planejamento de pré-fabricação flexível. O uso da tecnologia de

impressão 3D é visto como uma solução promissora para aumentar a flexibilidade de pré-fabricação externa.

A alta similaridade entre os processos de pré-fabricação e os processos de fabricação de outras indústrias facilita a implementação de sistemas robóticos e princípios de Construção Enxuta para aumentar a eficiência e produtividade em OC (MARTINEZ *et al.*, 2008; MARTINEZ *et al.*, 2013, apud BRISSI, *et al.*, 2020).

A revisão bibliográfica aponta para alguns benefícios potenciais da incorporação da automação na indústria da construção como melhorias da produtividade, qualidade e confiabilidade, melhoria da segurança, economia nos custos de mão-de-obra, padronização de componentes, economia nos custos do ciclo de vida e simplificação da força de trabalho. Vähä *et al.* (2013) também ressaltam que a flexibilidade é um elemento-chave para responder às condições ambientais desafiadoras, não estruturadas e dinâmicas, como no canteiro de obras.

Bock; Linner (2015) fornecem uma caracterização abrangente de aplicações de automação e robótica na fabricação de componentes pré-fabricados de concreto, de aço, de madeira, além de elementos volumétricos chamados de módulos construtivos como cozinhas ou banheiros completos. Os exemplos apresentados são de equipamentos ou sistemas de manufatura completos que encontram aplicações reais em fábricas da cadeia produtiva da construção em diversos países do mundo.

Em concreto pré-moldado, equipamentos automatizados mais comuns incluem as usinas de concreto, máquinas automatizadas de corte e dobra de armaduras, distribuidores automatizados de concreto, estações vibratórias além de câmaras de cura (BOCK; LINNER, 2015, PAN; PAN, 2019). Aos poucos, sistemas de produção estacionários estão dando lugar aos sistemas de circulação de pallets, ou seja, mesas de trabalho metálicas que circulam pela fábrica passando pelas diversas etapas de fabricação: limpeza, montagem de fôrmas, distribuição de concreto, vibração, cura, desmolde. As Figuras 7, 8, 9, e 10 apresentam algumas das máquinas automatizadas presentes em fábricas de concreto pré-moldado.

Figura 7 - Corte e dobra automática de armaduras



Fonte: Schnell Brasil.

Figura 8 – Máquina de solda automática de telas de aço



Fonte: Schlatter Group.

Figura 9 - Robô de montagem de fôrmas

Fonte: Weckenmann.

Figura 10 - Distribuidor automático de concreto

Fonte: Weckenmann.

Fardhosseini *et al.* (2019) apresentam uma proposta para fabricação digital de fôrmas para concreto a partir de modelos digitais utilizando máquinas CNC com o objetivo de aumentar a eficiência e acuracidade.

As propriedades mecânicas do aço incluindo alta resistência, tenacidade e estabilidade dimensional o tornam um excelente material para várias operações de usinagem. A construção em aço é caracterizada por um alto grau de pré-fabricação com um longo histórico que acompanhou a trajetória da industrialização. Robôs são usados em atividades repetitivas de serração, furação e solda, permitindo atender as variadas demandas especificadas por projetos construtivos. A Figura 11 apresenta a fabricação robótica de vigas de aço.

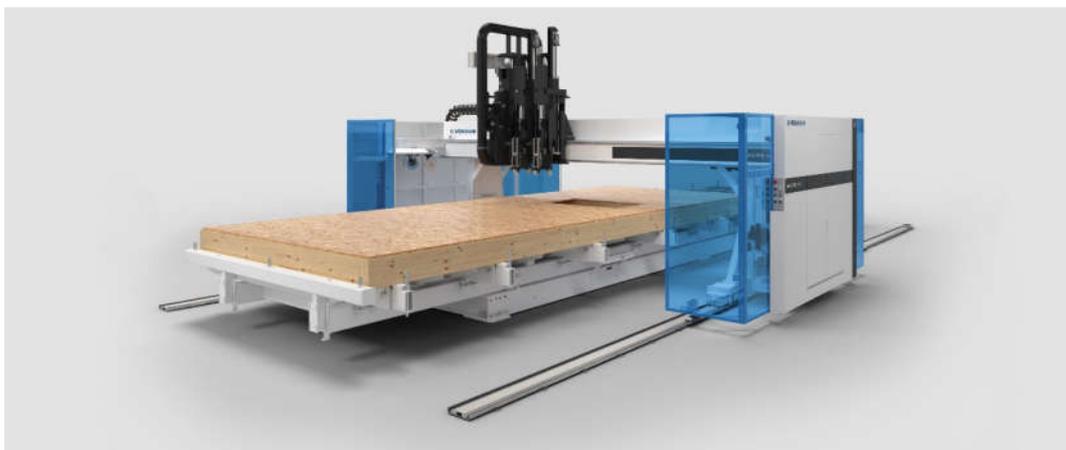
Figura 11 - Fabricação robótica de vigas de aço



Fonte: ZEBAU.

Segundo Orłowski (2020), os processos na fabricação automatizada para sistemas de construção em painéis de madeira (*wood-frame*) têm mostrado níveis crescentes de automação. Soluções de automação incluem máquinas multifuncionais porticadas com comando numérico computacional que fabricam elementos de parede, chão e telhados. Equipamentos como esses permitem pregar, serrar, furar recortes de janelas e portas de forma totalmente automática a partir de modelos computacionais que fornecem os comandos de operações mecânicas. A Figura 12 mostra uma máquina multifuncional porticada para fabricação de painéis de madeira.

Figura 12 - Máquina multifuncional porticada para fabricação de painéis de madeira



Fonte: HOMAG.

Roger-Bruno Richard (2005) questiona a abordagem usual de aumento do nível de industrialização passando por pré-fabricação, mecanização, automação e robótica. Em sua proposta, o conceito de reprodução busca processos inovadores capazes de abreviar as repetitivas operações lineares de natureza artesanal. Ao invés de investir diretamente em maquinário, a reprodução prioriza a pesquisa e desenvolvimento de ideias para gerar um processo simplificado. O produto e processo desenvolvidos conjuntamente devem atender aos requisitos de desempenho repensados de forma a gerar soluções inovadoras para os problemas encontrados. Como exemplo, o trabalho propõe um sistema hidrossanitário integrado fabricado em somente duas peças.

Os equipamentos de fabricação mecânica automatizados e robóticos apresentados incluem uma série de sensores. O uso crescente de sensores em ambientes de fabricação permite monitoramento em tempo real, coleta de dados e otimização de processos, levando a maior eficiência, produtividade e controle de qualidade. Em um trabalho voltado para todo o ciclo de vida do edifício, Vähä *et al.* (2013) defendem que a aquisição de dados desempenha um papel crucial e destaca quatro tipos de necessidades de aquisição de dados:

- a) Posicionamento: Taquímetros, rastreadores a laser, rastreadores ópticos, GPS interno a laser, GNSS/GPS;
- b) Rastreamento (velocidade e precisão não são tão críticas quanto no posicionamento): sistemas baseados em radiofrequência, sistemas baseados em inércia, sistemas baseados em câmeras;

- c) Monitoramento do progresso: Construído x Planejando. Integração RFID e CAD, monitoramento baseado em visão, fotos digitais;
- d) Controle de qualidade: scanners (LADAR, LIDAR, Fotogrametria).

Guo; Wang; Park (2020) descrevem o uso de escaneamento 3D para inspeções de qualidade de módulos pré-fabricados de instalações prediais. A varredura a laser 3D pode adquirir nuvens de pontos 3D com alta precisão, alta densidade, grande velocidade com um alcance mais amplo e menor sensibilidade às condições de iluminação. A técnica permite extrair dados da geometria da estrutura metálica a partir da nuvem de pontos e comparar com a estrutura projetada no modelo BIM.

Por meio do uso de tecnologias de identificação com RFID, as habilidades de sensoriamento são amplificadas nas operações de fabricação e logística, permitindo identificação automatizada, rastreamento e visibilidade em tempo real aprimorados. Pesquisas recentes na área de IoT voltadas para cadeia produtiva da construção recebem ênfase na integração de dados obtidos por RFID e plataformas BIM.

Li, C. *et al.* (2016) realizaram uma análise SWOT relativa à construção industrializada utilizando pré-fabricação em Hong Kong. Entre as fraquezas identificadas estavam a transmissão ineficiente de informações entre etapas de projeto e pré-fabricação, a falta de visibilidade em tempo real e rastreabilidade, lacunas de informações entre agentes envolvidos além da falta de interoperabilidade entre sistemas de gestão empresariais. O artigo defende que uma plataforma integrada de BIM-IoT é apropriada para abordar as fraquezas identificadas.

A plataforma BIM multidimensional habilitada para IoT apresentada em Zhong *et al.* (2017) integra o Building Information Modeling (BIM) com a tecnologia IoT, fornecendo visibilidade e rastreabilidade em tempo real para processos de produção e partes interessadas. Incorpora dados de tempo e localização, indo além dos sistemas BIM tradicionais, permitindo uma gestão mais eficiente da infraestrutura.

Qi; Chen; Costin (2018) estudaram a inserção de tags RFID em elementos pré-moldados de concreto resultando em uma redução de força do sinal de 90% e taxa de falha menor que 1,5%.

Li, C. *et al.* (2017) descrevem um sistema que integra RFID e BIM para mitigar riscos associados ao desempenho de cronogramas de projetos de construção de casas pré-fabricadas, essencialmente associados a fragmentação e descontinuidade de informações entre parceiros.

Zhai *et al.* (2019) implementam RFID, NFC e GPS para resolver desafios na construção modular encontrados em Hong Kong incluindo falhas nos processos de coleta de informações, atrasos na detecção de problemas e tomada de decisão demorados.

Zhao; Liu; Mbachu (2019) criam um método que coleta dados por RFID e LoRa (tecnologia de rede de área ampla de baixa potência, do inglês, *Long Range*) e compartilha por modelos BIM na nuvem com o objetivo de melhorar a localização de componentes pré-fabricados e monitoramento de seu desempenho estrutural durante o processo de instalação.

Das aplicações de sensores interconectados pela nuvem, surgem as diversas possibilidades de aplicação de técnicas de Análítica de Big Data como aprendizagem de máquina para visão e audição computacional.

Martinez; Ahmad; Al-Hussein (2019) propõem o uso de visão computacional para supervisionar o processo de framing em pré-fabricação para estruturas de aço leve (*light-steel frame*). Através de um programa desenvolvido em Python, as informações extraídas de uma câmera posicionada em cima de um protótipo de máquina de estrutura de aço são comparadas com as informações de fabricação disponíveis no modelo de informações da construção (BIM) para cada estrutura.

Rashid; Louis (2020) abordam a aquisição de dados por meio de sinais de áudio em estágio de pré-fabricação de módulos construtivos volumétricos. Como os sons produzidos por diferentes ferramentas e atividades são distintos, os autores demonstram que é possível empregar um método de aprendizado de máquina SVM (Máquina de Vetores de Suporte, do inglês, *Support Vector Machine*) para identificação de tarefas. O trabalho aponta para alguns desafios para que a técnica produza resultados mais úteis para o monitoramento automatizado e coleta de dados como a falta de dados rotulados (áudio) e a integração com sistemas de informação existentes.

A integração de silos de informações permite novas oportunidades de aprendizado promovendo análises abrangentes e facilitando a tomada de decisão aprimorada. Na indústria da construção, BIM assume um papel fundamental na integração digital de informações abrangentes ao longo de todo o ciclo de vida de um edifício. Vähä *et al.* (2013) enfatizam que a ampliação do uso de BIM oferecerá novas possibilidades para cobrir várias necessidades e operações que ocorrem ao longo do ciclo de vida do edifício.

Por meio de análise quantitativa e discussão aprofundada sobre BIM para pré-fabricação, Yin *et al.* (2019) identificaram lacunas e direções futuras de pesquisa incluindo design generativo baseado em BIM, troca de dados baseada em BIM em nuvem, robótica e impressão 3D, e análise de big data habilitada por BIM para identificar as melhores práticas de construção industrializada. Entre os desafios e oportunidades de pesquisas futuras, He *et al.* (2021) menciona a necessidade de expandir a Internet das Coisas e a Inteligência Artificial para coletar Big Data da pré-fabricação, realizar análises preditivas e otimizar as decisões de controle para as operações das instalações de fabricação, bem como o uso de gêmeos digitais para otimizar o desempenho do ciclo de vida de edifícios.

Niu *et al.* (2016) apresenta o conceito de objetos construtivos inteligentes (SCO, do inglês, *Smart Construction Objects*) que são recursos como máquinas, ferramentas, materiais ou componentes que recebem hardware embarcado para sensoriamento, processamento e comunicação. Com isso, os SCOs são caracterizados por três propriedades principais: consciência, que envolve a detecção em tempo real de sua condição e do ambiente circundante; habilidade de comunicação, que permite a saída de informações coletadas por meio de conscientização usando vários protocolos de comunicação; e autonomia, permitindo que os SCOs tomem ações autogeridas ou alertem indivíduos com base em regras predefinidas. Essas são as propriedades que descrevem a os Sistemas Ciberfísicos no contexto da literatura da Indústria 4.0.

5.3. REQUISITOS ESPECÍFICOS DOS FCIs

A partir da conscientização da problemática da baixa produtividade na construção e do desafio de atender à variedade de tipologias de edifícios, da inteligência do escopo tecnológico abordado pela literatura da Indústria 4.0 e da análise cruzada dos temas de pré-fabricação e aplicações tecnológicas dirigidas, aqui é apresentada uma discussão sintética dos requisitos específicos dos FCIs que devem ser atendidos por meio do modelo de maturidade.

Apesar do foco tecnológico e operacional desta pesquisa, entende-se que abordagens organizacionais mais abrangentes seriam necessárias para uma compreensão holística aprofundada dos desafios envolvidos em promover a evolução de uma empresa rumo à Indústria 4.0.

Tendo dito isso, uma avaliação de maturidade tecnológica de empresas de pré-fabricação deve partir da premissa de que os sistemas construtivos industrializados são, essencialmente, projetados sob demanda para cada instanciação. Apesar de tomarem proveito de conceitos de modularidade, com a repetição de elementos em configurações variadas, ainda assim, há um empenho de desenvolvimento de soluções direcionadas com requisitos e restrições particulares.

Em decorrência disso, o modelo de maturidade deve abordar o processo de projeto, e a integração com os processos de produção. Questões de como as informações de projeto são alimentados aos processos de produção são essenciais para o entendimento desta associação operacional.

A exploração do nível de mecanização e automação do maquinário instalado, é importante para refletir as capacidades de executar os processos mecânicos envolvidos de forma independente de esforço humano. Conforme descrito pelo corpus da literatura da Indústria 4.0, e mais especificamente por Niu *et al.* (2016) no contexto da pré-fabricação, o sensoriamento, processamento e comunicação entre as máquinas e equipamentos do chão de fábrica é o que viabilizam o surgimento das propriedades de ciência de contexto e autonomia, que são centrais para o conceito da indústria inteligente. É importante entender quais dados são coletados nas operações envolvidas, como são processados, analisados e aproveitados para direcionar a gestão organizacional.

Não seria possível abordar a Indústria 4.0 sem incluir a integração dos sistemas de informação. A centralidade de BIM, não somente para gestão do processo de projeto, mas de fato, de todo o ciclo de vida da edificação incluído os processos de pré-fabricação, faz do BIM um requisito para a abordagem dos Gêmeos Digitais neste contexto. Essa relevância é reforçada pelo número significativo de pesquisas que exploram a integração de BIM e IoT.

Por fim, os Sistemas de Produção Ciberfísicos descritos na Indústria 4.0 exigem o ciclo fechado não somente de um escopo limitado de parâmetros de controle, mas de uma ampla gama de observações e informações aprendidas de forma autônoma de maneira a aprimorar as operações. Além disso, a flexibilidade das instalações produtivas, capacitadas pela inteligência de contexto e autonomia devem permitir a adaptação dinâmica aos diferentes requisitos de produção exigidos para cada projeto.

Assim, há um conjunto de interesses a serem explorados na confluência da integração digital, da eficiência operacional e da individualização da produção, que

devem ser abordados ao longo das operações envolvidas em projeto e produção de elementos dos sistemas construtivos industrializados.

5.4. MODELOS DE MATURIDADE E ANÁLISES DE APLICABILIDADE

Esta seção dá continuidade ao embasamento teórico utilizado para substanciar a criação do modelo de maturidade proposto no trabalho pela identificação de ferramentas de avaliação de maturidade existentes. São escolhidas ferramentas criadas especificamente para avaliar a maturidade na implementação da Indústria 4.0. Acrescentam-se ferramentas de avaliação de maturidade BIM, devido ao papel central na digitalização, não somente de empresas fabricantes da construção industrializada, mas de fato, de toda a cadeia produtiva da construção.

Nesta leitura, é de interesse para a pesquisa avaliar a adequação dos modelos existentes para a realidade das operações e dos problemas enfrentados pelos FCIs, como a necessidade de desenvolvimento de projetos específicos para cada obra incluindo o desafio adicional da necessidade de detalhamento de componentes pré-fabricados. Outros desafios são encontrados devido à temporalidade dos empreendimentos e fragmentação da cadeia produtiva que dificultam a integração horizontal entre agentes com parceria mais duradouras. A construção por meio de sistemas construtivos industrializados deve ser capaz de proporcionar aumento da produtividade da mão-de-obra e, ao mesmo tempo, atender a requisitos específicos relacionados à variabilidade das tipologias das edificações.

As análises de aplicabilidade então, possibilitam aproveitar as aprendizagens anteriores, identificar lacunas e assegurar que o modelo de maturidade proposto gere uma nova contribuição ao corpo do conhecimento, conforme orientado por Dresch; Lacerda; Antunes Júnior (2015).

5.4.1. Modelos de Maturidade da Indústria 4.0

Através da base do *Web of Science*, foram procuradas ocorrências simultâneas das palavras-chave “*Industry 4.0*” e “*Maturity Model*” no período dos últimos 5 anos (2016-2020), resultando em 20 artigos. Selecionando artigos científicos de quartis Q1 e Q2, e excluindo artigos por título, resultou em 5 artigos finalistas, dos quais os dois com elevado número de citações foram selecionados: Mittal *et al.* (2018) e Wagire *et al.* (2020). Esses dois artigos resultantes, provendo análises comparativas entre

modelos de maturidade da Indústria 4.0 mais relevantes, foram usados com ponto de partida para identificação de outras ferramentas existentes e desenvolvimento do Modelo de Maturidade proposto.

Em seguida, foi verificada a aplicabilidade dos modelos analisados a requerimentos específicos para FCIs. As seguintes perguntas foram feitas, com base em Mittal *et al.* (2018):

Os atuais modelos de maturidade da Indústria 4.0 são adequados para os requisitos específicos de fabricantes de componentes e elementos para sistemas construtivos industrializados?

As perguntas de pesquisa subsequentes que devem ser respondidas são:

- a) 'Quais são as lacunas de pesquisa que impedem os atuais modelos de maturidade da Indústria 4.0 de fornecer o suporte específico que falta aos FCIs?'
- b) 'Como os atuais modelos de maturidade podem ser aproveitados ou adaptados para apoiar os requisitos específicos dos FCIs em sua evolução tecnológica rumo à Indústria 4.0?'

Nesta seção, os trabalhos e modelos de maturidade são apresentados. A escolha de questões específicas adotadas de cada modelo é detalhada no Capítulo 6, Desenvolvimento do Modelo de Maturidade.

O trabalho de Mittal *et al.* (2018) não é modelo de maturidade em si, mas apresenta uma revisão crítica dos modelos de maturidade da Indústria 4.0 e manufatura inteligente, verificando a aplicabilidade para pequenas e médias empresas.

Wagire *et al.* (2020) desenvolvem um modelo de maturidade voltado para economias em desenvolvimento discutindo a importância do deslocamento das vantagens da produção do baixo custo de mão-de-obra para o avanço das tecnologias de manufatura. O trabalho de Wagire *et al.* (2020) apresenta um modelo de maturidade, com visão ampla de capacidades organizacionais incluindo pessoas e cultura, conscientização da Indústria 4.0, estratégia organizacional, entre outros.

O modelo de maturidade empresarial conectado apresentado pela Rockwell Automation possui foco na convergência de tecnologias da informação de tecnologias operacionais, conforme descrito pela *Industrial Internet Consortium*. Fechando o loop de coleta de dados, análises pela IoT e retornando com instruções para atuadores de

sistemas que se ajustam automaticamente pode-se otimizar a produtividade, sem necessitar de intervenção humana.

O trabalho de Schumacher; Erol; Sihn, (2016) possui o objetivo principal de estender a análise do modelo de maturidade da Indústria 4.0 a fim de incorporar aspectos organizacionais, focado em empresas de manufatura discreta. As nove dimensões analisadas são: estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura, pessoas, governança e tecnologia.

O índice de maturidade da ACATECH Industrie 4.0 (SCHUH *et al.*, 2017) propõe uma escala com seis estágios ou níveis de desenvolvimento industrial e digital, iniciando pela provisão digital de informações e conexão em rede, até a unificação em uma fonte única de verdade a fim de descobrir inter-relações nas informações, prever comportamentos e adaptar operações de forma autônoma. A estrutura de avaliação proposta pela ACATECH é bastante abrangente, atingindo os principais temas e com foco nas tecnologias-chave da Indústria 4.0

Para uma avaliação da maturidade das cimenteiras alemãs, o trabalho '*Industrie 4.0 in der Zementindustrie*', RWTH (2019) apresenta uma implementação do modelo de maturidade ACATECH com enfoque operacional na produção de cimento.

O *IMPULS-Industrie 4.0 Readiness* (LICHTBLAU *et al.*, 2015) apresenta questões voltadas para um entendimento alto nível de investimento estratégico no desenvolvimento tecnológico nos diferentes setores da empresa.

Com um foco na gestão corporativa, conformidade legal e gestão de risco, *The Industry 4.0/digital operations selfassessment* (GEISSBAUER *et al.*, 2016) utiliza uma definição do tema da Indústria 4.0 como integração digital de ponta a ponta envolvendo: integração vertical e horizontal, digitalização de produtos e serviços, modelos de negócios digitais.

Akdil, Ustundag, Cevikcan (2018) apresentam um modelo de maturidade com um questionário extenso que aborda diversos aspectos da implementação de princípios e tecnologias da Indústria 4.0 nas organizações, incluindo produtos e serviços inteligentes, processos de negócios inteligentes e estratégia organizacional. O modelo foi desenvolvido através de método rigoroso com fundamentação teórica em princípios e tecnologias da Indústria 4.0. As características dos níveis de maturidade são detalhadamente elaboradas, porém o cálculo do nível de maturidade, apesar de possuir formulação explícita, não considera importância de dimensões avaliadas nem mesmo validação empírica. As tecnologias de IoT e CPS não são

mencionadas, indicando uma avaliação mais voltada para pré-requisitos da Indústria 4.0.

Em síntese, os modelos de maturidade da Indústria 4.0 analisados apresentam algumas lacunas em questões importantes. Não há direcionamento dos modelos para etapas de projeto de componentes projetados sob demanda (ETO, do inglês, *Engineered-to-Order*). Tecnologias CAD/CAM e CNC, importantes para estabelecer um vínculo digital entre as etapas de projeto e de fabricação, também são excluídos. Nota-se que somente os modelos criados na Alemanha abordam questões relacionadas a Gêmeos Digitais e Sistemas Ciberfísicos.

5.4.2. Modelos de Maturidade BIM

Em paralelo com a identificação de Modelos de Maturidade da Indústria 4.0, também foram estudados Modelos de Maturidade BIM a fim de verificar sua aplicabilidade a requerimentos específicos para FCIs. O objetivo da análise de aplicabilidade de modelos de maturidade BIM é identificar as pesquisas relevantes e ferramentas de maturidade existentes que tratam de usos de BIM de interesse para aplicações da Indústria 4.0. As questões a serem respondidas são:

- a) ‘Os atuais modelos de maturidade BIM abordam questões pertinentes a automação de projetos detalhados de componentes?’
- b) ‘Os atuais modelos de maturidade BIM abordam questões pertinentes a fornecimento de informações digitais para produção automatizada de componentes?’

A análise de aplicabilidade de modelos de maturidade BIM partiu da identificação da literatura acadêmica relevante ao tema. Através da base do Web of Science, foram procuradas as publicações com ocorrência simultânea dos termos de busca “BIM” e “Maturity Model” no título, resumo, palavras-chaves do autor de palavras-chave identificadas pela própria base devido à ocorrência frequente ao longo do texto. A busca resultou em 127 resultados iniciais.

Esse conjunto de documentos foi filtrado por título e por resumo a fim de remover artigos relacionados a casos de aplicação de modelos de maturidade em empresas ou projetos. Também foram removidos da lista artigos relacionados a gestão de facilities, tema que foge do escopo da presente pesquisa. Assim foram selecionados

dez documentos que tratam sobre a criação de novos modelos de maturidade, análises comparativas entre modelos e análises de compatibilidade de modelos.

Dos dez trabalhos analisados, três se destacam por abordarem questões relacionadas a automação de projetos e somente um dos trabalhos analisados entra em questões relacionadas ao fornecimento de informações digitais para produção automatizada de componentes.

Demirdögen *et al.* (2021) visam desenvolver uma estrutura de maturidade para superar problemas de adoção e explorar sinergias entre as metodologias Gestão Enxuta, Engenharia de Valor, BIM e Analítica de Big Data para a indústria de AEC. Nesse sentido, a metodologia DSR foi usada para desenvolver e avaliar a estrutura de maturidade proposta. O trabalho relaciona diversos ganhos possíveis através da implementação de BIM para gestão enxuta, ou engenharia de valor como geração rápida de múltiplas alternativas de projeto e planejamento e colaboração de projeto e construção.

Olawumi; Chan (2019) desenvolvem um modelo para implementação de BIM em países em desenvolvimento que inclui a avaliação do compartilhamento online eficiente de dados de projeto e resultados de simulação, adoção de princípios de código aberto para desenvolvimento de software e eficiência na interoperabilidade entre software BIM, bem como gerenciamento adequado de modelos BIM e cloud-BIM.

Phang; Chen; Tiong (2020) criaram um modelo para identificação de fatores críticos de sucesso na adoção de BIM para empresas fabricantes de concreto pré-moldado. Entre os oito fatores mais relevantes estão a extração de dados para controle de maquinário de produção e a elaboração mais rápida de desenhos relacionada à melhor gestão de modificações ao projeto.

Os dez trabalhos analisados fazem referências a ferramentas de avaliação de maturidade BIM estabelecidos como o *National Interactive Capability Maturity Model*, *BIM Maturity Matrix* e *VDC Scorecard*.

O NBIMS – CMM é o modelo de maturidade BIM mais citado na literatura acadêmica, segundo Alankarage *et al.* (2022). A ferramenta permite a autoavaliação de dez níveis de 11 áreas relacionadas a gestão da informação em projetos de construção (*National BIM Standard - United States Version 3*). Entre as áreas avaliadas, são de interesse para o contexto desta pesquisa a Riqueza de Dados e a Interoperabilidade.

A riqueza de dados é a medida do conteúdo de dados de um modelo e sua aplicabilidade para um determinado uso de BIM, relacionada ao Nível de Desenvolvimento (LOD, do inglês, *Level of Development*). No NBIMS – CMM, a escala de maturidade é descrita partindo de “Dados Básicos”, passando por “Dados mais Informações Expandidas” até “Gestão Completa de Conhecimentos”. No que se refere a usos de BIM, o (*National BIM Standard – United States Version 3*) faz referência ao *BIM PROJECT EXECUTION PLANNING GUIDE, VERSION 3.0*, da *Penn State, Appendix B-7: Model Use: Fabricate Product*. O uso que se destaca na relação entre Indústria 4.0 e BIM é a fabricação de produtos, ou uso de informações de um modelo para fabricar componentes ou elementos para construção. Os recursos necessários para este uso BIM, segundo a *Penn State*, são software de projeto autoral, dados legíveis por máquina para fabricação e métodos de fabricação.

A capacidade de diversos sistemas de software trabalharem juntos, descrita pela interoperabilidade, se aplica no contexto da pré-fabricação, na colaboração entre engenheiros, arquitetos e projetistas para desenvolvimento e integração de projetos e detalhamento de componentes para a construção. A interoperabilidade também pode ser analisada do ponto de vista da facilidade de gerar instruções de máquina para fabricação digital de componentes, a partir do Modelo de Informações da Construção.

O NBIMS–CMM, portanto, faz referência a fabricação de produtos e a interoperabilidade entre sistemas computacionais, necessários para a integração digital entre atividade de projeto e produção, sem entrar diretamente em detalhes sobre questões pertinentes a automação de projetos detalhados de componentes ou fornecimento de informações digitais para produção automatizada de componentes.

A Matriz de Maturidade BIM *Excellence* (BIMe) é baseado nas pesquisas publicadas por Dr. Bilal Succar e uma rede internacional colaboradores. A documentação apresenta a metodologia científica para desenvolvimento do modelo. A Matriz de Maturidade BIM *Excellence* permite várias formas de avaliação de organizações, projetos, equipes ou indivíduos.

Cada área-chave da avaliação possui uma descrição detalhada de cinco níveis de maturidade possíveis. Das 10 áreas-chave avaliadas, três estão diretamente relacionadas ao campo tecnológico: software, hardware e rede, relevantes para a presente pesquisa. Adaptações para o contexto específico de fabricantes devem envolver capacidades tecnológicas de criar comandos numéricos de modelos BIM diretamente para operação de máquinas no chão de fábrica. Outras áreas avaliadas

no BIMe incluem Atividades & Fluxo de Trabalho, Liderança & Governança e questões contratuais.

O desenvolvimento da ferramenta BIM *Quick Scan* é documentado por Sebastian, Van Berlo (2011). A ferramenta foi criada com o objetivo de se avaliar o desempenho BIM de uma organização em quatro áreas principais, chamadas de capítulos: organização e gestão, mentalidade e cultura, estrutura e fluxo de informações, ferramentas e aplicações. Cada capítulo contém um certo número de indicadores chave de desempenho, no formato de um questionário de múltipla escolha.

Os capítulos 3 e 4 são mais pertinentes ao domínio desta pesquisa. O capítulo 3 inclui aspectos práticos de uso de bibliotecas de objetos, documentação de fluxos de informações internas e com parceiros externos e tipo de troca de dados. Já o capítulo 4 entra em questões voltadas para as tecnologias implementadas na organização como tipo de software e utilização de servidor BIM. O BIM *Quick Scan* fornece uma análise do desempenho BIM de uma organização de forma objetiva e compacta, mas não aborda questões relacionadas a fabricação digital suportada por ferramentas computacionais de modelagem paramétrica, nem mesmo a automação para detalhamento apropriado de componentes ou elementos a serem pré-fabricados.

De acordo com Kunz; Fischer (2012), Design e Construção Virtuais (VDC, do inglês, *Virtual Design and Construction*), é o uso de modelos integrados de desempenho multidisciplinar de projetos de design-construção para apoiar objetivos de negócios públicos e explícitos. Com o objetivo de quantificar o desempenho geral de VDC de um projeto AEC que utiliza o VDC, foi desenvolvido o *VDC Scorecard*, ferramenta que avalia as áreas de planejamento, adoção, tecnologia e desempenho utilizando uma escala percentual ponderada. A abordagem é aplicável a todas as fases do ciclo de vida do projeto a partir da concepção até a fase de operação e manutenção.

As questões avaliadas são voltadas à estrutura organizacional dos envolvidos na metodologia formalizada de VDC, o nível de envolvimento e aderência aos procedimentos, a extensão dos usos e objetivos de VDC e até mesmo o percentual do orçamento do projeto atribuído a VDC. O item (A1>D3>M2.0+) questiona se VDC/BIM contribui para a gestão de projeto-fabricação. O item A3>D1>M1.0, analisa os usos do modelo nas diversas fases de projeto. Na questão 5, automação e

otimização, os dois pontos analisados são automação de análise (*code check*) e pré-fabricação.

Apesar de permitir a flexibilidade na análise para que seja possível incluir o design e planejamento de atividades de pré-fabricação, não existe uma intenção norteada para o objetivo de avaliar a integração do processo de projeto e de fabricação de componentes ou elementos construtivos.

As diversas ferramentas de avaliação de desempenho BIM abordam sob diferentes ângulos a maturidade das organizações ou de projetos que empreguem as tecnologias e estruturas de colaboração para criação e gestão de informações da construção. Operacionalmente falando, apesar de tratar da integração de informações em todo o ciclo de vida de uma edificação, a ênfase dos modelos analisados recai em processos de projeto com pouco ou nenhum realce do suporte à manufatura industrial de componentes para a construção industrializada, nem mesmo à logística ou outros processos que suportem o esforço de construir.

5.4.3. Síntese da Aplicabilidade de Modelos de Maturidade

O Quadro 4 apresenta uma lista de modelos/índices de maturidade da I4.0 e BIM. Nota-se claramente uma lacuna de abordagem do processo de projeto nos modelos/índices da Indústria 4.0. Como é de se esperar, não há tentativa de modelos/índices BIM ou VDC de abordar a integração do projeto e da produção automatizada. Isso indica a necessidade de uma ferramenta de avaliação projetada especificamente para os fabricantes de componentes e elementos para a construção industrializada.

Quadro 4 - Análises de Aplicabilidade de Modelos de Maturidade

TÍTULO	Tecnologias-chave							Escopo de interesse		
	BIM	AUTO	IoT	CN	ABD	DT	CPS	Projeto	Produção	Logística Interna
Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0. Wagire <i>et al.</i> (2020)	☒	✓	✓	✓	✓	☒	☒	☒	✓	✓
Connected Enterprise Maturity Model Rockwell Automation (2014)	☒	✓	✓	✓	✓	☒	☒	☒	✓	✓
Industrie 4.0 Maturity Index. ACATECH - Schuh <i>et al.</i> (2017)	☒	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☒	✓	✓
Industrie 4.0 in der Zementindustrie. RWTH (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☒	✓	✓
Industrie 4.0 Readiness. IMPULS - Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	☒	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☒	✓	✓
Industry 4.0: building the digital enterprise. PwC (2016)	☒	✓	✓	✓	✓	☒	✓	☒	✓	✓
BIM Excellence. Succar (2009)	✓	☒	☒	☒	☒	☒	☒	✓	☒	☒
VDC Scorecard. Kam <i>et al.</i> (2013)	✓	☒	☒	☒	☒	☒	☒	✓	☒	☒
Modelo de Maturidade Proposto	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Próprio Autor.

6. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MATURIDADE

O Modelo de Maturidade é a ferramenta de avaliação que indica o estágio atual de desenvolvimento tecnológico de empresas individuais. O resultado do emprego deste modelo em empresas individuais pode ser usado para inferir estatisticamente o Quadro de Desenvolvimento Tecnológica da indústria como um todo.

Devido ao grande interesse da academia e da indústria no tópico da Indústria 4.0, muitos modelos de maturidade já foram criados com o objetivo de avaliar o nível de progresso tecnológico das organizações (WAGIRE *et al.*, 2020). Há, contudo, uma lacuna na literatura de um modelo de maturidade sob medida para a pré-fabricação de componentes e elementos para a construção industrializada.

É imperativo que as organizações entendam o 'estado em que se encontram' porque a transformação digital evolui continuamente por meio de mudanças significativas na estratégia de negócios, processos, tecnologias e sistemas de informação (VOß; PAWLOWSKI 2019 apud WAGIRE *et al.*, 2020). Essa qualificação diagnóstica é executada pelo Modelo de Maturidade. A partir dos resultados do modelo e de uma compreensão aprofundada sobre as possibilidades para o progresso da indústria no futuro próximo, as empresas poderão criar um roteiro de desenvolvimento tecnológico a fim de guiar a organização através de seu processo evolutivo.

O Quadro de Desenvolvimento Tecnológico da indústria poderá fornecer às empresas, associações, representantes de governo e outros agentes da cadeia produtiva informações importantes para direcionar as iniciativas de desenvolvimento do setor.

6.1. VISITAS TÉCNICAS E ENTREVISTAS

A identificação e conscientização do problema fornecem o embasamento necessário para determinar o escopo e elencar requisitos específicos para desenvolver o Modelo de Maturidade. No entanto, com o objetivo de estabelecer a relevância do trabalho com a realidade atual do desenvolvimento tecnológico dos fabricantes brasileiros, foram realizadas quatro visitas aos locais de produção. Guiados por profissionais familiarizados com as operações das empresas, particularmente nos processos de projeto e produção, essas visitas permitiram

observações valiosas para o direcionamento das questões a serem tratadas no Modelo de Maturidade. É importante que a avaliação seja capaz de capturar o estado atual das empresas, mesmo que isso indique um nível de desenvolvimento tecnológico aquém dos conceitos da Indústria 4.0 em algum dos fatores de análise.

Apesar do progresso tecnológico passar por alguns períodos de revolução em que as mudanças ocorrem de maneira acelerada e até mesmo disruptiva, entende-se que de maneira geral, há uma evolução lógica de capacidades que são construídas ao longo do tempo. Dessa maneira, a Indústria 4.0 é edificada sobre as competências da mecanização e automação industriais que ocorreram anteriormente. Por isso, o Modelo de Maturidade é elaborado de forma que capture níveis diferentes de maturidade dentro de um intervalo relevante.

6.2. REQUISITOS DO MODELO DE MATURIDADE

6.2.1. Foco no Fabricante

O conceito da Indústria 4.0 abrange diversas perspectivas das transformações ocasionadas pela introdução de tecnologias digitais na indústria incluindo aspectos de engenharia e manufatura cooperativa interorganizacionais (GANZARAIN; ERRASTI, 2016), ou conforme Brettel *et al.* (2014), 'integração horizontal em redes colaborativas através da IoT e IoS'. Apesar desse trabalho tangenciar aspectos da integração entre agentes da cadeia produtiva da construção, o Modelo de Maturidade proposto se concentra nos recursos e processos internos dos Fabricantes da Construção Industrializada.

6.2.2. Foco Tecnológico

Modelos de maturidade da Indústria 4.0 tipicamente analisam as organizações com a visão ampla do administrador da empresa. Segundo Mittal *et al.* (2018), dimensões analisadas incluem: estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura organizacional, pessoas, governança e tecnologia. Apesar de reconhecer a importância de seccionar a empresa como um todo para obter uma visão holística, o presente trabalho se desenvolve focado na transformação tecnológica e nas aplicações direcionadas aos processos internos dos fabricantes.

6.2.3. Foco Operacional

O Modelo de Maturidade proposto possui um foco operacional. O desenvolvimento de um produto construído desde a extração da matéria prima, passando pela transformação desses materiais e fabricação de componentes e elementos até a montagem em canteiro envolve um conjunto de agentes e relações de dependência entre eles. A sucessão de estágios de transformação física pelos quais os materiais passam são paralelizados por e intimamente correlacionados com o fluxo de informações que ocorre em um plano de ideias. Com a crescente digitalização de informações e dos meios de comunicação, e ainda mais pelo espelhamento do mundo físico e digital nos conceitos de CPS e Gêmeos Digitais, as conceituações compartilhadas e os fluxos de informações passam a ser integralmente contidas pelo espaço digital (*Cyberspace*). O seccionamento da cadeia produtiva nesse trabalho é feito de forma a incluir os processos físicos e virtuais entre projeto, produção e logística interna do fabricante.

6.2.4. Autoavaliação

O Modelo de Maturidade proposto deve permitir a autoavaliação, de forma que a ferramenta tenha maior alcance.

6.2.5. Prático – quantitativo

A aplicação do Modelo de Maturidade deve permitir o *benchmarking* preciso da prática da indústria através de métricas quantificáveis. A administração estratégica do desenvolvimento tecnológico é viabilizada por medidas objetivas para monitoramento do progresso.

6.2.6. Adaptabilidade

Aprendendo com o '*VDC Scorecard*', a estrutura de avaliação deve ser capaz de se adaptar à diversidade de sistemas construtivos industrializados e processos de projeto e produção respectivos, além da evolução das tecnologias associadas.

As diferenças entre os sistemas construtivos industrializados restringem a capacidade de abstração dos processos de produção e assim não permitem o exame minucioso das etapas e tecnologias envolvidas. No entanto, capacidades técnicas

com aplicabilidade extensiva podem ser analisadas independentemente do contexto prático. Por exemplo, o controle numérico computacional pode ser utilizado tanto para a dispersão automatizada de concreto em uma fôrma de painel quanto para a usinagem (corte, furação, fresa) de um painel de Madeira Laminada Colada e Cruzada (MLCC).

6.3. ESTRUTURA CONCEITUAL DO MODELO

A Estrutura Conceitual do Modelo de Maturidade descreve como os assuntos de interesse são estudados dentro do MM-FCI4.0. A Estrutura Conceitual projeta-se em três Dimensões de Análise distintas:

- a) Dimensão Tecnológica;
- b) Dimensão Operacional;
- c) Dimensão de Objetivos da Indústria 4.0.

Cada Dimensão possui uma subdivisão interna de Fatores que a compõem. A Dimensão Tecnológica é formada por Grupos de Tecnologias (GTs); a Dimensão Operacional é formada por Processos Físicos e Processos Virtuais (OPs); a Dimensão de Objetivos da Indústria 4.0 é formada pelos diferentes Objetivos (ID – Integração Digital, EOP – Eficiência Operacional e IP – Individualização da Produção).

Cada uma das questões do Modelo de Maturidade proposto é relacionada de maneiras distintas aos Fatores que compõem as diferentes Dimensões de Análise.

6.3.1. Dimensão Tecnológica

A Dimensão Tecnológica se fundamenta nos estudos já descritos no Capítulo 4 com a sistematização do escopo tecnológico da Indústria 4.0, dos pré-requisitos para as tecnologias constituintes, das relações entre elas e a aplicabilidade no contexto da pré-fabricação discutida no Capítulo 5. As tecnologias avaliadas são conjugadas em sete Grupos de Tecnologias, Fatores que compõem a Dimensão Tecnológica do Modelo de Maturidade, conforme o Quadro 5.

Quadro 5 - Agrupamentos na Dimensão Tecnológica

FATOR	NOME DO GRUPO	TECNOLOGIAS CONSTITUINTES
GT1	Tecnologias de Projeto	CAD, BIM, IPD, DfMA, CAD/CAM
GT2	Máquinas de Produção	Mecanização, Automação, CNC, Robótica
GT3	Tecnologias de Comunicação	Redes Industriais, Redes Sem Fio, IoT, M2M
GT4	Sensores	Sensores, Tecnologias de Identificação
GT5	Análítica de Dados	Análises de Dados Coletados, Inteligência Artificial, Visão Computacional
GT6	Gêmeos Digitais	Sistemas de Informação, Modelagem, Simulação, Gêmeos Digitais
GT7	Sistemas de Produção Ciberfísicos	Sistemas de Manufatura Flexíveis e Reconfiguráveis, Capacidades Auto-X.

Fonte: Próprio Autor.

6.3.2. Dimensão Operacional

A Dimensão Operacional requer a discriminação do segmento da cadeia produtiva da construção que deverá ser analisada. O esclarecimento do escopo de relacionamentos entre agentes da cadeia produtiva é necessário para direcionar a elaboração das perguntas do questionário.

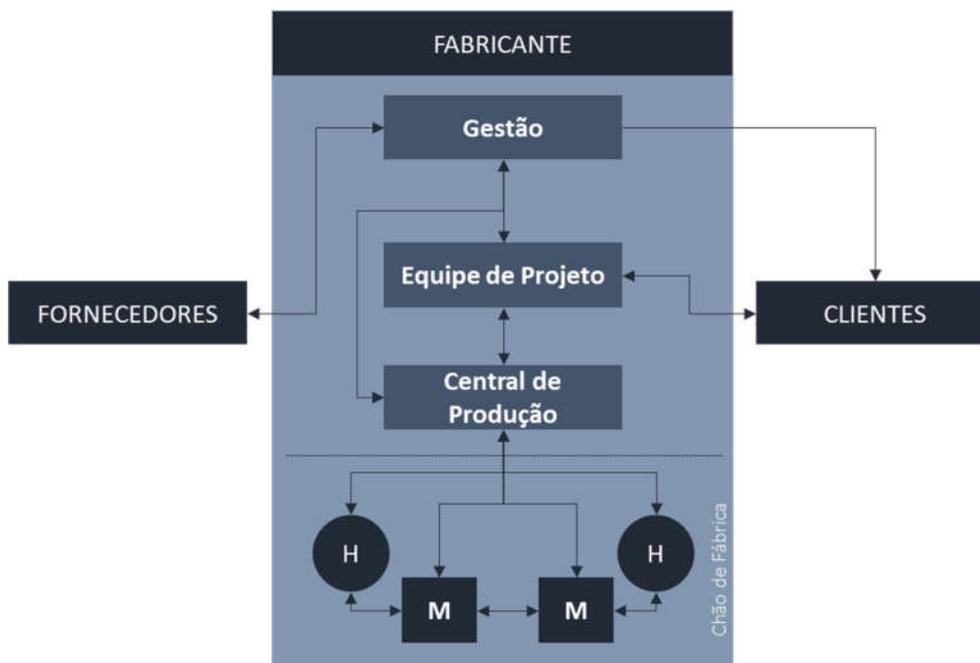
O diagrama de interações dos agentes indica o FCI como o agente central, incluindo principalmente processos internos ao fabricante, considerando também suas interações com fornecedores e clientes (projetistas, construtoras), conforma ilustra a Figura 13.

São de interesse para o estudo:

- a) A interação e colaboração dos clientes com a equipe de projeto do fabricante;
- b) A maneira como parâmetros de produção são fornecidos pela central de produção para o chão de fábrica;
- c) A interação entre humanos e máquinas (H2H, M2M, H2M) no chão de fábrica;

- d) A maneira como dados operacionais são coletados e integrados verticalmente com sistemas de gestão de manufatura e sistemas de gestão empresariais;
- e) A maneira como informações são trocadas com os fornecedores.

Figura 13 - Diagrama de interações dos agentes analisados no Modelo de Maturidade proposto.



Fonte: Próprio Autor.

Atividade consequente da determinação do escopo de interações de interesse é a de estabelecer quais são os processos a serem investigados, devido à intenção de compreender as operações das empresas analisadas.

O Modelo de Maturidade considera a existência de dois mundos, em linha com o conceito dos Sistemas Ciberfísicos usado na literatura da Indústria 4.0: Mundo Virtual e Mundo Físico. No Mundo Virtual estão incluídos todos os processos que envolvem fluxo de dados e informações, sendo: Desenvolvimento de Projeto, Entrada de parâmetros de produção, Sensoriamento, Transmissão de dados, Armazenamento e Processamento de Dados, Aplicações Avançadas. O Mundo Físico inclui os processos que envolvem fluxo material: Produção e Logística interna. O Quadro 6 mostra os oito Processos, Fatores que compõem a Dimensão Operacional sendo seis processos virtuais e dois processos físicos.

Quadro 6 - Dimensão Operacional do Modelo de Maturidade

FATOR	NOME DA OPERAÇÃO	FÍSICO/VIRTUAL
OP1	Desenvolvimento de Projeto	Virtual
OP2	Entrada de Parâmetros de Produção	Virtual
OP3	Produção	Físico
OP4	Logística	Físico
OP5	Captura de Dados	Virtual
OP6	Transmissão de Dados	Virtual
OP7	Armazenamento e Processamento de Dados	Virtual
OP8	Aplicações Avançadas	Virtual

Fonte: Próprio Autor.

6.3.3. Dimensão dos Objetivos da Indústria 4.0

O Modelo de Maturidade proposto segrega três objetivos (Fatores) da Indústria 4.0. O trabalho de Brettel *et al.* (2014) realizou a clusterização de correntes de pesquisa relacionados à Indústria 4.0, chegando em três agrupamentos maiores: Individualização da produção, Integração horizontal em redes colaborativas, Integração digital de ponta a ponta. Esse terceiro tema de pesquisa envolve a ideia da engenharia de ponta a ponta. Pela virtualização da cadeia produtiva é possível simular todos os processos em tempo real, ajustando parâmetros operacionais e otimizando resultados.

No modelo da Manufatura Integrada por Computadores descrito pela pirâmide da automação, a integração vertical descreve o fluxo de dados do chão de fábrica até a sala de controle e mesa de direção. Já a Integração Horizontal, ligada a ideia da cadeia de valor, compreende os fluxos de dados entre departamentos e entre empresas diferentes na cadeia produtiva.

A partir da introdução da Internet das Coisas no ambiente da indústria, Günthner; Hompen (2010 apud BRETTEL *et al.*, 2014) discutem como a pirâmide da automação se reconfigura através dos sistemas distribuídos. Cada um dos objetos que formam os meios de produção possui capacidades de sensoriamento, processamento, atuação flexível e comunicação de forma que o fluxo de dados e informações não seja mais estritamente horizontal ou vertical. Assim, a comunicação pode, essencialmente, ser de qualquer ponto a qualquer outro ponto. Um exemplo de padrão de mensagens seria o *Publish-Subscribe*, que introduz maior escalabilidade de rede além de uma topologia mais dinâmica.

Por este motivo, neste trabalho, o Objetivo de Integração Digital (ID) combina as ideias de integração horizontal e vertical, tratando da disponibilização e compatibilização de dados e informações de forma a viabilizar a gestão baseada em dados em tempo real e dados históricos.

A Eficiência Operacional (EOP) trata da otimização de processos e recursos para aumentar a produtividade e a qualidade, permitindo a utilização eficiente de insumos e entregando resultados consistentes e de alta qualidade. O objetivo do aumento da Eficiência Operacional, no contexto da Indústria 4.0, é viabilizado pela interconexão digital com a coleta de dados, análise para extração de informações relevantes para serem realimentadas nos diversos processos de produção. A agilidade dessas observações, aprendizagens e aplicações viabiliza a otimização das operações de ponta a ponta.

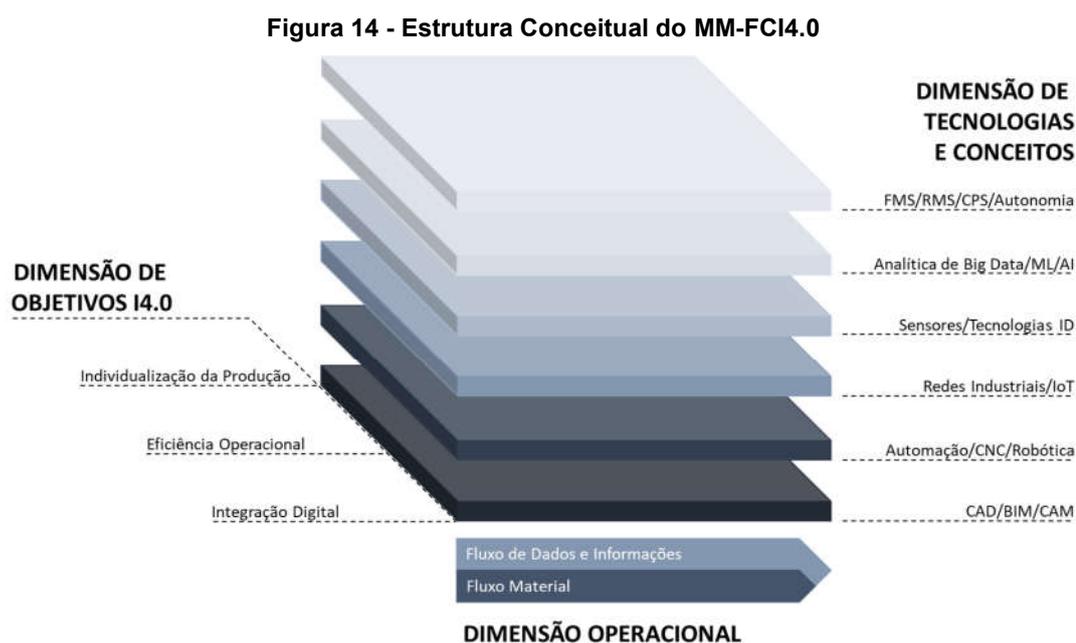
O Objetivo de Individualização da Produção (IP) descreve capacidades de manufatura flexível permitindo respostas ágeis a demandas de mercado, atendendo requisitos específicos de clientes com baixos custos de *setup*. O objetivo de Individualização da Produção parte de processos de projeto e planejamento de soluções específicas para atender aos requisitos estabelecidos para o produto construtivo. Além disso, a Individualização da Produção demanda recursos além dos necessários para a Integração Digital e Eficiência Operacional, necessitando também de alta flexibilidade no domínio físico a fim de executar os processos mecânicos envolvidos na fabricação de componentes e elementos para a construção industrializada. Entende-se que muitas aplicações tecnológicas se alinhem com mais de um Objetivo da Indústria 4.0 simultaneamente. O Quadro 7 apresenta os Objetivos da Indústria 4.0, conforme estruturados neste trabalho.

Quadro 7 - Dimensão Objetivos da Indústria 4.0

FATOR	OBJETIVO DA INDÚSTRIA 4.0
ID	Integração Digital
EOP	Eficiência Operacional
IP	Individualização da Produção

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 14 ilustra a Estrutura Conceitual do Modelo de Maturidade proposto, dividido em três Dimensões de Análise, e total de 18 Fatores de Análise.



Fonte: Próprio Autor.

6.4. ESTRUTURA PRÁTICA DO MODELO

O Modelo de Maturidade para Fabricantes da Construção Industrializada 4.0 (MM-FCI4.0), é constituído, na prática, por dois elementos: Questionário e a Matriz de Pesos.

6.5. ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO

6.5.1. Ferramenta de Coleta

A ferramenta de coleta selecionada para o Questionário foi o *Google Forms*, um software de administração de pesquisas baseado na Web.

6.5.2. Itens de Maturidade

O Questionário do MM-FCI4.0 é formado por Itens de Maturidade (I1, I2, I3...), cada um formado por uma pergunta e uma escala de respostas possíveis. No *Google Forms*, é possível utilizar um formato matricial de forma que diversas perguntas e escalas de respostas possam ser agrupadas. Neste trabalho, cada inserção no *Google Forms*, seja de um item de maturidade individual ou de diversos itens agrupados, é chamada de questão. A Figura 15 apresenta um exemplo de questão com somente um Item de Maturidade enquanto a Figura 16 exemplifica uma questão com diversos Itens de Maturidade agrupados.

Figura 15 - Exemplo de Questão com somente um Item de Maturidade

	Questão	Resposta 1	Resposta 2	Resposta 3	Resposta 4	Resposta 5
Item de Maturidade	Pergunta	<input type="radio"/>				

Fonte: Próprio Autor.

Figura 16- Exemplo de Questão com diversos Itens de Maturidade agrupados

	Questão	Resposta 1	Resposta 2	Resposta 3	Resposta 4	Resposta 5
Item de Maturidade 1	Pergunta 1	<input type="radio"/>				
Item de Maturidade 2	Pergunta 2	<input type="radio"/>				
Item de Maturidade 3	Pergunta 3	<input type="radio"/>				

Fonte: Próprio Autor.

6.5.2.1. Perguntas

As perguntas do Questionário proposto foram baseadas nas ferramentas de avaliação de maturidade para a Indústria 4.0 e BIM. Da Matriz de Maturidade *BIM Excellence* foram adaptadas as perguntas relativas a software, hardware e soluções de rede para colaboração em projetos. De Wagire *et al.* (2020), foram adaptadas as questões com foco tecnológico e operacional, excluindo as questões de estratégia, cultura e estrutura organizacional.

Perguntas específicas sobre fábricas inteligentes foram adaptadas de Lichtblau *et al.* (2015), como referentes à presença de máquinas controláveis por TI, capacidades de comunicação máquina a máquina e interoperabilidade entre máquinas de diferentes fabricantes. Outras perguntas sobre quais dados são coletados em fábrica, a respeito da análise de dados para diferentes aplicações e sobre a utilização de sistemas de informações também foram adaptadas de Lichtblau *et al.* (2015). De Geissbauer *et al.* (2016), foram adaptadas perguntas sobre a colaboração com parceiros, fornecedores e clientes para o desenvolvimento de produtos e serviços e o nível de individualização de produtos oferecidos. Outras perguntas foram adotadas e modificadas a partir de outras referências.

A primeira seção do questionário trata da qualificação dos respondentes pedindo: Nome da empresa, Setor industrial, Faturamento anual da empresa, Número de funcionários, Área onde o respondente trabalha na empresa.

Após essas perguntas iniciais, o Modelo de Maturidade propriamente dito possui 30 Questões. Conforme descrito anteriormente, como muitas das Questões tomam proveito do formato matricial disponível no Google Forms, o número de Itens de Maturidade avaliados é 68.

6.5.2.2. Escalas de Respostas

O Questionário possui uma escala de respostas possíveis para cada pergunta apresentada. As respostas possuem descrições detalhadas de diferentes níveis de maturidade associadas a uma escala de pontuação com o objetivo de reduzir a subjetividade na interpretação dos níveis de maturidade de cada Item individual. A situação mais comum no Questionário é a escala com cinco respostas possíveis com as pontuações (0; 25; 50; 75; 100). No entanto, algumas perguntas podem ter escalas

com três respostas possíveis, associadas às pontuações (0; 50; 100). Existem ainda perguntas que exigem respostas binárias, sim ou não, como no caso da presença de sistemas de informação. Neste caso, as pontuações possíveis são (1;100). O Quadro 8 apresenta um exemplo de Pergunta e escala de cinco respostas possíveis, com o detalhamento dos níveis de desenvolvimento distintos. Ao preencher o Modelo de Maturidade, o respondente deverá escolher qual das respostas melhor descreve a situação atual da empresa.

Quadro 8 - Exemplo de Item de Maturidade.

PERGUNTA	Como se caracterizam os softwares de projetos em sua empresa?
0 pontos	Trabalhamos com projetos 2D desenvolvidos em AutoCAD ou outro software CAD equivalente.
25 pontos	Trabalhamos com projetos 2D desenvolvidos em AutoCAD ou outro software CAD equivalente. Utilizamos outros softwares de modelagem 3D não-semânticos como Sketchup para auxiliar na visualização.
50 pontos	Trabalhamos com ferramentas de projeto paramétrico 3D (como REVIT ou ArchiCAD, SolidWorks, SolidEdge, Inventor ou CATIA). Exportações do modelo 3D para pranchas 2D são necessárias para alimentar os processos de produção.
75 pontos	Trabalhamos com ferramentas de projeto paramétrico 3D apropriadas para nossos processos de produção. As ferramentas são capazes de gerar projetos executivos para produção em fábrica.
100 pontos	Trabalhamos com ferramentas de projeto paramétrico 3D apropriadas para nossos processos de produção. As ferramentas são capazes de gerar projetos executivos para produção em fábrica e gerar instruções computacionais necessárias para operação do maquinário.

Fonte: Próprio Autor.

6.5.3. Testes Iniciais e Iterações do Questionário

Duas iterações preliminares do Questionário foram testadas em duas empresas sendo uma fabricante de elementos de concreto pré-moldado e protendido e outra, empresa *startup* de construção modular.

As versões iniciais do Questionário eram muito diferentes da versão final. Apesar de ter foco operacional e clara definição das tecnologias a serem avaliadas, não existia ainda uma estrutura conceitual bem definida. Uma diferença marcante em uma dessas versões iniciais do Questionário foi a tentativa de identificar o estado atual da empresa e o estado desejado a ser alcançado nos próximos cinco anos. Essa estrutura de pergunta matricial permitia essa avaliação com relativa facilidade. No entanto, o proveito desse recurso de estrutura matricial das Questões para poder avaliar maior

número de Itens diferentes impediu que fosse usado para coletar dados sobre o estado futuro desejado. Com maior ponderação, julgou-se que a indicação do estado futuro seria muito especulativo e renderia dados inúteis para análise.

A evolução do trabalho permitiu a convergência para o Questionário para a versão final, suportado pelo embasamento teórico. O Questionário completo pode ser encontrado no APÊNDICE A.

6.6. ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE PESOS

6.6.1. Atribuição de Pesos às Dimensões (Tecnológica e Operacional)

Devido aos diferentes níveis de importância de cada Item de Maturidade (I1, I2, I3, ..., I68) aos diferentes Fatores (F1, F2, F3, ..., F18) das Dimensões de Análise (Dimensão Tecnológica, Dimensão Operacional e Dimensão de Objetivos da Indústria 4.0), é necessário atribuir pesos que expressem essas diferenças para fins de cálculo dos Níveis de Maturidade relativos a cada Fator. Os pesos são registrados em uma Matriz de Pesos ($P_{68 \times 18}$). Os relacionamentos são estabelecidos por meio de multiplicação matricial.

O processo de determinação dos pesos consiste na atribuição inicial seguida da ponderação/normalização dos pesos.

Para a atribuição inicial de pesos, foi adotada uma escala de '0' a '10', sendo que '0' indica nenhuma influência do Item no Fator analisado e '10' indica importância máxima.

Na Dimensão Tecnológica, a atribuição de pesos é relativamente simples. A pergunta já exemplificada no Quadro 8, sobre a caracterização dos softwares de desenvolvimento de projetos é claramente relacionada ao GT1 - Tecnologias de Projeto, e não possui relação direta aos demais Grupos Tecnológicos. Por isso, recebe um peso '10' nesse Grupo e '0' nos demais.

A mesma questão, sob a ótica de Operações, também é facilmente categorizada no Processo de Desenvolvimento de Projeto, recebendo peso '10' nesse Processo e '0' nos demais. Portanto, não há muita subjetividade em estabelecer os vínculos dos Itens de Maturidade com os Grupos Tecnológicos nem mesmo com os Processos na Dimensão Operacional. A discussão sobre pesos atribuídos aos Objetivos da Indústria 4.0 é reservada para a Seção 6.6.3.

Depois da atribuição de pesos de '0' a '10', cada coluna é normalizada de forma que a somatória dos pesos em uma coluna da matriz seja igual a 1,000, ou seja, a somatória das contribuições de todos os Itens de Maturidade para qualquer Fator das Dimensões de Análise deve ser igual a 100%. O Quadro 9 apresenta a estrutura da Matriz de Pesos. A Matriz de Pesos ($P_{68 \times 18}$) completa pode ser encontrada no APÊNDICE B.

Quadro 9 – Estrutura da Matriz de Pesos

	Dimensão Tecnológica							Dimensão Operacional								Dim. Obj. I4.0		
	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	ID	EOP	IP
I1	P _{1,1}	P _{1,2}	P _{1,3}	P _{1,4}	P _{1,5}	P _{1,6}	P _{1,7}	P _{1,8}	P _{1,9}	P _{1,10}	P _{1,11}	P _{1,12}	P _{1,13}	P _{1,14}	P _{1,15}	Discussão reservada para a Seção 6.6.3		
I2	P _{2,1}	P _{2,2}	P _{2,3}	P _{2,4}	P _{2,5}	P _{2,6}	P _{2,7}	P _{2,8}	P _{2,9}	P _{2,10}	P _{2,11}	P _{2,12}	P _{2,13}	P _{2,14}	P _{2,15}			
I3	P _{3,1}	P _{3,2}	P _{3,3}	P _{3,4}	P _{3,5}	P _{3,6}	P _{3,7}	P _{3,8}	P _{3,9}	P _{3,10}	P _{3,11}	P _{3,12}	P _{3,13}	P _{3,14}	P _{3,15}			
...			
I68	P _{68,1}	P _{68,2}	P _{68,3}	P _{68,4}	P _{68,5}	P _{68,6}	P _{68,7}	P _{68,8}	P _{68,9}	P _{68,10}	P _{68,11}	P _{68,12}	P _{68,13}	P _{68,14}	P _{68,15}			
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			

Fonte: Próprio Autor.

6.6.2. Cálculo dos Níveis de Maturidade dos Fatores

O Vetor de Respostas ($R_{1 \times 68}$) de cada respondente é o conjunto de parâmetros numéricos fornecido pelos FCIs ao responder os 68 Itens do Modelo de Maturidade. O Vetor de Respostas serve de entrada para o Modelo de Maturidade.

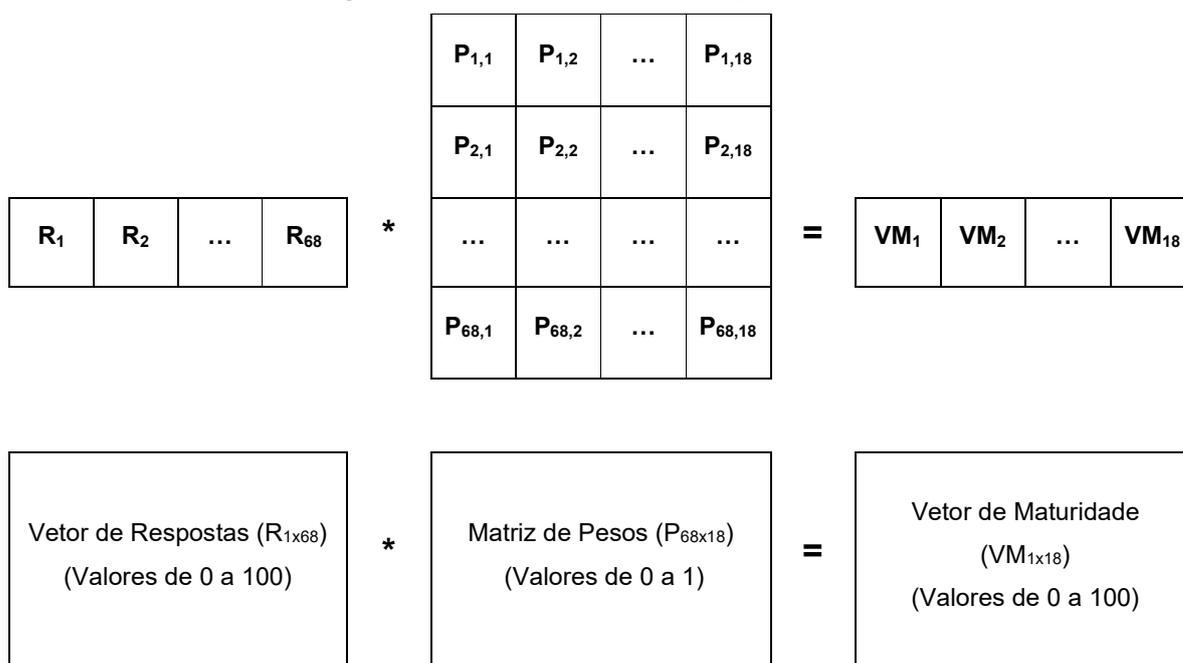
A multiplicação do Vetor de Respostas ($R_{1 \times 68}$) pela Matriz de Pesos ($P_{68 \times 18}$) resulta em um vetor, chamado de Vetor de Maturidade ($VM_{1 \times 18}$), com 18 valores relativos aos níveis de maturidade em cada Fator das Dimensões de Análise. A Figura 17 ilustra a multiplicação matricial, e indica a nomenclatura utilizada.

Através dos níveis de maturidade calculado para cada Fatores das Dimensões de Análise é possível comparar os resultados, encontrar forças e fraquezas na infraestrutura tecnológica e nas operações internas dos FCIs. Por exemplo, na Dimensão Tecnológica, é possível encontrar uma empresa tenha elevado nível de maturidade em Máquinas de Produção, mas apresente baixo nível de maturidade em Analítica de Dados. O mesmo raciocínio é aplicável à Dimensão Operacional. O

fabricante pode ter processos de entrada de parâmetros de produção avançados enquanto desenvolvimento de projeto encontra valores mais baixos de maturidade.

$$R_{1 \times 68} * P_{68 \times 18} = VM_{1 \times 18}$$

Figura 17 - Ilustração da Multiplicação Matricial



Fonte: Próprio Autor.

O tratamento da Dimensão de Objetivos da Indústria 4.0 se diferencia das demais e é discutida a seguir.

6.6.3. Atribuição de Pesos à Dimensão Objetivos da Indústria 4.0

A maneira como cada Item do Modelo de Maturidade se relaciona com os Objetivos da Indústria 4.0 é complexa. O Quadro 10 apresenta outro exemplo de Item de Maturidade que está relacionada aos três Objetivos da Indústria 4.0.

Quadro 10 – Exemplo de Item de Maturidade.

PERGUNTA	A empresa possui máquinas capazes de ajustar sua operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas?
0 pts.	Não.
25 pts.	Sim. Já fizemos experimentos com máquinas com capacidade de ajustar a operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas.
50 pts.	Sim. Temos algumas máquinas com capacidade de ajustar a operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas (até 25% das máquinas).
75 pts.	Sim. Entre 25% e 50% das nossas etapas de produção possuem máquinas com capacidade de ajustar a operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas.
100 pts.	O sistema de produção da nossa empresa permite que máquinas se comuniquem e se ajustem de forma autônoma a requisitos de produção customizados e parâmetros técnicos monitorados a fim de otimizar a eficácia operacional.

Fonte: Próprio Autor.

A capacidade de máquinas se ajustarem de acordo com informações recebidas de outras máquinas está relacionada com a ID pela necessidade de comunicação entre os equipamentos que executam a produção e a logística de chão-de-fábrica, com a EOP, pela capacidade de ajustar parâmetros de produção para melhoria de métricas de produtividade e qualidade, e com a IP, pelo fato de permitir a reconfiguração flexível e autônoma a fim de atender requisitos de produção customizados. Em que grau a questão se relaciona a cada um desses objetivos? Em que grau cada Item do Modelo de Maturidade se relaciona com cada um dos Objetivos da Indústria 4.0?

Para responder essa pergunta, foram solicitadas as contribuições de diversos pesquisadores especialistas no tema da Indústria 4.0. A escolha dos contribuintes para essa etapa da pesquisa foi feita a partir da identificação dos autores dos artigos científicos principais consultados para a sistematização das tecnologias da Indústria 4.0 e dos Modelos de Maturidade da Indústria 4.0.

A atividade proposta para os especialistas consistia em se atribuir um peso de '0' a '10' para cada um dos Objetivos da Indústria 4.0, em cada Item de Maturidade. A nota '0' indica nenhuma relevância para o Objetivo, e nota '10' indica máxima relevância para o Objetivo. A orientação foi dada para que pesos fossem considerados

entre os diferentes Objetivos em uma dada questão. Além disso, os especialistas deveriam considerar os pesos entre questões diferentes.

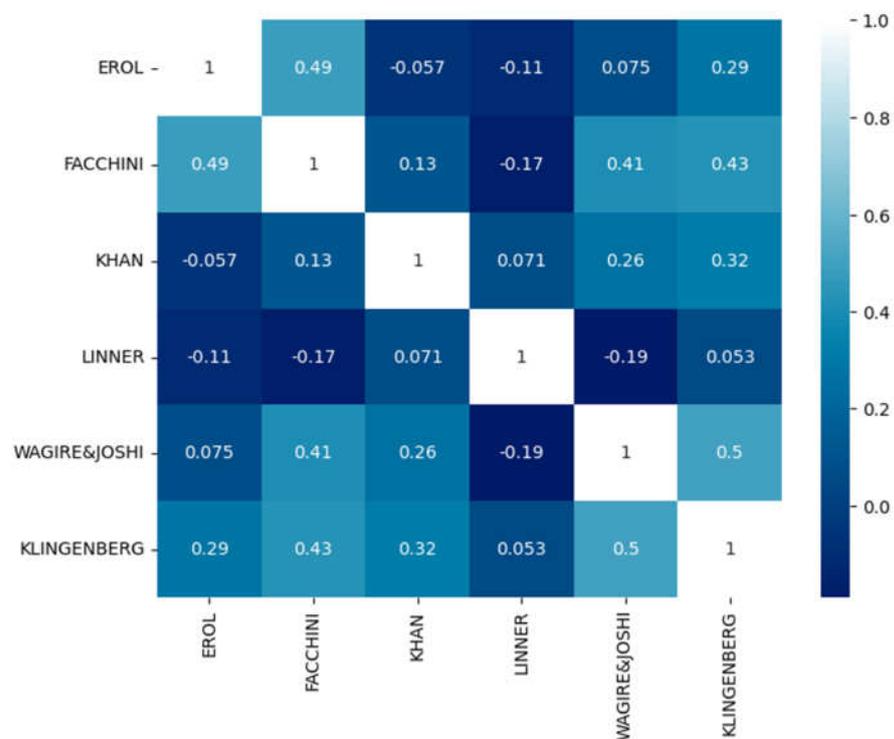
Foram contatados 25 especialistas por e-mail ou pelo LinkedIn, sete dos quais forneceram suas contribuições. Dois dos especialistas, Wagire e Joshi, são colaboradores de pesquisa em uma mesma instituição e responderam em conjunto. Cada contribuinte forneceu um peso para cada um dos três Objetivos da Indústria 4.0, nos 68 itens de maturidade, ou seja, 204 pontos distintos. Ao todo, as seis respostas contribuíram 1.224 pontos de dados para o estudo.

Dois pontos interessantes merecem ser destacados a respeito dos pesos atribuídos vinculando os Itens de Maturidade aos três Objetivos da Indústria 4.0 (Integração Digital, Eficiência Operacional e Individualização da Produção). Primeiro, apesar da orientação para atribuir pesos de 0 a 10, descrevendo a importância daquele item de maturidade em relação ao objetivo da Indústria 4.0 correspondente, quatro das seis contribuições não fizeram nenhuma atribuição de peso igual a “0”, com o peso mínimo atribuído por alguns dos autores igual a “2” ou até “3”. Segundo, seria esperado que a média dos pesos atribuídos fosse próximo de 5,000, pois a escala varia de 0 a 10. No entanto, as médias calculadas de todos os pesos atribuídos pelos autores para ID, EOP e IP, respectivamente, é 7,281, 7,456 e 5,517, demonstrando uma tendência de “pesar” nos valores indicados.

É possível avaliar as correlações entre os pesos atribuídos pelos especialistas consultados através das matrizes de correlação de Pearson.

A Tabela 1, mostra a correlação para os pesos atribuídos para Integração Digital. Desta vez, a única correlação mais forte aparece entre Wagire & Joshi e Klingenberg.

Tabela 1 - Matriz de correlação de Pearson dos pesos atribuídos pelos especialistas consultados para Integração Digital

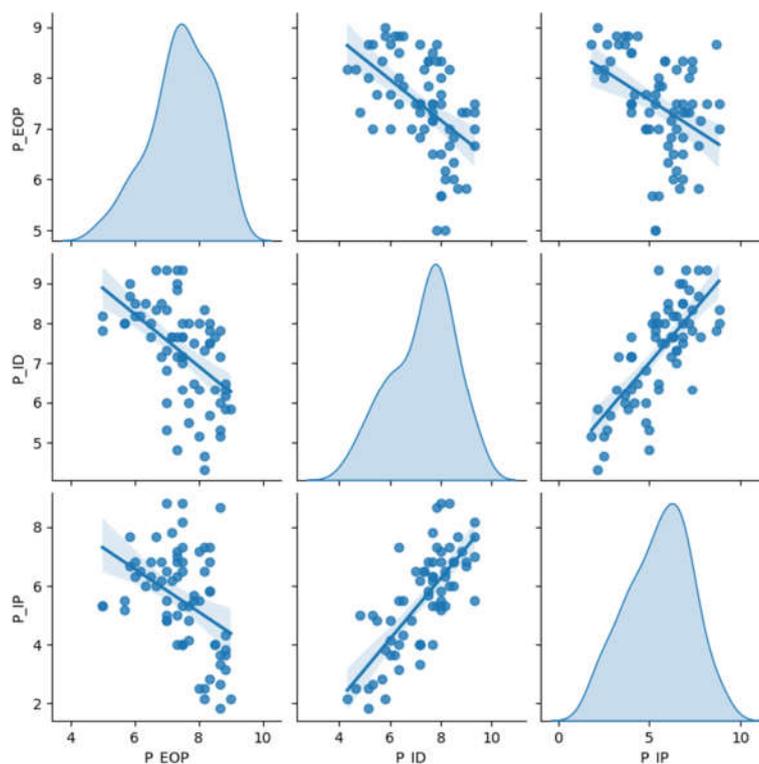


Fonte: Próprio Autor.

As correlações dos pesos atribuídos para Eficiência Operacional e Individualização da Produção, semelhantemente, demonstram valores baixos ou moderados.

Outra característica interessante dos vetores dos pesos médios para os objetivos da Indústria 4.0 se evidencia pela matriz de dispersões, conforme ilustra o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Matriz de dispersões dos pesos atribuídos aos objetivos da Indústria 4.0



Fonte: Próprio Autor.

Pode-se verificar que as dispersões de pontos não mostram convergência para uma linha de tendência o que seria característico de variáveis com níveis elevados de correlação numérica. Isso mostra que os itens de maturidade contribuem de fato com proporções diferentes para os diferentes objetivos da Indústria 4.0.

A partir dos pesos atribuídos pelos especialistas, foi testada uma série de abordagens para adequar os pesos atribuídos para a análise da maturidade dos respondentes referentes a implementação de tecnologias para atingir os objetivos da Indústria 4.0.

A primeira abordagem proposta consistia em calcular a média simples dos pesos atribuídos pelos autores para cada item de maturidade em cada objetivo da Indústria 4.0, formando assim três vetores de pesos. Em seguida, os vetores de pesos são normalizados de forma que a somatória dos pesos em uma coluna da matriz seja igual a 1,000, ou seja, a somatória das contribuições de todos os Itens de Maturidade para qualquer Fator das Dimensões de Análise deve ser igual a 100%.

Três problemas foram identificados com a abordagem da média simples. Primeiro, como cada autor utilizou critérios diferentes para atribuir pesos, as escalas

de respostas são deslocadas entre si, com diferentes médias amostrais e desvios padrões. O cálculo da média simples não fornece o tratamento devido à essas diferenças. Segundo, a normalização das escalas entre os três vetores de objetivos (fazendo com que a soma dos pesos seja necessariamente igual a 1,000) oculta a contribuição relativa de cada item para os diferentes objetivos. Por exemplo, um determinado item I_x poderia apresentar nos pesos atribuídos por especialistas, maior contribuição média para o objetivo O_m do que para O_n . Com a normalização dos pesos, a maior contribuição pode passar a ser de I_x para O_n , descaracterizando os critérios entregues pelos especialistas. E por fim, com esta abordagem, após o cálculo da média dos pesos atribuídos pelos autores, não há mais valores nulos nos vetores de pesos, ou seja, todos os itens de maturidade contribuem, em algum grau, para todos os objetivos da Indústria 4.0. Isso é uma diferença marcante do que ocorre com os fatores da Dimensão de Tecnologias e Conceitos e da Dimensão Operacional, onde grande parte dos pesos são iguais a zero.

Como em um vetor de pesos normalizado, os pesos são todos não-nulos e a somatória dos componentes do vetor somam 1,000, ele se comporta como um vetor de probabilidade. Sendo assim, para qualquer vetor de respostas dado por um respondente ao questionário, o resultado da multiplicação escalar entre os vetores resulta em uma média ponderada de todos os itens de maturidade. Nota-se que para os vetores de pesos médios normalizados, essa multiplicação se aproxima muito da média simples.

Em termos matemáticos:

Seja um vetor de pesos normalizado $pn = [pn_1, pn_2 \dots pn_i \dots pn_k] \mid$

$$pnv_i > 0 \forall i = 1, 2, \dots, k,$$

$$\text{e } \sum_{i=1}^k pn_i = 1,$$

e seja um vetor de respostas $r = [r_1, r_2 \dots r_j \dots r_k]$,

$$pn \cdot r \rightarrow \tilde{r}.$$

É interessante notar que isso ocorre independentemente de existir alguma correlação entre os pesos atribuídos. Como já foi discutido, não existem correlações fortes entre os vetores de pesos médios entre os diferentes objetivos. Ressalta-se que transformações lineares nestes vetores, como é a normalização, não alteram as correlações.

Depois de uma série de tentativas, foi desenvolvida uma abordagem para ponderação dos pesos entre autores que permite um tratamento dos problemas descritos.

Primeiramente, são calculados os z-scores dos pesos atribuídos por cada autor. O cálculo é realizado utilizando as médias e desvios padrões dos três fatores. Dessa forma, as relações dos pesos atribuídos entre fatores são mantidas.

Seja uma matriz P_k (68x3) de pesos atribuídos por um especialista consultado (k):

$$P_k = \begin{bmatrix} p_{k_{1;1}} & \cdots & p_{k_{1;3}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k_{68;1}} & \cdots & p_{k_{68;3}} \end{bmatrix}$$

Sendo cada linha representativa de um item de maturidade do modelo e cada coluna, um objetivo da Indústria 4.0. A média de todos os pesos da matriz é dada por:

$$\bar{p}_k = \frac{1}{68 * 3} \sum_{i=1}^{68} \sum_{j=1}^3 p_{k_{ij}}$$

E o desvio padrão de todos os pesos da matriz:

$$\sigma_k = \frac{1}{68 * 3} \sqrt{\sum_{i=1}^{68} \sum_{j=1}^3 (p_{k_{ij}} - \bar{p}_k)^2}$$

O valor de cada elemento da matriz após a primeira operação é:

$$p_{kz_{ij}} = \frac{p_{ij} - \bar{p}_k}{\sigma_k}$$

Agora, para cada especialista consultado (k), tem-se uma matriz de pesos normalizados por z, P_{zk} , com média dos elementos igual a zero e desvio padrão igual a 1. A primeira operação, portanto, manteve importância relativa de cada item para cada fator calculado, normalizando as médias e desvios padrões entre os especialistas consultados. Essa operação permite a comparação dos pesos em uma escala comum, independentemente da média amostral e do desvio padrão dos pesos atribuídos por cada especialista consultado. Nota-se que a normalização por z-score faz com que existam valores negativos na matriz.

$$P_{zk} = \begin{bmatrix} p_{zk_{1;1}} & \cdots & p_{zk_{1;3}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{zk_{68;1}} & \cdots & p_{zk_{68;3}} \end{bmatrix}$$

A segunda operação consiste em tirar a média dos pesos atribuídos pelos especialistas de cada item de maturidade para cada fator calculado, formando uma matriz unificada, onde cada linha representa um item de maturidade e cada coluna, um objetivo da Indústria 4.0. Como as matrizes P_{zk} possuem todas as mesmas médias e desvios padrões, as contribuições de cada especialista consultado são equivalentes.

$$p_{zm_{ij}} = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 p_{zk_{ij}}$$

Após a segunda operação, tem-se a seguinte matriz:

$$P_{zm} = \begin{bmatrix} p_{zm_{1,1}} & \cdots & p_{zm_{1,3}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{zm_{68,3}} & \cdots & p_{zm_{68,3}} \end{bmatrix}$$

A matriz P_{zm} mantém a média de todos os componentes igual a 0 (com valores negativos, necessariamente) mas a média de cada coluna deixa de ser igual a zero. O desvio padrão da matriz também deixa de ser igual a 1.

A terceira operação realizada na ponderação dos pesos, é uma normalização da matriz de pesos, de tal forma que a diferença entre o peso máximo e o peso mínimo seja igual a 1, da seguinte forma:

$$\delta_{zm} = P_{zm(max)} - P_{zm(min)}$$

$$p_{zmn_{ij}} = \frac{p_{zm_{ij}}}{\delta}$$

Após a terceira operação, tem-se a matriz P_{zmn} , que possui média igual a 0, apresentando valores negativos. Cada linha continua sendo relacionada com um item de maturidade e cada coluna, com um objetivo da Indústria 4.0.

A quarta operação consiste em deslocar todos os valores da matriz de forma que o peso mínimo seja igual a 0 e o peso máximo, igual a 1.

$$p_{zmn_{dij}} = p_{zmn_{ij}} - p_{zmn(min)}$$

A quinta, e última operação, é a contração dos pesos, pivotados em zero, de forma que a soma de todos os pesos da matriz seja igual a 1,000. Isso é obtido dividindo cada termo da matriz $P_{zmn_{dij}}$ pela soma de todos os termos da matriz.

$$s = \sum_{i=1}^{68} \sum_{j=1}^3 p_{zmn_{dij}}$$

$$\tilde{p}_{ij} = \frac{p_{zmn d_{ij}}}{s}$$

Nesta formulação, a somatória dos pesos referente a um Objetivo da Indústria 4.0 não é igual a dos demais. Veja na Tabela 2.

Tabela 2 - Somatória de pesos por Objetivo da I4.0 após ponderação

	Somatória dos Pesos
Eficiência Operacional	0,3785
Integração Digital	0,3620
Individualização da Produção	0,2594
TOTAL	1,0000

Com isso, não é possível fazer as mesmas comparações entre os níveis de maturidade alcançados nos diferentes objetivos, assim como foi feito nas outras dimensões de análise.

No entanto, a formulação preserva as relações entre pesos atribuídos por cada autor de cada item para cada objetivo, normaliza as contribuições dos autores e fornece uma metodologia robusta para o cálculo do Índice de Maturidade da Indústria 4.0.

6.6.4. Definição do Índice da Maturidade

Fundamentada no exercício de atribuição de pesos para os Objetivos da Indústria 4.0, propõem-se uma definição para Índice de Maturidade da Indústria 4.0.

O Índice de Maturidade da Indústria 4.0 é indicador do nível de maturidade da implementação de tecnologias físicas e digitais nas operações internas de empresas fabricantes da construção industrializada com vista em aumentar os níveis de automação, inteligência e autonomia dos sistemas produtivos a fim de alcançar os objetivos principais da Indústria 4.0: aumento da Integração Digital, da Eficiência Operacional e da capacidade de Individualização da Produção.

Com isso, estabelece-se que o Índice de Maturidade da Indústria 4.0 é dado pela soma dos níveis de maturidade atingidos em Integração Digital, Eficiência Operacional e da Individualização da Produção.

6.7. MÉTODOS E CANAIS DE DISTRIBUIÇÃO

O alcance e influência das associações para atingir os fabricantes da cadeia produtiva da construção são instrumentais para a coleta de dados significativos para garantir a relevância da pesquisa.

A primeira associação contatada foi a ABRAMAT (Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção) em junho de 2021. Foi apresentada à ABRAMAT a ideia de fazer um Webinar sobre o tema da Indústria 4.0 e utilizar a oportunidade para divulgar o Modelo de Maturidade. A diretora técnica da ABRAMAT não só apoiou a ideia, mas também sugeriu a inclusão de mais três associações no evento: ABCIC, ABCEM e Associação de Drywall.

6.7.1. Webinar da Indústria 4.0

Após a troca de e-mails e algumas teleconferências com estas associações, com o objetivo de apresentar conceitos fundamentais da Indústria 4.0, aproximar os agentes da cadeia produtiva da construção com a academia e endossar o Modelo de Maturidade da Indústria 4.0, a ABRAMAT promoveu no dia 22 de novembro de 2021 o WEBINAR INDÚSTRIA 4.0.

O evento realizado pelo ZOOM, contou com 68 participantes das quatro associações, incluindo diretores das associações. O evento teve abertura com a Laura Marcellini, Diretora técnica da ABRAMAT. Marcellini enfatizou a importância da Indústria 4.0 como tema extremamente relevante ao setor. Substanciada pela participação na Câmara Brasileira da Indústria 4.0 liderada pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, a ABRAMAT enxerga um potencial para aplicação de tecnologias em vários pontos de interesse ao longo da cadeia produtiva com o objetivo de atender necessidades das etapas à frente na cadeia produtiva.

Após a abertura, Vinicius Moura, Diretor de Suprimentos da GERDAU, apresentou um caso de implementação de tecnologia da Indústria 4.0. Moura compartilhou informações sobre o desenvolvimento de uma ferramenta baseada em tecnologia *Blockchain* para resolver problemas de segurança operacional na gestão de materiais refratários na produção de aço. Enfatizou a importância da confiabilidade e disponibilidade de informações para prever o desempenho da produção com maior precisão.

Professor Dr. Fabiano Rogério Corrêa apresentou desenvolvimentos interessantes na construção industrializada com exemplos do *Broad Group* na China e *Sekisui House* no Japão. Os casos representam dois grandes desafios da construção industrializada: globalização e o potencial para facilmente exportar módulos de edifícios; a sustentabilidade dos processos construtivos pela redução de desperdícios e a reciclagem de componentes das edificações. Adicionalmente, o alto nível de industrialização dessas empresas demonstra como os processos estruturados em ambiente de fábrica são propícios para o avanço de tecnologias de produção e de formas de gerir a manufatura.

Um ponto essencial apresentado por Corrêa é que o alto nível de personalização para produção de casas customizadas exige muito mais trabalho de projeto, produção e balanceamento do chão de fábrica em comparação com a produção em massa. A eficiência na personalização em massa vai ser alcançada através da implementação focada de tecnologias da Indústria 4.0.

Por fim, foram apresentadas as principais tecnologias da Indústria 4.0 pelo autor do presente trabalho, de acordo com a sistematização descrita no Capítulo 3. O Modelo de Maturidade foi apresentado e endossado pelas associações no evento.

6.7.2. Coleta de Dados

O Webinar da Indústria 4.0 foi bem-sucedido em alcançar um número significativo de associados interessados no tema e de estabelecer contato do pesquisador com quatro associações importantes da cadeia produtiva da construção. No entanto, o número de associados que preencheram o Modelo de Maturidade foi baixo, gerando a necessidade de continuar o empenho na coleta de dados.

Para compor uma base de dados com número maior de contribuições, FCIs foram contatados a partir da lista de empresas associadas à ABCIC e ABCEM além de outros fabricantes previamente conhecidos por sua atuação na indústria nacional nas áreas de pré-fabricação em madeira ou construção modular. Dessa forma, de março a novembro de 2022, foram feitas inúmeras chamadas por telefone e enviados expressivo número de correspondências eletrônicas.

7. RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute as informações coletadas através do MM-FCI4.0, os resultados obtidos pelas empresas estudadas e, a partir dos dados e por meio de análise estatística, infere o Quadro de Desenvolvimento Tecnológica Industrial dos FCIs brasileiros.

7.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESPONDENTES

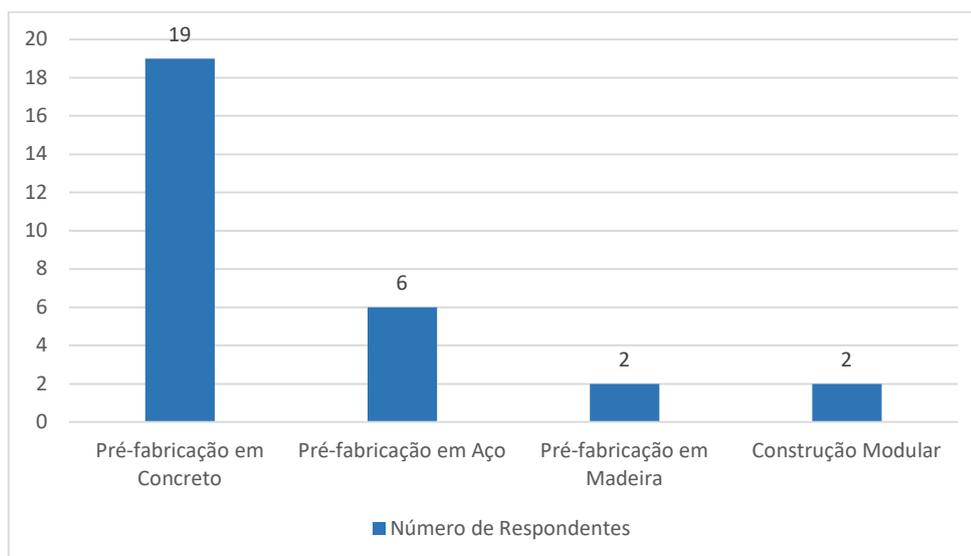
Primeiramente, é importante reconhecer que a maior parte das empresas estudadas foram identificadas a priori ou por fazer parte de uma associação, como ABRAMAT, ABCIC ou ABCEM, ou por se destacar de alguma forma na área de pré-fabricação ou construção modular. Este fato, de certo, introduz viés na pesquisa com influência significativa nos dados coletados e resultados obtidos. A amostragem aleatória de empresas teria proporcionado uma representatividade mais fidedigna do nível de maturidade do setor. Pode-se considerar, no entanto, que as empresas amostradas se encontram entre as mais avançadas do país na aplicação de tecnologias e conceitos das Indústria 4.0.

O número total de respondentes à pesquisa foi 32. Destes, dois eram de uma empresa fabricante de tubos, conexões e acessórios em PVC que deixaram de responder uma parte considerável das questões do modelo. Estas contribuições não foram incluídas na análise de resultados. Outro respondente, do setor de pré-fabricação em concreto, também foi excluído pois forneceu respostas incoerentes e incompletas. Por exemplo, indicou que mais de 75% das máquinas são controladas por TI, mas que o nível de mecanização dos processos produtivos é baixo, utilizando manuais com auxílio de ferramentas elétricas comuns de canteiro de obras. Portanto, 29 contribuições ao modelo de maturidade tiveram preenchimento completo com respostas coerentes, e por isso foram selecionadas para avaliação.

A análise dos respondentes com relação ao subsetor industrial de atuação, conforme ilustrado pelo Gráfico 3, mostra claramente que há um foco em empresas que produzem pré-fabricados em concreto. O primeiro motivo para isto é que a lista de contatos de empresas de pré-fabricados em concreto continha quase três vezes mais empresas que a lista de contatos de empresas de estruturas metálicas e mais de 7 vezes o número contatos de empresas de outros sistemas construtivos

industrializados. Adicionalmente, as empresas de concreto pré-moldado mostraram maior interesse em participar da pesquisa, criando uma tração inicial maior da pesquisa neste sentido, e criando um incentivo para continuar investigando o setor. No entanto, em tentativa a manter a fidelidade ao tema de estudo, foi feito um esforço para incluir empresas de outros setores, como fabricantes de estruturas metálicas, de pré-fabricação em madeira e de construção modular.

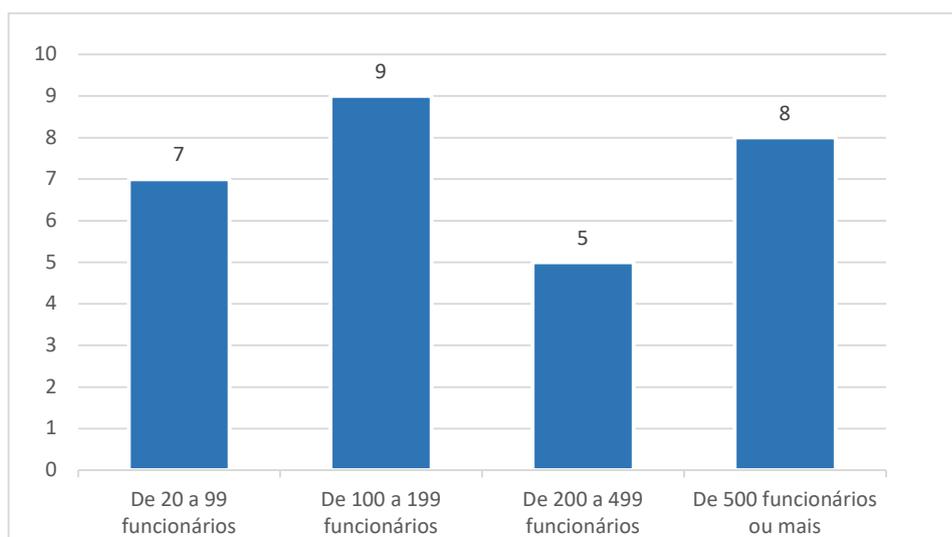
Gráfico 3 - Respondentes por subsetor de atuação



Fonte: Próprio Autor.

O número de funcionários por empresa parece demonstrar uma tendência para a distribuição uniforme, conforme ilustra o Gráfico 4.

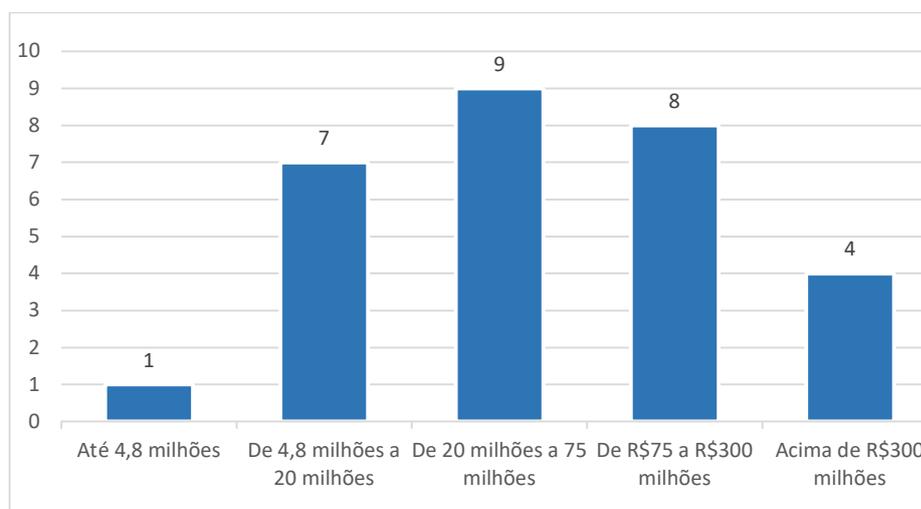
Gráfico 4 - Número de respondentes por tamanho de empresa



Fonte: Próprio Autor.

A caracterização das empresas respondentes quanto a faturamento anual mostra somente uma empresa que pode ser considerada de pequeno porte segundo a classificação do BNDES com menos de R\$4,8 milhões de faturamento anual. A maior parte das empresas respondentes se enquadram na categoria de média empresa, com faturamento anual de R\$4,8 milhões a R\$300 milhões. Quatro dos respondentes, (14%), são grandes empresas, com faturamento anual maior que R\$300 milhões (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Número de respondentes por faturamento anual



Fonte: Próprio Autor.

A caracterização das empresas respondentes quanto a faturamento anual demonstra uma distribuição bem distinta da observada para tamanho das empresas indicando que existem empresas de mesmo tamanho com categorias de faturamento distintos, como pode ser observado na Tabela de Contingência, Tabela 3.

Tabela 3 - Faturamento anual x Tamanho da empresa

Faturamento anual (R\$ milhões)	Tamanho da Empresa (Número de Funcionários)			
	20-99	100-199	200-499	500 +
R\$300 +				4
R\$75 - R\$300	1		3	4
R\$20 – R\$75		8	1	
R\$4,8 – R\$ 20	5	1	1	
– R\$4,8	1			

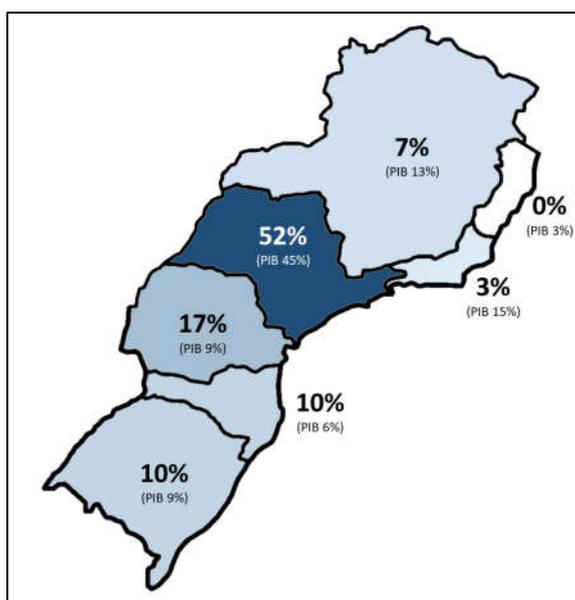
Fonte: Próprio Autor.

Através da Tabela 3, é possível notar que existe uma concentração de empresas ao longo da diagonal o que evidencia uma correlação direta entre o tamanho da empresa em termos de número de funcionários e o faturamento anual. Existem quatro empresas que se posicionam abaixo da linha de tendência, com faturamento anual abaixo do que seria esperado para a empresa devido ao seu porte.

Existe uma empresa, no entanto, que se destaca dessa tendência (ponto fora da curva), com número de funcionários na faixa de 20 a 99 e faturamento anual de R\$75 a R\$300 milhões, muito superior ao faturamento típico da categoria, de R\$4,8 a R\$20 milhões. Com o objetivo de caracterizar formalmente esta observação como outlier, foi utilizada uma regressão robusta do tipo RANSAC, que confirmou a classificação obtida visualmente.

Uma avaliação da distribuição geográfica dos respondentes mostra que pouco mais de metade foram do estado de São Paulo. Na região Sudeste do Brasil, também houve participação de empresas dos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro, faltando somente a contribuição de empresas do Espírito Santo. Os três estados da região Sul do país também foram bem representados, somando 37% das respostas. A Figura 18 mostra a distribuição de respondentes ao MM-FCI4.0 e PIB por estado das regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Figura 18 - Distribuição de respondentes e PIB por UF



Fonte: Próprio Autor.

Para avaliar a representatividade do número de respondentes neste estudo nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, decidiu-se realizar uma comparação com indicadores do nível de atividades econômicas de cada estado. A expectativa seria de encontrar uma distribuição de empresas respondentes que refletisse a distribuição de Produto Interno Bruto (PIB) nos estados. Os dados de PIB por estado foram obtidos pelo IBGE para o ano de 2019. A Figura 18 mostra a porcentagem de respondentes à pesquisa para cada estado e entre parênteses, o PIB relativo de cada estado. A escala de cores indica a concentração do número de contribuições ao modelo de maturidade por estado. Para efetuar essa avaliação, foi utilizado o teste Qui-quadrado de Pearson, apropriado para avaliar a qualidade de ajuste de uma distribuição de dados categóricos com nível de mensuração nominal. O teste mostrou boa adesão das duas distribuições. De maneira geral, considera-se que o estudo fornece uma visão representativa do quadro de desenvolvimento tecnológico nas empresas fabricantes de sistemas construtivos industrializados nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

7.2. ANÁLISE DA DIMENSÃO TECNOLÓGICA

A análise dos itens de maturidade de forma agregada, por Grupos Tecnológicos (GT) ajuda na compreensão do quadro geral, fornecendo uma visão holística da maturidade tecnológica geral de uma empresa ou setor. Ao agrupar tecnologias relacionadas e avaliar o nível de maturidade de cada grupo, é possível identificar áreas em que uma empresa ou setor é particularmente forte ou fraco em termos de adoção e implementação de novas tecnologias.

7.2.1. GT1 - Tecnologias de Projeto

O grupo de tecnologias associadas aos processos de desenvolvimento de projetos conta com oito itens de maturidade. O Fator de Maturidade é calculado pela soma dos itens de maturidade multiplicados pelos pesos identificados na Tabela 4. A somatória dos pesos é 1,0000. Cada item de maturidade do modelo pode assumir os valores 0, 25, 50, 75 e 100. Dessa forma, o maior valor para o fator de maturidade é 100. A última coluna do Quadro apresenta a média em cada item de maturidade entre as 29 empresas respondentes.

Tabela 4 - Itens de maturidade do GT1

ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I1	Softwares de desenvolvimento de projetos	0,1389	54,31
I2	Infraestrutura de rede colaboração interna projetos	0,1389	51,72
I3	Infraestrutura colaboração projetos - clientes	0,1389	46,55
I4	Infraestrutura colaboração projetos - fornecedores	0,1389	41,37
I5	Infraestrutura colaboração projetos - outros parceiros	0,1389	46,55
I6	Desenvolvimento Integrado de Produtos	0,1389	60,34
I7	Design para Manufatura e Montagem	0,1389	58,62
I42	PLM (Gerenciamento de Ciclo de Vida de Produto)	0,0278	6,90
		1,0000	50,12

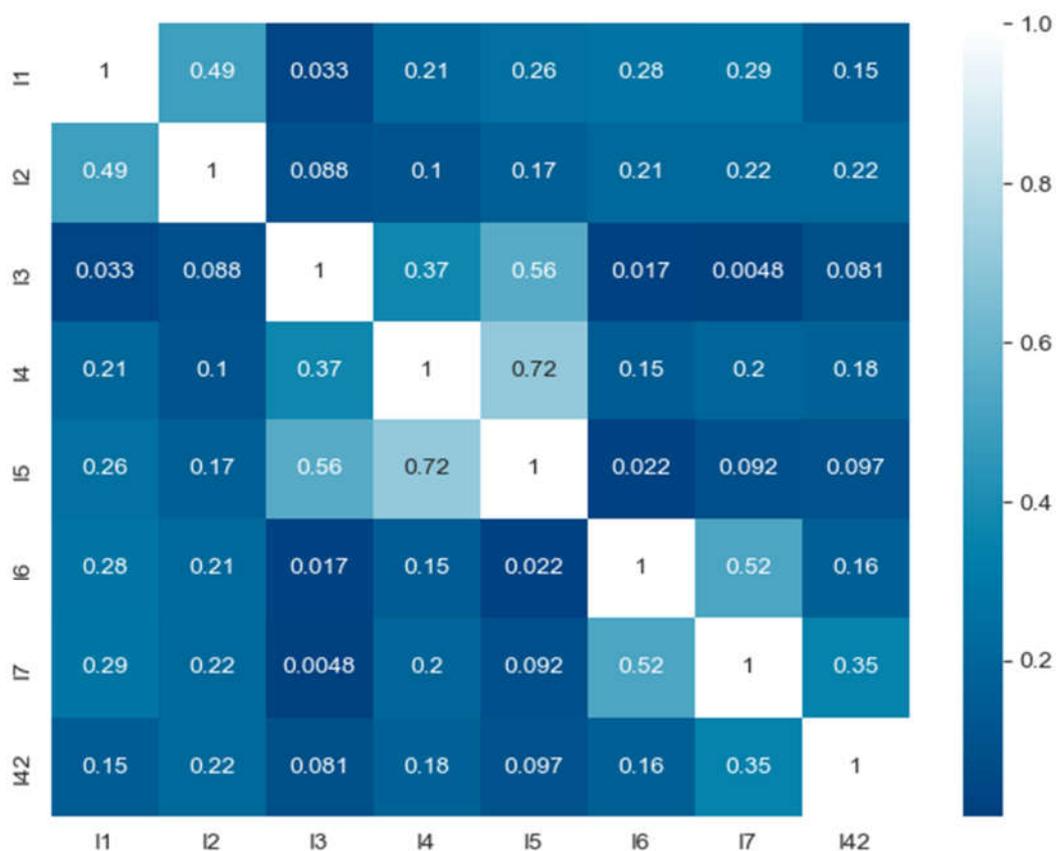
Nota-se que enquanto Desenvolvimento Integrado de Produtos e Design para Manufatura e Montagem assumem valores mais elevados, a maior parte dos itens se aproximam da média e PLM (Gerenciamento de Ciclo de Vida de Produto, do inglês, *Product Lifecycle Management*) apresenta valor muito baixo. Apesar do I42 receber peso relativo menor, a integração de BIM com funcionalidades da gestão de ciclo de vida da construção está associada a um nível mais elevado de maturidade BIM.

São estudadas as associações entre os itens de maturidade que compõem fator de maturidade do Grupo 1. Como os itens de maturidade possuem escala ordinal, utiliza-se o Tau de Kendall. A matriz de Tau de Kendall, Tabela 5, permite identificar rapidamente o grau de associação entre diversas variáveis simultaneamente.

Nota-se que a maior parte das associações assumem valores baixos. São encontradas algumas associações mais fortes como entre a infraestrutura de rede para colaboração interna em projetos e os softwares de desenvolvimento de projetos (I1-I2). Os níveis de desenvolvimento reduzidos da infraestrutura para colaboração em projetos tanto com parceiros quanto com clientes ou fornecedores (I3-I5 e I4-I5) também resultam em um alto valor de Tau de Kendall. Uma associação interessante que aparece é entre Desenvolvimento Integrado de Produtos (IPD) e projeto para fabricação e montagem (DfMA, do inglês, *Design for Manufacturing and Assembly*)

(I6-I7). Essa correlação era esperada pois ambos os conceitos se concentram em melhorar a eficiência e a eficácia do processo de projeto e produção, considerando vários fatores que podem impactar essas áreas. Os demais itens apresentam baixos níveis de associação.

Tabela 5 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT1



Fonte: Próprio Autor.

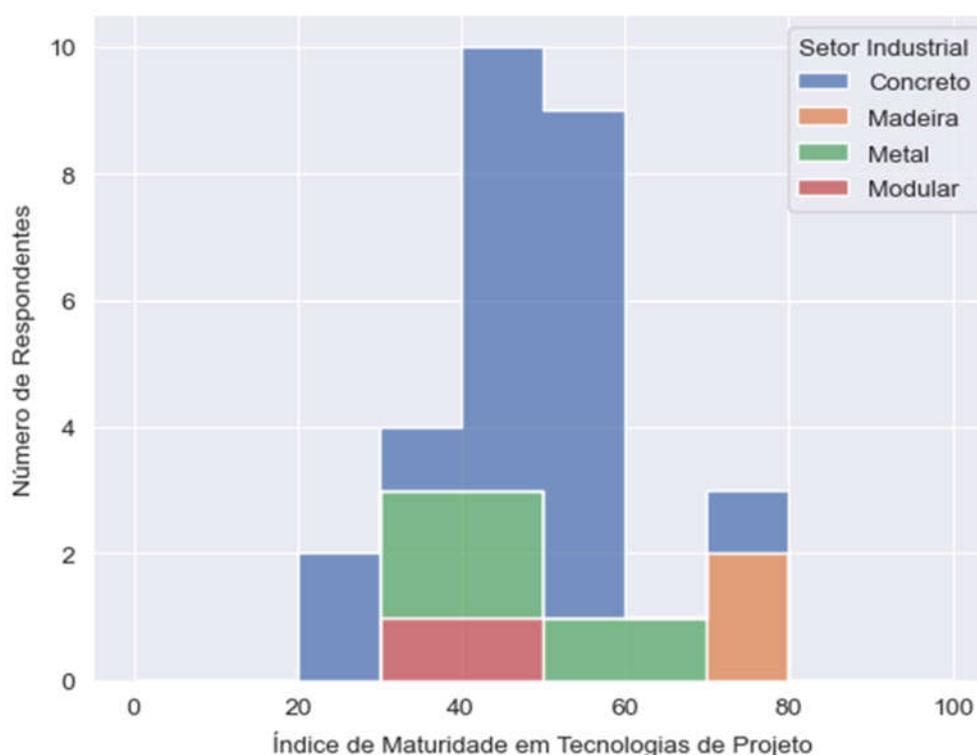
A distribuição do Fator de Maturidade do GT1 de tecnologias e conceitos associados ao desenvolvimento de projetos, é mostrada no Gráfico 6, fazendo distinção dos respondentes por setor industrial.

A partir dos dados calcula-se a média geral em 50,12, o desvio padrão em 13,56. Nota-se que as empresas de construção modular se encontram agrupadas com valores relativamente baixos. Entre as três empresas com maiores níveis de maturidade em tecnologias e conceitos associados a projeto, duas são de pré-fabricação em madeira e a terceira, uma empresa de concreto pré-moldado.

Apesar dos fabricantes de concreto pré-moldado apresentarem maior variância nos valores assumidos para este fator de maturidade em comparação com as empresas de estruturas metálicas, ambos têm média em 50.

É interessante destacar que as únicas duas empresas que assinalaram possuir sistema PLM estão entre as empresas que alcançaram maiores níveis neste fator de maturidade. Este resultado está coerente com o conceito da aplicabilidade mais ampla de BIM para gestão do projeto, construção e operação da construção em todo o seu ciclo de vida, associado a um nível de maturidade avançado de BIM.

Gráfico 6 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT1



Fonte: Próprio Autor.

Enquanto é possível observar nos dados coletados, níveis máximos em alguns dos itens relevantes ao desenvolvimento de projetos, há uma lacuna nítida na infraestrutura para colaboração com clientes, fornecedores e parceiros externos. Isso destaca o atraso na implementação de BIM interorganizacional e a necessidade de as empresas continuarem investindo e aprimorando suas ferramentas e processos de colaboração para realizar o potencial de BIM e promover maior integração da cadeia produtiva no processo desenvolvimento de projetos.

Com o objetivo de realizar uma inferência dos resultados amostrais para a caracterização formal da pré-fabricação e construção modular nas regiões do Sul e Sudeste do Brasil, utiliza-se a distribuição t de Student. A distribuição t de Student é apropriada para o cálculo do nível de confiança de uma amostra para representar uma determinada característica populacional quando se não conhece a variância populacional ou quando a amostra é pequena. O intervalo de confiança é dado pela expressão:

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Onde:

\bar{x} : média amostral

s: desvio padrão da amostra

n: número de observações na amostra

t: valor-t

A aplicação do teste-t para o fator de maturidade de desenvolvimento de projeto é indicado na Tabela 6.

Tabela 6 - Intervalo de confiança da média populacional do índice de maturidade em GT1

Distribuição t de Student		
Nível de confiança	95%	45 a 55
\bar{x}	50,12	
s	13,56	
n	29	
df	28	
t	2,048	

O cálculo efetuado sobre os dados coletados mostra que há uma probabilidade 95% da média populacional real do fator de maturidade em desenvolvimento de projetos cair neste intervalo: de 45 e 55.

7.2.2. GT2 – Máquinas de Produção

O Grupo 2 é o grupo de tecnologias associadas a ativos físicos de produção instalados no chão de fábrica, incluindo máquinas comuns, máquinas automatizadas, máquinas com capacidade de receber comandos numéricos e robôs industriais.

Os pesos atribuídos a cada item de maturidade e a média obtida em cada um estão indicados na Tabela 7 assim como as médias calculadas a partir das respostas coletadas.

Tabela 7 - Itens de maturidade do GT2

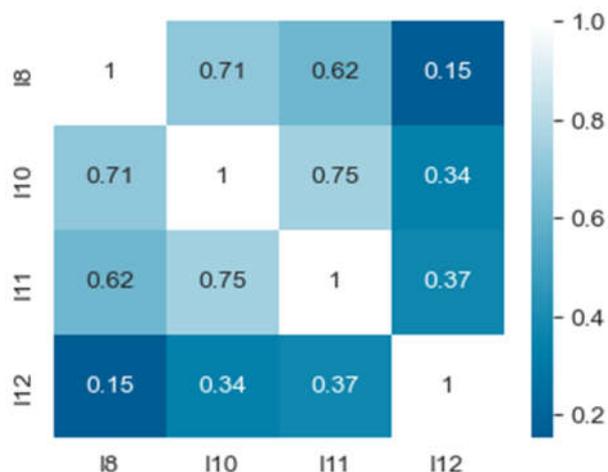
ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I8	Mecanização	0,2500	58,62
I10	Automação	0,2500	50,86
I11	Máquinas controladas por comandos numéricos	0,2500	37,07
I12	Robótica	0,2500	18,10
		1,0000	40,95

É interessante notar que o nível de maturidade médio alcançado nos itens deste agrupamento de tecnologias é decrescente com o nível de avanço da tecnologia descrita.

A mecanização descrita no I8 recebe 58,62 de média e está associada aos primeiros estágios da revolução industrial nos quais houve a transferência do trabalho manual para o trabalho mecanizado e a evolução da fonte energética de vapor para eletricidade. A automação, I10, obteve média 50,86. Na atualidade, automação é quase sinônima com o uso de computadores e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), entretanto já existiam diversos sistemas mecânicos e elétricos que automatizavam uma variedade de processos de fabricação que em muito precederam a revolução digital. Máquinas controladas por comandos numéricos aparecem com 37,07 e robótica com 18,10; representam níveis de evolução tecnológica superiores.

As associações entre os itens de maturidade que compõem fator de maturidade do Grupo 2 são evidenciadas pela matriz de Tau de Kendall na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT2



Fonte: Próprio Autor.

Existe uma forte associação positiva entre os níveis de mecanização I8 e automação I10 nas empresas estudadas com Tau de Kendall calculado em 0,71 e com valor p $7,3e-06$, indicando que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa, ou seja, a probabilidade de obter o resultado aleatoriamente é muito baixa.

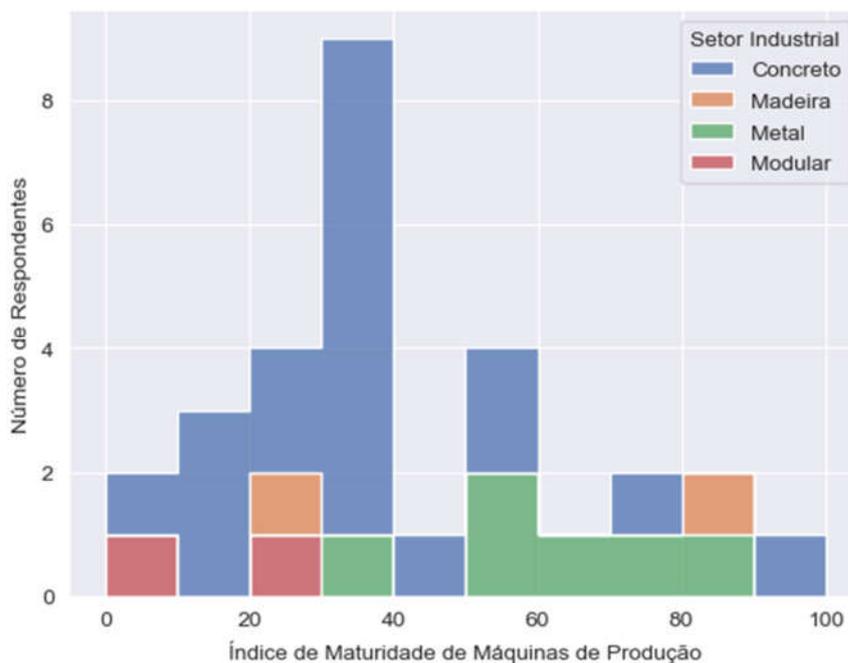
Outra associação positiva forte foi encontrada entre a automação I10 e máquinas controladas por comandos numéricos I11, com Tau de Kendall 0,75 e valor p $1,4e-06$.

É importante notar que o Tau de Kendall mede associação, não causalidade e também não leva em consideração a magnitude da diferença entre os valores, apenas a direção da diferença (ou seja, se os valores estão aumentando ou diminuindo juntos). No entanto, como hipótese, é possível que a maior parte do maquinário instalado seja automatizada e que tenha capacidade de programação numérica. Análise mais aprofundada seria necessária para estabelecer o vínculo causal.

A implementação de robótica industrial nestas empresas se distancia dos demais pontos investigados. Apesar de 10 das 29 empresas (34%) estudadas possuírem alguma implementação de robótica, não há indicação de uma associação positiva com o nível de mecanização, automação ou uso de máquinas que trabalhem com comandos numéricos.

O Gráfico 7 apresenta a distribuição de Índice de Maturidade do Grupo 2 de tecnologias e conceitos associados a ativos físicos de produção instalados no chão de fábrica, com discernimento dos setores industriais indicados com cores diferentes.

Gráfico 7 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT2



Fonte: Próprio Autor.

Uma observação que se destaca no gráfico é que as empresas de pré-fabricação em madeira, que se encontravam juntas quando analisadas sob a ótica de tecnologias de projeto, estão distanciadas por mais de 50 pontos no que tange a maturidade dos equipamentos de produção. Essa diferença chama a atenção porque, a partir de outras fontes a respeito dos processos internos dessas duas empresas, a disparidade nesta proporção não seria esperada. A presente observação sugere a possibilidade de vieses nos dados decorrentes do processo de coleta, já que a interpretação dada a cada questão pelo respondente é um fator determinante nesse processo.

Outra observação resultante do exame dos dados é que as empresas fabricantes de estruturas metálicas se destacam no nível de maturidade dos equipamentos de produção com relação aos fabricantes de concreto pré-moldado. Formalizando esta observação através do teste t, pode-se afirmar com 95% de confiança que a média deste fator para empresas de estruturas metálicas está entre 42 e 81 enquanto para as empresas de concreto pré-moldado, está entre 26 e 46. Existe uma pequena sobreposição dos dois intervalos de confiança encontrados. Se o teste for refeito com 90% de confiança, os intervalos são estreitados para 46 a 77 e 27 a 44, respectivamente. Dessa forma, pode-se concluir com 90% de confiança, de que o

nível de maturidade das empresas de estruturas metálicas neste fator é superior ao nível das empresas de concreto pré-moldado.

Através do mesmo método, teste-t de Student, é possível fazer inferências sobre o quadro geral da indústria no que se refere ao nível de maturidade dos equipamentos instalados a partir dos dados amostrais. O cálculo efetuado sobre os dados coletados mostra que há uma probabilidade 95% da média populacional real do fator de maturidade em desenvolvimento de projetos cair neste intervalo: de 31 e 50. Portanto, é possível afirmar que há uma significativa oportunidade para melhorar o estado atual da tecnologia utilizada em equipamentos de produção em fábricas que se dedicam à pré-fabricação no setor da construção civil.

7.2.3. GT3 - Redes Industriais

O Grupo 3 de tecnologias descreve redes industriais e a infraestrutura de comunicação e transmissão de dados que viabiliza a Internet das Coisas.

A Tabela 9 apresenta a lista de itens que compõem este Fator de Maturidade, os pesos associados e as médias obtidas entre as empresas estudadas.

Tabela 9 - Itens de maturidade do GT3

ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I9	Fornecimento instruções de produção a funcionários	0,0847	20,69
I13	Equipamento com sensores	0,0424	21,55
I18	Rede industrial	0,0847	15,52
I19	Máquinas controladas por TI – funcionalidade atual	0,0847	33,62
I20	Máquinas - comunicação sem fio	0,0847	17,24
I21	Máquinas - comunicação pela internet	0,0847	24,14
I22	Máquinas - comunicação com outras máquinas	0,0847	16,38
I23	Interoperabilidade entre máquinas	0,0847	12,93
I24	Máquinas controladas por TI – adaptabilidade	0,0424	32,76
I25	Máquinas - comunicação sem fio - adaptabilidade	0,0424	21,55
I26	Máquinas comunicação pela internet - adaptabilidade	0,0424	25,86
I27	Comunicação entre máquinas - adaptabilidade	0,0424	17,24
I28	Interoperabilidade entre máquinas - adaptabilidade	0,0424	14,66
I39	SCADA	0,0254	10,34
I62	Integração de TI com clientes	0,0424	25,86
I63	Integração de TI com fornecedores	0,0424	20,69
I64	Integração de TI com parceiros	0,0424	24,14
		1.0000	20,83

Entre os itens que receberam maior média de respostas (33,62) estão I19 que aborda a porcentagem atual dos equipamentos de produção que podem ser controlados por TI e I24, que trata da adaptabilidade de máquinas para operarem esta mesma funcionalidade. O item desta listagem com menor resultado, é a presença de SCADA (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados).

Setenta e dois por cento das empresas (21/29) indicaram não possuir nenhum tipo de rede industrial, abordado pelo item I18. Vinte e quatro por cento (7/29) respondeu possuir rede de comunicação industrial com fio como ControlNet, DeviceNet, HART ou Profibus. Somente uma empresa, de estruturas metálicas, respondeu que possui uma rede de comunicação industrial sem fio resiliente, de alta confiabilidade e baixa latência para monitoramento e controle de processos automatizados de fabricação. Confirmando esta informação, esta mesma empresa respondeu que possui máquinas com sensores e capacidade de processar e comunicar dados de produção em 50% a 75% das etapas de produção, além de mesmas porcentagens dos equipamentos que podem ser controlados por TI, podem se comunicar através de redes sem fio, pela internet e com outras máquinas.

Os itens de maturidade aninhados I19 a I23, que tratam sobre funcionalidades de comunicação do maquinário instalado, são apresentados dentro de uma única questão no Formulário Google e possuem valores elevados de associação entre si, com Tau de Kendall acima de 0,52. Semelhantemente, itens de maturidade aninhados I24 a I28 que tratam sobre a adaptabilidade de máquinas para que sejam capazes de comunicação por diferentes protocolos, também possuem valores relativamente elevados de associação entre si.

Fora deste conjunto de itens aninhados que tratam de aspectos muitos semelhantes das capacidades de comunicação das máquinas, também existem outras associações relevantes entre outros itens de maturidade. O alto valor de Tau de Kendall entre I9 e I19 sugere que à medida que a porcentagem de máquinas controladas por TI aumenta, há um avanço correspondente na maneira como parâmetros de produção são entregues a funcionários no chão de fábrica. Este resultado pode ser interpretado como um sinal de que o uso de tecnologia de informação avançada no controle de máquinas está tendo um impacto positivo na capacidade dos funcionários da oficina de acessar e usar informações de produção. A mesma percepção pode ser obtida pela observação da correspondência entre I9 e

I20, que mensura a penetração de tecnologias sem fio para comunicação com o maquinário do ambiente fabril.

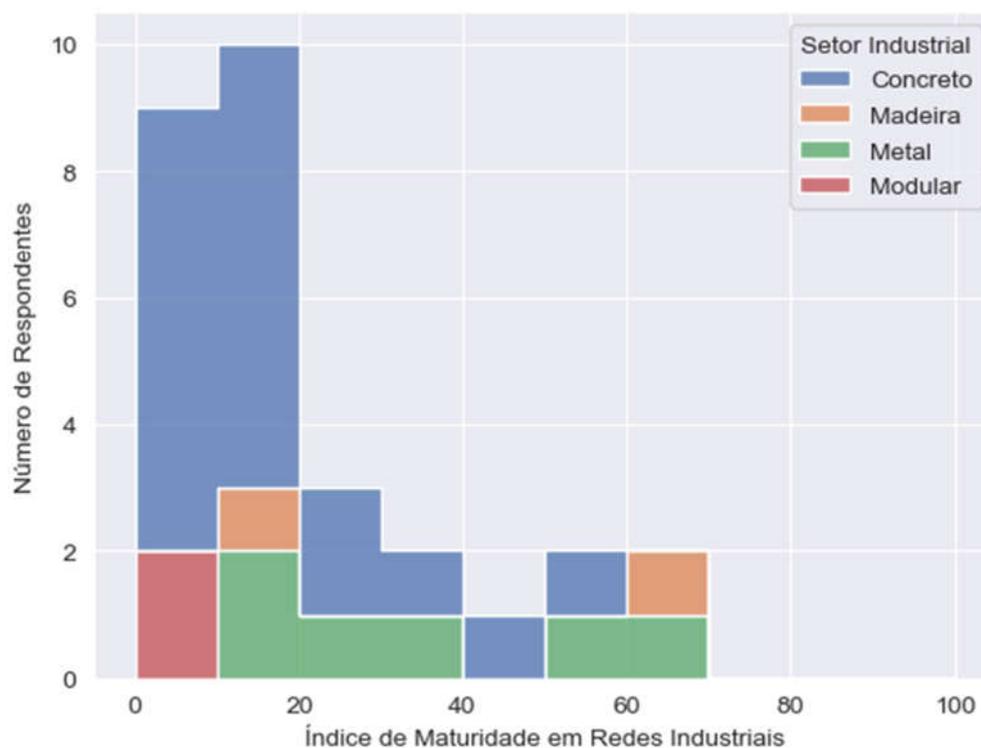
É importante ressaltar que o modelo possui uma série de redundâncias. O item I13, por exemplo, avalia a capacidade do equipamento de produção para adquirir, processar e comunicar dados ao passo que os itens I19 a I23 abordam aspectos relacionados como a capacidade de ser controlado por TI, de se comunicar através de redes sem fio, pela internet, ou com outras máquinas. Existem sobreposições entre as funcionalidades tratadas, no entanto, as definições dos conceitos não são idênticas. Altos valores de correlação seriam esperados entre esses itens de maturidade, e foram de fato encontrados.

Pela análise da matriz de correlações, foram encontradas duas associações fortes que não tinham sido antecipadas: entre I19 e I64 e entre I22 e I64. Isso sugere que, à medida que aumenta a porcentagem de máquinas controladas pela tecnologia da informação e a porcentagem de máquinas com capacidade de comunicação com outras máquinas, há uma tendência de ocorrer aumento correspondente no nível de integração com os parceiros de fabricação.

O item I39 representa a utilização de sistemas SCADA, e a sua baixa associação com os demais itens reflete o baixo nível de penetração entre empresas fabricantes da construção industrializada. O item I18, já discutido, trata da presença e maturidade das redes industriais. O exame dos dados mostra que dez empresas que possuem máquinas com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação de dados não possuem nenhum tipo de rede industrial, o que sugere que provavelmente não tenham integrada totalmente esses recursos em seu processo geral de fabricação com um sistema para que os equipamentos se comuniquem e compartilhem os dados que estão capturando. Este resultado é bem característico do que se denomina “ilhas de automação”, uma situação em que há disparidade entre o nível de automação elevado em equipamentos específicos ou determinadas etapas do processo produtivo, mas não ocorre a integração entre etapas ou mesmo entre o processo produtivo e a gestão da manufatura.

A distribuição do nível de maturidade encontrado para o GT3 pode ser observado Gráfico 8.

Gráfico 8 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT3



Fonte: Próprio Autor.

Há uma grande concentração de respondentes situados entre 0 e 20, principalmente entre fabricantes de concreto pré-moldado e empresas de construção modular, o que corresponde a níveis muito baixos de maturidade no que se refere a redes industriais e capacidade de comunicação de dados. Há, no entanto, uma distribuição mais uniforme entre fabricantes de estruturas metálicas, com menor concentração em níveis de maturidade baixos, apresentando nível de maturidade média superior à encontrada em empresas fabricantes de concreto pré-moldado. Concordando com este resultado, observa-se que dentre as quatro empresas com maior nível de maturidade no Grupo 3 de tecnologias, duas são de estruturas metálicas, uma de concreto pré-moldado e uma, com o maior resultado, de pré-fabricação em madeira.

O resultado geral alcançou média de 20,83 com desvio padrão de 19,20. A inferência para o quadro geral da indústria na região de estudo pelo teste-t de Student permite inferir que há uma probabilidade 95% da média populacional real do fator de maturidade em redes industriais cair no intervalo de 14 a 28, indicando uma lacuna significativa na integração digital do chão de fábrica.

7.2.4. GT4 - Sensores

O Grupo 4 de tecnologias compreende sensores e tecnologias de identificação. A Tabela 10 apresenta a lista de itens que compõem este Fator de Maturidade da Dimensão Tecnológica, os pesos associados e as médias obtidas entre as empresas estudadas.

Tabela 10 - Itens de maturidade do GT4

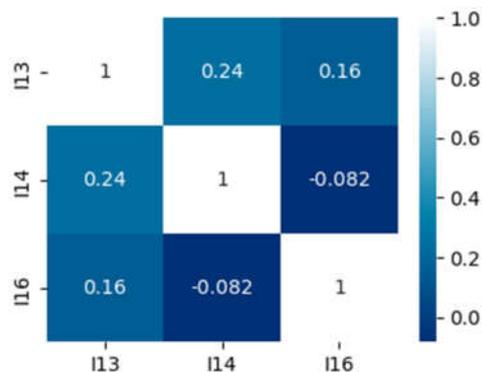
ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I13	Equipamento com sensores	0,2000	21,55
I14	Tecnologias de identificação para rastrear ativos	0,4000	31,03
I16	Sensores para qualidade	0,4000	10,34
		1,0000	20,86

Este Fator de que compõem a Dimensão Tecnológica de análise é, por sua vez, composto por três itens de maturidade. Nota-se pela Tabela 10 que o item de maturidade com maior média é o item I14, com 31,03. Entre os fabricantes de concreto pré-moldado, 14 dos 19 respondentes indicaram que utilizam alguma tecnologia de identificação, destacando-se o uso de QR-Code, e com somente uma observação do uso de RFID. Já entre os fabricantes de estruturas metálicas, dois indicaram utilizar RFID, dois QR-Code, e os últimos dois, nenhuma tecnologia de identificação.

O item I16, que aborda o uso de sensores para monitorar qualidade da produção. Uma grande variedade de tipos de sensores e pontos de aplicação podem ser mencionados. Sensores de temperatura podem ser usados para observar o calor de hidratação no processo de cura do concreto, ou da temperatura no processo de solda de estruturas metálicas. Sensores de deformação (*strain gages*) podem ser utilizados nos processos de fabricação de elementos pré-fabricados para verificar níveis de deformações e inferir os níveis sofridos de tensões, independentemente do sistema construtivo. Sensores de vibração podem auxiliar no acompanhamento da vibração do concreto. Sensores de umidade podem ser usados nas estufas utilizadas para armazenar a madeira ou para controlar a cura de elementos de concreto pré-moldado. São muitas as aplicações potenciais, no entanto, apesar disso, menos de 20% das empresas participantes do estudo indicaram algum nível de adoção de sensores para dar suporte nos processos de controle de qualidade, contribuindo para reduzir o nível de maturidade geral no I16.

A Tabela 11 apresenta as correlações entre os itens de maturidade que compõem o Grupo 4 de tecnologias.

Tabela 11 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT4



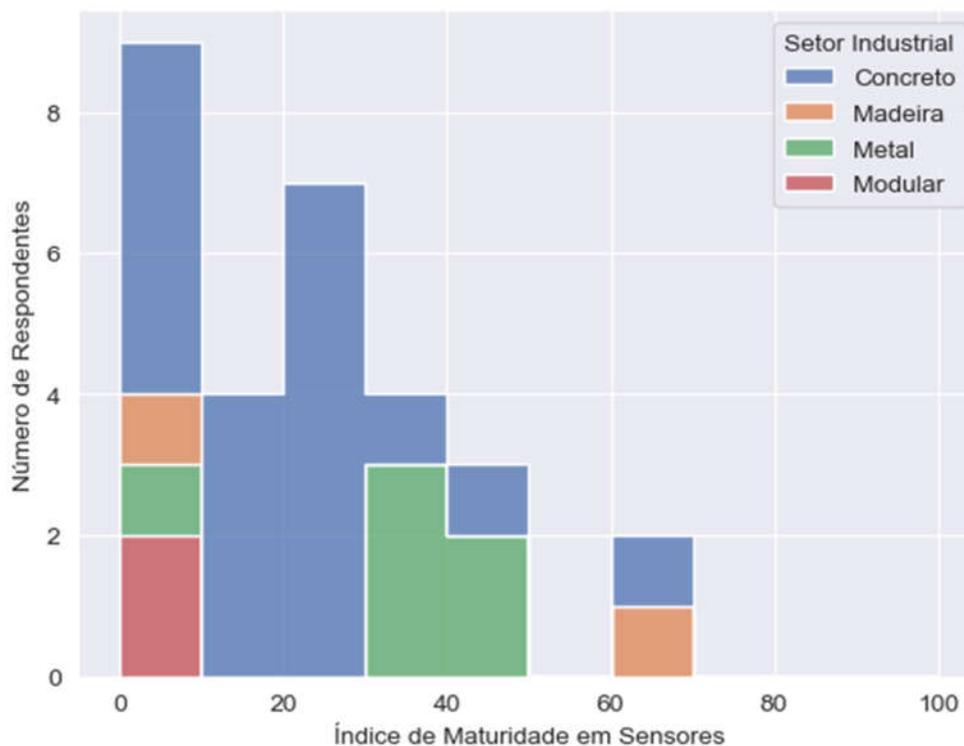
Fonte: Próprio Autor.

Em tese, os itens I16 e I13 poderiam estar relacionados, já que o I16 trata da utilização de sensores para monitorar métricas de qualidade de produção e o I13 aborda a representatividade de máquinas com capacidade de sensoriamento nos processos produtivos. No entanto, com Tau de Kendall de 0,16 e valor p de 0,35, nota-se que, estatisticamente, os conceitos são pouco relacionados. Este resultado aponta que a capacidade de sensoriamento das máquinas dos equipamentos produção não está relacionada com o sensoriamento direcionado para métricas de qualidade.

Efetivamente, os itens de maturidade do Grupo 4 de Tecnologias não possuem associações fortes entre si, ou seja, o aumento de maturidade em um determinado item não está associado ao aumento em outro.

O Gráfico 9 mostra a distribuição do nível de maturidade encontrado para o Grupo 4 da Dimensão Tecnológica.

Gráfico 9 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT4



Fonte: Próprio Autor.

Pode ser observado pelo gráfico que as empresas de estruturas metálicas se encontram agrupadas entre níveis de maturidade 30 a 50, com somente um outlier apresentando valor muito inferior. As empresas de construção modular também aparecem juntas, novamente com valores reduzidos no grau de desenvolvimento avaliado. De forma inesperada, as empresas pré-fabricantes em madeira, se posicionam em extremidades opostas do espectro observado de níveis de maturidade em sensoriamento, repetindo os desempenhos obtidos tanto em mecanização/automação quanto em redes industriais.

As únicas duas empresas que se destacam com nível de maturidade maior que 50 neste fator de maturidade, possuem perfis bem distintos entre si. Uma é fabricante de concreto pré-moldado, que atinge valores medianos na escala de maturidade para os três itens. A outra exerce a pré-fabricação em madeira, e atinge nível máximo em sensoriamento de métricas de qualidade e máquinas inteligentes de produção, mas não possui nenhum tipo de tecnologia de identificação.

A aplicação do teste-t permite a realização de inferências estatísticas para o fator de maturidade em sensoriamento e tecnologias de identificação, conforme indicado

na o Tabela 12. A interpretação dos resultados aponta que há uma probabilidade de 95% da média deste fator de maturidade entre todas as empresas pré-fabricantes no Sul e Sudeste do Brasil se situar entre 14 e 28.

Tabela 12 - Intervalo de confiança da média populacional do índice de maturidade em GT4

Distribuição t de Student		
Nível de confiança	95%	14 a 28
\bar{x}	20,86	
s	17,53	
n	29	
df	28	
t	2,048	

7.2.5. GT5 - Analítica de Dados

O Grupo 5 de tecnologias é formado por Analítica de Big Data, Aprendizado de Máquina, Inteligência Artificial, Visão Computacional. A complexidade do tema é evidenciada pela Tabela 13, que lista os 21 itens que compõem este Fator de Maturidade da Dimensão Tecnológica, os pesos associados e as médias obtidas entre as empresas estudadas.

Tabela 13 - Itens de maturidade do GT5

ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I15	Câmeras para rastrear ativos	0,0885	23,28
I17	Câmeras para monitorar qualidade	0,0885	20,69
I29	Coleta de dados - Tempo de processamento	0,0177	44,83
I30	Coleta de dados - Utilização da capacidade do equipamento.	0,0177	41,38
I31	Coleta de dados - Resíduos de produção.	0,0177	41,38
I32	Coleta de dados - Taxa de erro.	0,0177	44,83
I33	Coleta de dados - Utilização de funcionários.	0,0177	39,66
I34	Coleta de dados - Dados de posição.	0,0177	43,10
I35	Coleta de dados - Dados sobre o processamento restante.	0,0177	41,38
I36	Coleta de dados - Tempos de transição.	0,0177	36,21
I37	Coleta de dados - Eficácia geral do equipamento.	0,0177	35,34

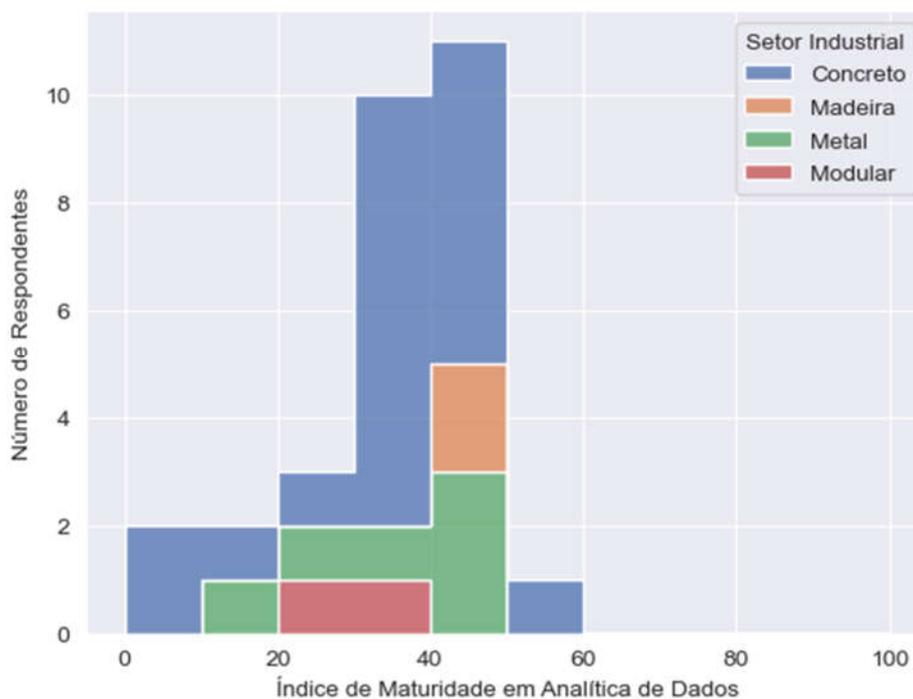
I39	SCADA	0,0177	10,34
I40	MES	0,0265	31,03
I46	Análise de dados - produtividade	0,0885	42,24
I47	Análise de dados - qualidade	0,0885	43,10
I48	Análise de dados - riscos operacionais	0,0885	40,52
I49	Análise de dados - manutenção	0,0885	39,66
I50	Análise de dados - otimização de recursos	0,0885	37,93
I51	Análise de dados - desenvolvimento de novos produtos	0,0885	38,79
I52	Simulações probabilísticas	0,0442	18,97
I53	Simulações baseadas em modelos físicos	0,0442	24,14
		1,0000	34,66

Pode ser observado que existe um conjunto de itens associados à coleta de dados provenientes de diversos processos internos, notadamente, a atividades de produção. Outro agrupamento de questões trata de análises de dados, a fim de alcançar resultados operacionais de diversas classes. Estes dois grupos de itens são os que demonstram maiores médias entre as empresas avaliadas. Semelhantemente, as empresas são indagadas sobre a prática de simulações probabilísticas (I52) e simulações baseadas em modelos físicos (I53). A visão computacional que utiliza técnicas de aprendizagem de máquina é abordada nos itens I15 e I17.

Fica muito evidente, por meio de análise das correlações entre os itens de maturidade, que existem associações altas entre itens aninhados dentro de uma mesma questão. Os altos valores de tau de Kendall entre os itens I29-I37 parecem sugerir que o aumento na coleta de dados tende a ocorrer ao longo de diversas métricas de desempenho de produção, simultaneamente. Da mesma maneira, valores altos de correlações entre os itens I46-I51 mostram que o aumento da prática de análise de dados ocorre através das diversas classes de aplicações concomitantemente. Contudo, não há evidência dessa mesma proporcionalidade entre coleta de dados e análises dos mesmos.

A distribuição do nível de maturidade encontrado para o Grupo 5 de tecnologias é mostrado no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT5



Fonte: Próprio Autor.

Os fabricantes de sistemas construtivos industrializados em madeira aparecem juntas com valores de maturidade entre 40 e 50, pouco acima da média dos respondentes. Neste Fator, as empresas de construção modular se posicionam de maneira diferente do que tenha sido observado nos Grupos Tecnológicos de 1 a 4, com índice de maturidade mais próximo da média do grupo. Apesar de que as empresas de pré-fabricados de concreto demonstrarem maior variância nos dados que as empresas de estruturas metálicas, em média, os valores de maturidade são idênticos.

A compreensão sobre o estado geral de maturidade tecnológica das empresas FCIs a partir da amostra de empresas avaliadas no estudo é realizada através da inferência estatística, utilizando o teste-t de Student. Conclui-se, com 95% de nível de confiança, que a média populacional do Fator de Maturidade associado ao Grupo 5 de tecnologias se situa entre 31 e 39.

7.2.6. GT6 - Gêmeos Digitais

Os sistemas de informação ampliam os recursos administrativos de uma empresa de manufatura, automatizando e simplificando processos, como gerenciamento de estoque e logística da cadeia de suprimentos, permitindo maior eficiência, precisão e melhor tomada de decisão. A integração entre sistemas através da utilização de um modelo único de dados e um repositório de dados centralizado permite a consistência e precisão através das operações de uma empresa de manufatura.

Integrando dados capturados por sensores em tempo real do chão de fábrica com um sistema integrado de gerenciamento de dados, torna-se possível criar um gêmeo digital, que pode ser usado para simulação, análise e monitoramento, permitindo para uma melhor tomada de decisão e maior eficiência nos processos de fabricação. O Grupo 6 de tecnologias descreve sistemas de informação e os gêmeos digitais. Os itens do modelo de maturidade que tratam dessas tecnologias são apresentados na Tabela 14, assim como os pesos correspondentes e as médias observadas nas empresas estudadas.

A primeira observação a ser feita é a extensão da lista de itens que são incluídos na análise deste conjunto de tecnologias. Trinta e dois itens de maturidade do modelo são utilizados para descrever sistemas de informação e gêmeos digitais. O conceito de gêmeos digitais abrange uma ampla gama de tópicos e tecnologias, e apresenta sobreposições com os temas tratados dos outros grupos tecnológicos estudados. Por exemplo, treze dos itens de maturidade que compõem o Grupo 6 de tecnologias também constam no Grupo 5, como as questões sobre quais dados são coletados no processo de produção, e a execução de simulações probabilísticas das operações.

Tabela 14 - Itens de maturidade do GT6

ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I19	Máquinas podem ser controladas por TI - funcionalidade atual	0,0532	33,62
I24	Máquinas podem ser controladas por TI - adaptabilidade	0,0266	32,76
I29	Coleta de dados - tempo de processamento	0,0106	44,83
I30	Coleta de dados - Utilização da capacidade do equipamento.	0,0106	41,38
I31	Coleta de dados - Resíduos de produção.	0,0106	41,38
I32	Coleta de dados - Taxa de erro.	0,0106	44,83

I33	Coleta de dados - Utilização de funcionários.	0,0106	39,66
I34	Coleta de dados - Dados de posição.	0,0106	43,10
I35	Coleta de dados - Dados sobre o processamento restante.	0,0106	41,38
I36	Coleta de dados - Tempos de transição.	0,0106	36,21
I37	Coleta de dados - Eficácia geral do equipamento.	0,0106	35,34
I38	Informações coordenadas e integradas entre sistemas	0,0532	38,79
I39	SCADA	0,0532	10,34
I40	MES	0,0532	31,03
I41	ERP	0,0532	70,69
I42	PLM	0,0532	6,90
I43	SCM	0,0532	13,79
I44	PDM	0,0532	17,24
I45	PPS	0,0532	31,03
I52	Simulações probabilísticas	0,0532	18,97
I53	Simulações baseadas em modelos físicos	0,0532	24,14
I54	Visibilidade digital - produção	0,0266	43,10
I55	Visibilidade digital - logística interna	0,0266	36,21
I56	Visibilidade digital - logística entrada	0,0266	34,48
I57	Visibilidade digital - logística saída	0,0266	41,38
I58	Rastreabilidade histórica - produção	0,0266	65,52
I59	Rastreabilidade histórica - logística interna	0,0266	60,34
I60	Rastreabilidade histórica - logística entrada	0,0266	58,62
I61	Rastreabilidade histórica - logística saída	0,0266	63,79
I62	Integração de TI com clientes	0,0266	25,86
I63	Integração de TI com fornecedores	0,0266	20,69
I64	Integração de TI com parceiros	0,0266	24,14
		1,0000	32,95

Uma matriz de correlação Tau de Kendall é usada para medir a associação ordinal entre múltiplas variáveis em um conjunto de dados. Novamente, aparecem as associações fortes entre os itens I29 a I37 que já foram discutidas no GT5.

Os itens I54 a I57 também são agrupados sob uma única questão na ferramenta de coleta, tratando de visibilidade digital em tempo real na produção e na logística interna, de entrada e de saída. São encontrados valores altos de Tau de Kendall entre os itens, indicando que um nível mais alto de visibilidade digital em uma área da cadeia produtiva e logística está associado a um nível mais alto de visibilidade digital na outra.

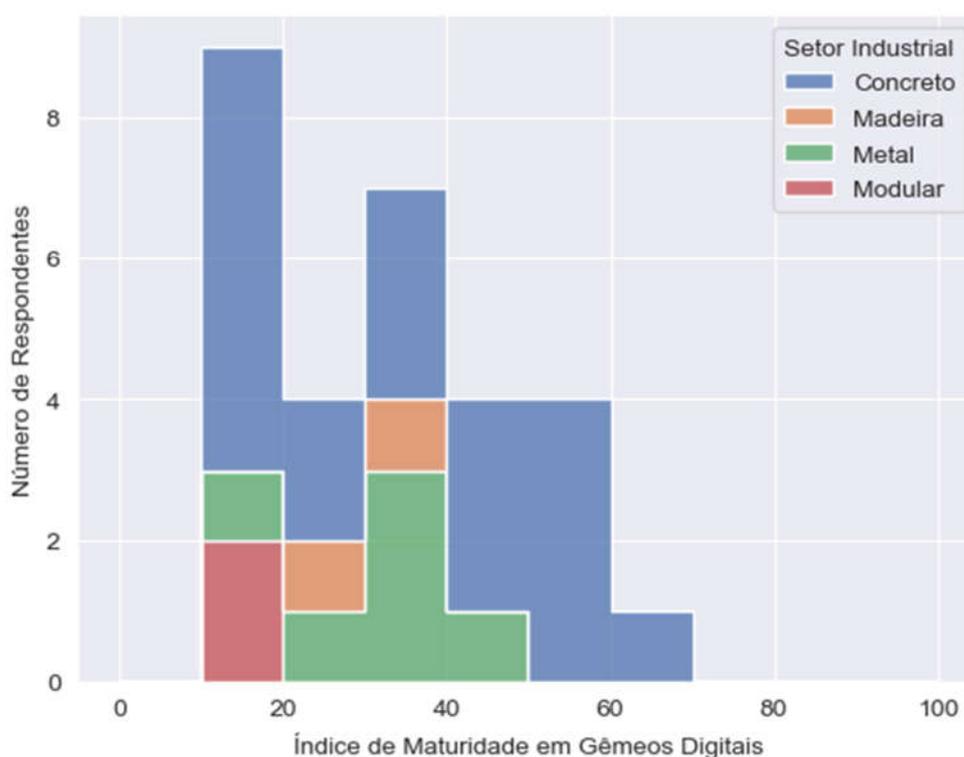
Emergindo da visibilidade digital em tempo real das operações de produção e logística está a rastreabilidade histórica digital que é abordada pelos itens I58 a I61. Novamente, aparecem agrupadas no modelo sob uma única questão tratando de dados de diferentes operações incluindo produção e logística. Esses itens de

avaliação também apresentam altos valores de correlação entre si indicando a gestão de informações históricas tende a amadurecer de forma consistente entre as diferentes áreas operacionais.

Juntos, a visibilidade digital em tempo real e a existência de uma base de dados históricos consistente fornecem uma visão abrangente de operações, permitindo que as organizações tomem decisões informadas e melhorem a eficiência. Através do exame dos dados coletados, é interessante notar que existe um nível de associação moderado, com coeficiente Tau de Kendall médio 0,43.

A distribuição do nível de maturidade encontrado para o Grupo 6 da Dimensão Tecnológica é apresentada no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT6



Fonte: Próprio Autor.

Observa-se que entre as 12 empresas melhor posicionadas neste Fator de Maturidade em Sistemas de Informação e Gêmeos Digitais, 11 são fabricantes de concreto pré-moldado. Calcula-se o intervalo de confiança de 80% para a média populacional entre 30,27 e 40,74. As empresas de estruturas metálicas amostradas apresentam média 33, com variância reduzida. Com o mesmo nível de confiança, o intervalo para a média populacional para fabricantes de estruturas metálicas se situa

entre 26,47 e 38,56. Dessa forma, não é possível afirmar que existe uma diferença significativa entre a média dos níveis de maturidade de fabricantes de concreto pré-moldado e dos fabricantes de estruturas metálicas.

O resultado geral alcançou média de 32,95 com desvio padrão amostral de 15,35. A inferência do resultado de pesquisa para o quadro geral da indústria na região de estudo demonstra, com 95% de confiabilidade, que a média do Fator de Maturidade em Sistemas de Informação e Gêmeos Digitais se situa entre 27 e 39.

7.2.7. GT7 – Sistemas de Produção Ciberfísicos

O Grupo 7 da Dimensão Tecnológica do modelo de maturidade aborda tecnologias avançadas que caracterizam a Indústria 4.0: os sistemas flexíveis de manufatura, habilidades associadas a autonomia como autorregulação e auto-otimização, e os Sistemas Ciberfísicos.

Os Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS) são capazes de se adaptarem a fim de fabricação produtos com diferentes especificações com tempo e custo mínimos. Isso é viabilizado por uma combinação de equipamentos automatizados como máquinas controladas por comandos numéricos ou por computadores, robôs e sistemas automatizados de manuseio de materiais.

Os Sistemas de Produção Ciberfísicos (CPPS) avançam o conceito de flexibilidade pela integração de capacidades mais avançadas de sensoriamento, processamento e controle. Neste contexto, o sensoriamento expande o foco além das variáveis de controle para incorporar mais parâmetros ambientais e informações de estado em tempo real de outros pontos na cadeia produtiva. O processamento em Sistemas de Produção Ciberfísicos extrapola regras de controle tradicionais pré-programadas e incorpora uma gama mais ampla de técnicas de aprendizado de máquina, bem como ciência de contexto, a fim de viabilizar o controle otimizado dos processos que se adaptam sem atrito para a fabricação sob condições customizadas.

Oito itens do modelo de maturidade definem o Grupo 7, e são apresentados na Tabela 15, assim como os pesos correspondentes e as médias calculadas nas empresas estudadas.

Tabela 15 - Itens de maturidade do GT7

ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I11	Máquinas controladas por comandos numéricos	0,1429	37,07
I12	Robótica	0,1429	18,10
I52	Simulações probabilísticas	0,0714	18,97
I53	Simulações baseadas em modelos físicos	0,0714	24,14
I65	AMHS	0,1429	2,59
I66	Ajuste flexível	0,1429	34,59
I67	M2M	0,1429	9,48
I68	Reação dinâmica e autônoma de maquinário	0,1429	13,79
		1,0000	19,60

Apesar das capacidades do Grupo 7 serem construídas sobre as competências adquiridas por todos os grupos precedentes, estes oito itens de maturidade estão mais diretamente relacionados à flexibilidade e autonomia. O item I11, que mensura a porcentagem das etapas de produção que utilizam máquinas controladas por comandos numéricos, aparece com a maior média amostral. Outro item que contribui para aumentar a média do GT7 é o I66, que diz respeito a máquinas capazes de se ajustarem flexivelmente e eficientemente para manufatura de novos produtos. Os ajustes descritos na escala de respostas do I66 não exigem nenhum tipo de automação, podendo ser, até mesmo, manuais; por isso o valor mais elevado neste item. Os itens de maturidade que reduzem significativamente o nível geral neste fator são os itens I65, I67 e I68, porque exigem, sem ambiguidade, habilidades que se aproximam mais da autorregulação, auto-otimização e outras habilidades autônomas e inteligentes. A matriz da Tabela 16 mostra os valores calculados de Tau de Kendall entre os itens do Grupo 7 de tecnologias.

Tabela 16 - Matriz de Tau de Kendall dos itens de maturidade do GT7



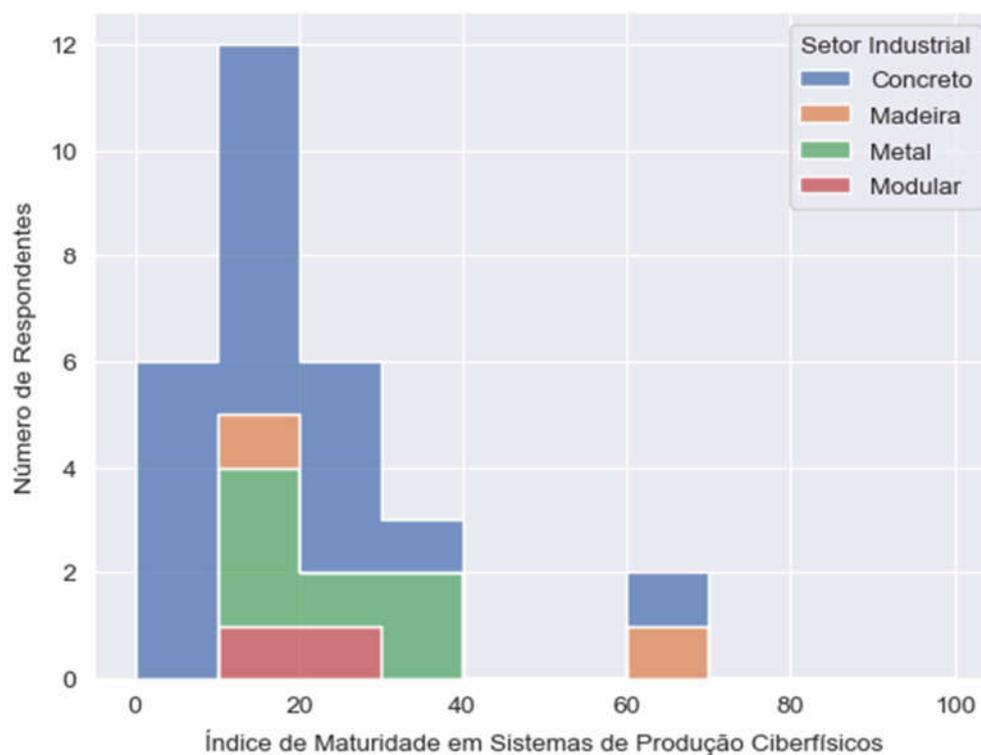
Fonte: Próprio Autor.

A única associação positiva mais forte indicada ocorre entre os itens I67 e I68 com valor Tau Kendall de 0,63. Isso significa que, à medida que aumenta a porcentagem de máquinas que podem se comunicar e ajustar suas operações, a capacidade do sistema de manufatura de reagir de forma dinâmica e eficiente também aumenta. O valor-p calculado de 0,0005 indica que há uma probabilidade muito baixa (menos de 0,05%) de que essa correlação seja devida ao acaso, indicando que a relação dos dois itens é estatisticamente significativa.

De certa forma contraditória, a difusão de máquinas controladas por comandos numéricos (I11) e robótica industrial (I12) nas operações do chão-de-fábrica não indicam associação forte com a capacidade de ajuste autônomo do sistema produtivo, tratada pelos itens I67 e I68. É mais peculiar ainda que a capacidade de ajuste flexível das máquinas para a manufatura de novos produtos (I66) encontra baixa associação com os demais itens do GT7.

A distribuição do nível de maturidade encontrado para o GT7 de tecnologias é mostrada no Gráfico 12, com a distinção dos respondentes por setor industrial.

Gráfico 12 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no GT7



Fonte: Próprio Autor.

Existe uma grande concentração de empresas com índice de maturidade entre 0 e 40, com moda entre 10 e 20. Duas empresas se destacam como claros “outliers” a essa tendência, demonstrando níveis de maturidade acima de 60 neste grupo de tecnologias: uma empresa de pré-fabricados de concreto e outra, de pré-fabricação em madeira. Ambas apresentam alta penetração de capacidades de comandos numéricos e robótica industrial além de flexibilidade e ajuste autônomo de sistema de produção.

Em média, a amostragem de fabricantes apresentou nível de maturidade neste fator de 19,60 com desvio padrão de 15,78. A inferência do resultado de pesquisa para o quadro geral da indústria na região de estudo pelo teste-t permite concluir, com 95% de nível de confiança, que a média do Fator de Maturidade em Sistemas Produtivos Flexíveis e Autônomos das empresas da região se situa entre 14 e 26.

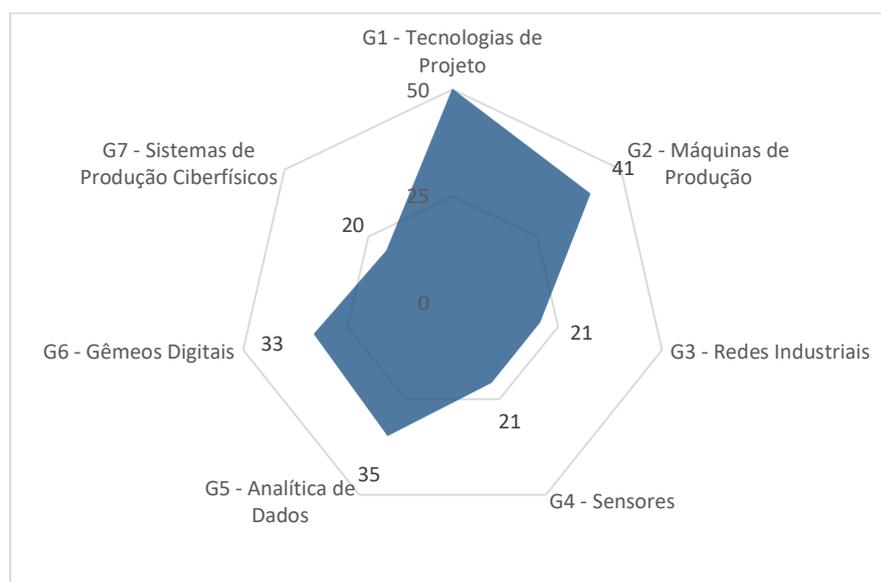
7.2.8. Análise Cruzada entre Fatores da Dimensão Tecnológica

A análise cruzada entre os Fatores da Dimensão Tecnológica (Grupos de Tecnologias), permite identificar possíveis assimetrias ou lacunas no desenvolvimento dos diferentes grupos de tecnologias que são necessários para desenvolver uma indústria que seja digitalmente integrada de forma que viabilize concomitantemente a otimização operacional e individualização da produção. O Gráfico 13 mostra um gráfico de radar que indica valores das médias amostrais para cada grupo de tecnologias analisado.

Nota-se que o grupo de tecnologias e conceitos associados ao processo de projeto se desdobra dos demais grupos, atingindo média 50 na escala de maturidade de 0 a 100. Isso demonstra que em média, BIM, a infraestrutura para colaboração em projetos, práticas de desenvolvimento integrado de projetos e padronização de diretrizes para projeto para manufatura e montagem são mais desenvolvidos que tecnologias em outros pontos da cadeia produtiva.

O grupo de tecnologias com aparece com segunda maior média amostral é o GT2, Máquinas de Produção. A interpretação da média igual a 41 é que nível de maturidade do “hardware” do chão de fábrica, dos equipamentos instalados é relativamente elevado em comparação com outros fatores analisados sob a dimensão tecnológica, mas ainda baixo com relação à escala de maturidade proposta.

Gráfico 13 - Diagrama radar das médias amostrais dos Fatores da Dimensão Tecnológica



Fonte: Próprio Autor.

Com a relativa baixa maturidade de redes industriais (GT3) e sensores (GT4) com médias mais próximas de 20, entende-se que há um prejuízo para a integração digital da cadeia produtiva, o que tem implicações diretas para o desenvolvimento de Analítica de Dados e Gêmeos Digitais. Estes, por sua vez, são os Fatores que diretamente constituem os Sistemas de Produção Ciberfísicos.

Com o objetivo de gerar uma compreensão maior das relações entre os fatores de maturidade da Dimensão de Tecnologias e Conceitos a partir dos dados coletados, propõem-se realizar uma análise de regressão linear. Diferente das variáveis dos itens de maturidade que possuem escala de medição ordinal, as variáveis calculadas por relações lineares entre os valores dos itens de maturidade possuem escala de medição de razão, ou seja, possuem um zero absoluto e permitem uma ampla gama de estatísticas descritivas e inferenciais a serem aplicadas.

A matriz de correlações de Pearson, mostrada na Tabela 17, analisada juntamente com a matriz de valores p, Tabela 18, é uma maneira mais direta de detectar a correlação entre as variáveis e verificar a significância estatística desta correlação. Observe a

Tabela 17 - Matriz de correlações de Pearson dos Fatores da Dimensão Tecnológica

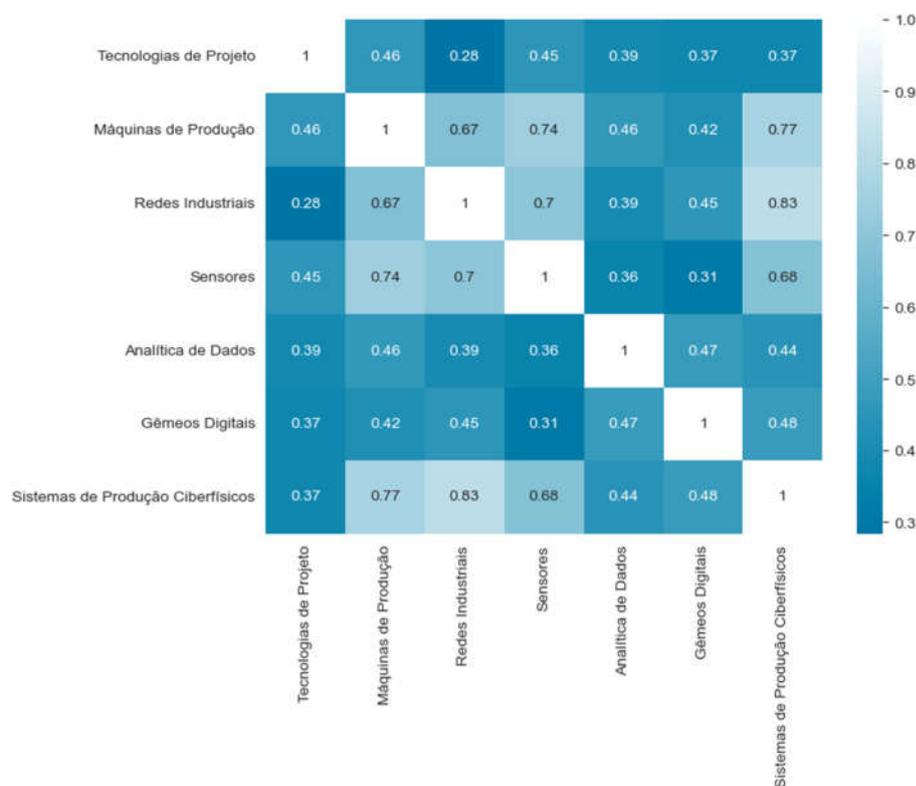
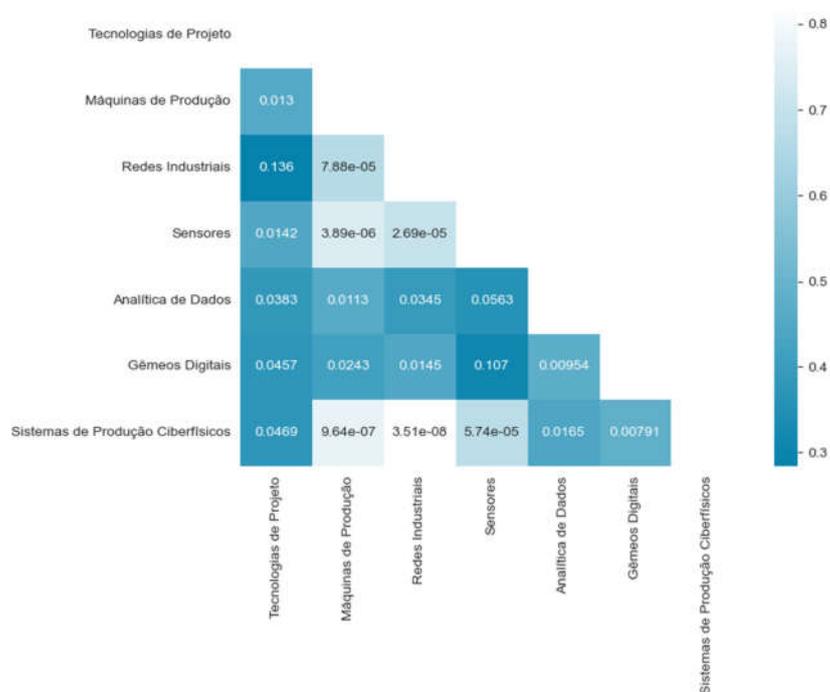


Tabela 18 - Matriz de valores-p das correlações entre os Fatores da Dimensão Tecnológica



Os valores de coeficiente de correlação de Pearson indicam que os grupos tecnológicos formados por máquinas de produção, redes industriais e sensores possuem correlação moderada a forte com Sistemas de Produção Ciberfísicos. Os valores p mostram que as correlações encontradas são estatisticamente significativas. De modo similar, correlações fortes estatisticamente significativas aparecem entre Redes Industriais e Máquinas de Produção, entre Sensores e Máquinas de Produção e entre Redes e Sensores. Apesar do fato de que a correlação e a significância não implicarem necessariamente em causalidade, nota-se um relacionamento interessante entre os fatores.

Três grupos de tecnologias são isolados desse conjunto caracterizado por correlações mais fortes entre si, apesar de possuírem semelhanças teóricas com os demais: Tecnologias de Projeto, Analítica de Dados e Gêmeos Digitais.

O próximo passo desta análise é a realização da regressão linear. Uma primeira regressão linear foi feita estabelecendo os níveis de maturidade dos Grupos Tecnológicos GT1 a GT6 como variáveis independentes (X1 a X6) e o nível de maturidade do Grupo GT7 (Y) como variável dependente. A justificativa deste modelo seria que muitos aspectos dos Sistemas de Produção Ciberfísicos dependem, em

grande parte, da culminação das capacidades tecnológicas descritas pelos demais grupos. Expressado de outra maneira, os Grupos GT1 a GT6 seriam pré-requisitos parciais para o GT7. Apesar de apresentar indicadores estatísticos satisfatórios, os coeficientes de regressão individuais das variáveis independentes demonstraram que o modelo poderia ser simplificado. Por isso, uma segunda regressão linear foi executada com somente duas variáveis independentes: os níveis de maturidade dos grupos de tecnologias GT2 e GT3. Estas variáveis foram as que demonstraram maior significância estatística para prever a variável dependente no primeiro modelo. Os resultados da análise se apresentam na Tabela 19.

Apesar de uma pequena redução do coeficiente de correlação de 0,8814 para 0,8783, o coeficiente de determinação ajustado teve uma melhora, de 0,7161 para 0,7539, devido à redução do número de variáveis preditivas. O erro padrão também caiu de 8,409 para 7,828 e o ajuste global do modelo indicado pelo valor F aumentou de 12,77 para 43,90. É interessante apontar que os coeficientes do modelo, se mantiveram praticamente constantes do primeiro modelo de regressão para o segundo, apesar da alteração do número de variáveis independentes. De modo geral, o segundo modelo apresenta ajuste superior aos dados em comparação ao modelo original.

Tabela 19 - Resumo dos resultados da segunda regressão linear

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0.8783
R-Quadrado	0.7715
R-quadrado ajustado	0.7539
Erro padrão	7.828
Observações	29

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F signif.</i>
Regressão	2	5381	2690	43.90	4.61E-09
Resíduo	26	1593	61.28		
Total	28	6975			

	<i>Coef.</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-0.3242	2.83724	-0.1142	0.909882
Variável X2	0.2501	0.07975	3.1367	0.004212
Variável X3	0.4645	0.10326	4.4989	0.000126

É importante ressaltar que as variáveis do modelo são os fatores de maturidade calculados para os grupos de tecnologias e conceitos a partir dos itens de maturidade. Somente dois itens de maturidade usados para cálculo da maturidade no grupo GT2, itens I11 e I12, também são utilizados para o cálculo da variável dependente, a maturidade no grupo GT7. Se o número de itens recorrentes no cálculo dos fatores fosse maior, seria um sinal de alerta para a colinearidade das variáveis do modelo e, assim, o modelo não seria útil para apontar relações entre os grupos tecnológicos.

Como ferramenta estatística, o modelo de regressão linear é usado para analisar a relação entre uma ou mais variáveis independentes (também conhecidas como variáveis preditivas) e uma variável dependente. A análise dos resultados da modelagem indica que os níveis de maturidade de tecnologias de projeto, analítica de dados e gêmeos digitais não são bons preditores do nível de maturidade dos Sistemas de Produção Ciberfísicos.

É importante considerar que pode haver outros fatores não incluídos no modelo de regressão linear que possam estar afetando o seu desempenho, como:

- a) Erros decorrentes do processo de coleta de dados como falhas de interpretação das questões ou escalas de respostas;
- b) Inadequações da fórmula utilizada para cálculo dos fatores de maturidade para os diferentes grupos tecnológicos a partir dos itens de maturidade;
- c) Independência de itens que compõem os CPPS conforme definidos pelo grupo de tecnologias G7 dos demais grupos do modelo de maturidade;
- d) Não linearidades subjacentes nas inter-relações dos grupos de tecnologias em que reciprocidades ou sinergias exercem papel relevante no resultado da integração ciberfísica;
- e) Possivelmente as tecnologias de projeto, analítica de dados e gêmeos digitais ainda não sejam suficientemente assimilados nas operações dos fabricantes ao ponto de viabilizar a integração ciberfísica ao longo da cadeia produtiva;
- f) Níveis baixos de desenvolvimento tecnológico em áreas chave que poderiam apresentar um limiar a partir do qual, a integração ciberfísica se torna factível.

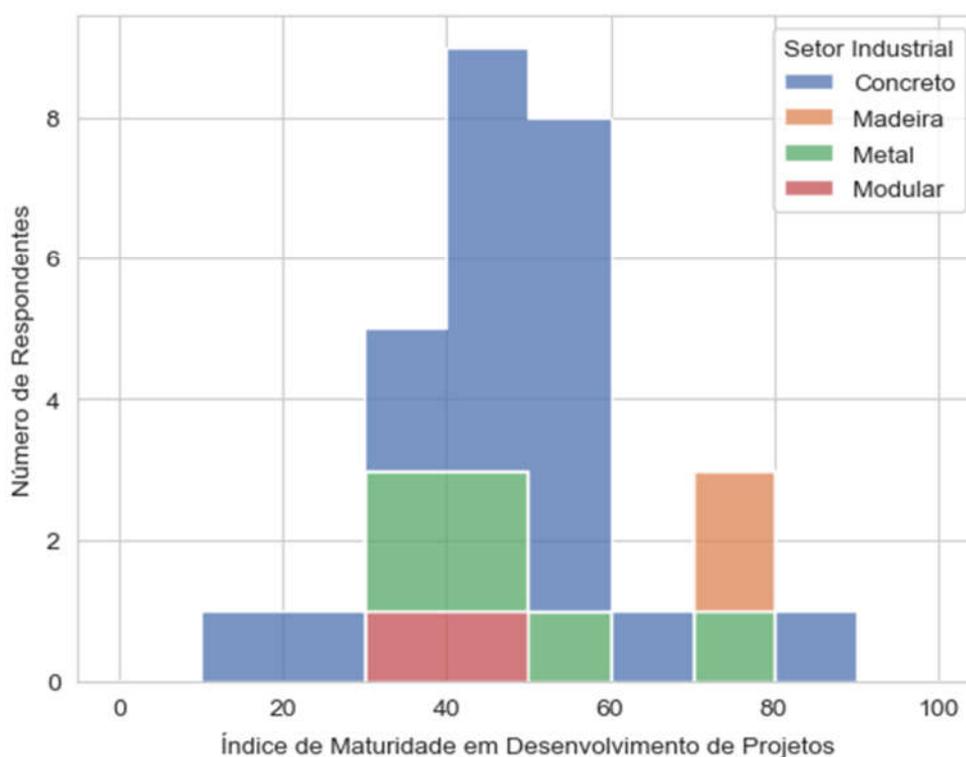
7.3. ANÁLISE DA DIMENSÃO OPERACIONAL

A Dimensão Operacional permite a visualização do nível de desenvolvimento tecnológico de um fabricante através de seus diversos processos internos, conforme discutido na Seção 6.3.2. Com a finalidade de evitar redundância e manter a concisão, o escopo desta seção é abreviado e somente os pontos diferenciais são ressaltados.

7.3.1. OP1 - Desenvolvimento de Projeto

O Fator de Maturidade Operacional Desenvolvimento de Projetos se aproxima muito do Grupo 1 – Tecnologias de Projeto da Dimensão de Tecnologias e Conceitos. A distribuição do Fator de Maturidade em Desenvolvimento de Projetos é mostrada no Gráfico 14, fazendo distinção dos respondentes por setor industrial.

Gráfico 14 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP1



Fonte: Próprio Autor.

A partir dos dados calcula-se a média geral em 50,2, o desvio padrão em 13,6. Nota-se que as empresas de construção modular se encontram próximas, e as empresas de pré-fabricação em madeira, agrupadas no mesmo intervalo, apesar de amostras reduzidas em ambas as categorias. Com a maior representatividade do

concreto pré-moldado e estruturas metálicas, também se observa a maior disparidade de resultados entre as empresas estudadas. A aplicação do teste-t para o fator de maturidade de desenvolvimento de projeto permite calcular o intervalo de 95% para a média populacional entre 44 e 55.

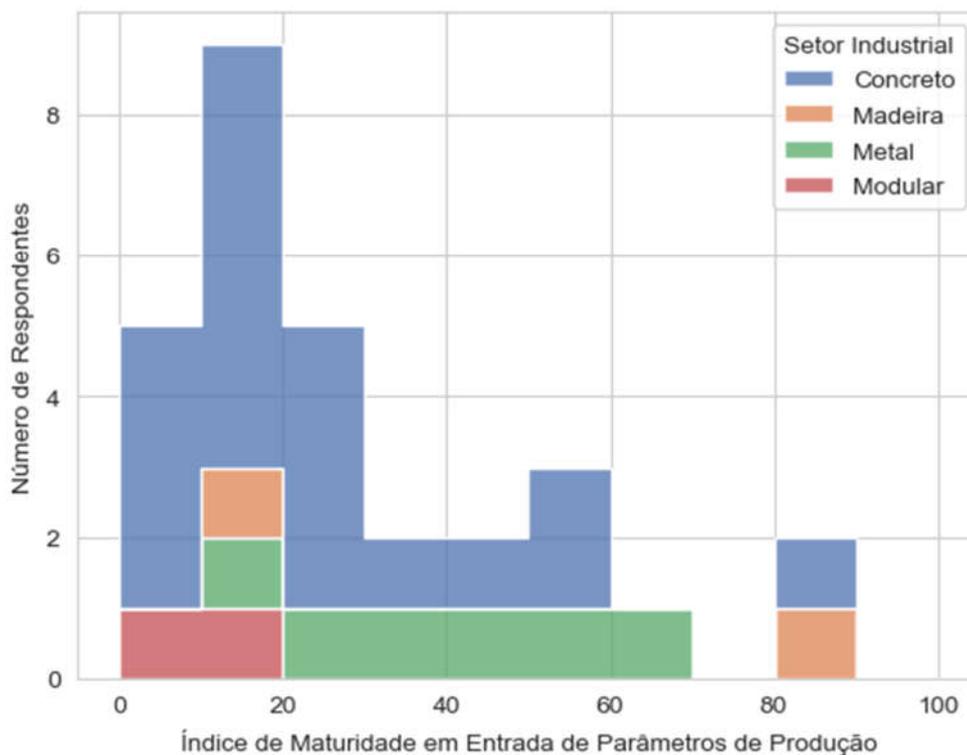
7.3.2. OP2 - Entrada de Parâmetros de Produção

O Fator de Maturidade Operacional que trata de entrada de parâmetros de produção é importante para caracterizar o fluxo de dados de informações entre projeto e produção. Entre os aspectos dessa ligação que são estudados estão o fornecimento de instruções de produção a funcionários, o uso de máquinas controladas numericamente, robótica, máquinas controladas por TI e Sistemas de Execução de Fabricação (MES).

A análise dos valores de Tau de Kendall entre os itens de maturidade de compõem o OP2 - Entrada de Parâmetros de Produção mostra relação moderada a forte entre I11 (Máquinas controladas por comandos numéricos) e I19 (Máquinas podem ser controladas por TI). Enquanto ambos os itens necessitam de alguma espécie de processamento para controlar e operar o maquinário, o comando numérico é utilizado para controlar o movimento de máquinas-ferramenta específicas tipicamente para operações de usinagem como corte, furação e fresa e sistemas de TI são tipicamente utilizados para controle e monitoramento mais abrangente de múltiplos processos de uma instalação fabril.

A distribuição do Fator de Maturidade em Entrada de Parâmetros de Produção é mostrada no Gráfico 15, fazendo distinção dos respondentes por setor industrial.

Gráfico 15 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP2



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se uma distribuição com forte obliquidade positiva, com modo primário entre 10 e 20, e secundário entre 50 e 60. A partir dos dados calcula-se a média geral em 29,62, o desvio padrão em 22,72. Nota-se que as empresas de construção modular se encontram agrupadas, mas as empresas de pré-fabricação em madeira são separadas por mais de 60 pontos na escala de 0 a 100. Mesmo as empresas de estruturas metálicas, apesar de possuírem maior representatividade na amostra, se distribuem uniformemente ao longo deste fator de maturidade, entre 10 e 60. Existe, no entanto uma concentração de respondentes na faixa de 0 a 30 e, principalmente, entre 10 e 20.

Somente três empresas atingiram fator de maturidade Entrada de Parâmetros de Produção acima de 60, sendo uma de estruturas metálicas, uma de pré-fabricação em concreto e uma de madeira. Estas três empresas, em média, se destacam da média das empresas estudadas em todos os itens que compõem este fator de maturidade menos em Sistemas de Execução de Fabricação (MES), sendo implementado somente por uma destas empresas de maior desempenho.

A Tabela 20 apresenta a média calculada para cada item de maturidade que compõem o Fator de Maturidade Entrada de Parâmetros de Produção. Nota-se que os dois itens que reduzem a maturidade são associados a robótica e ao fornecimento de instruções de produção a funcionários enquanto a presença maior de máquinas controladas por comandos numéricos auxilia no aumento do Fator de Maturidade.

Tabela 20 - Médias dos itens de maturidade do OP2

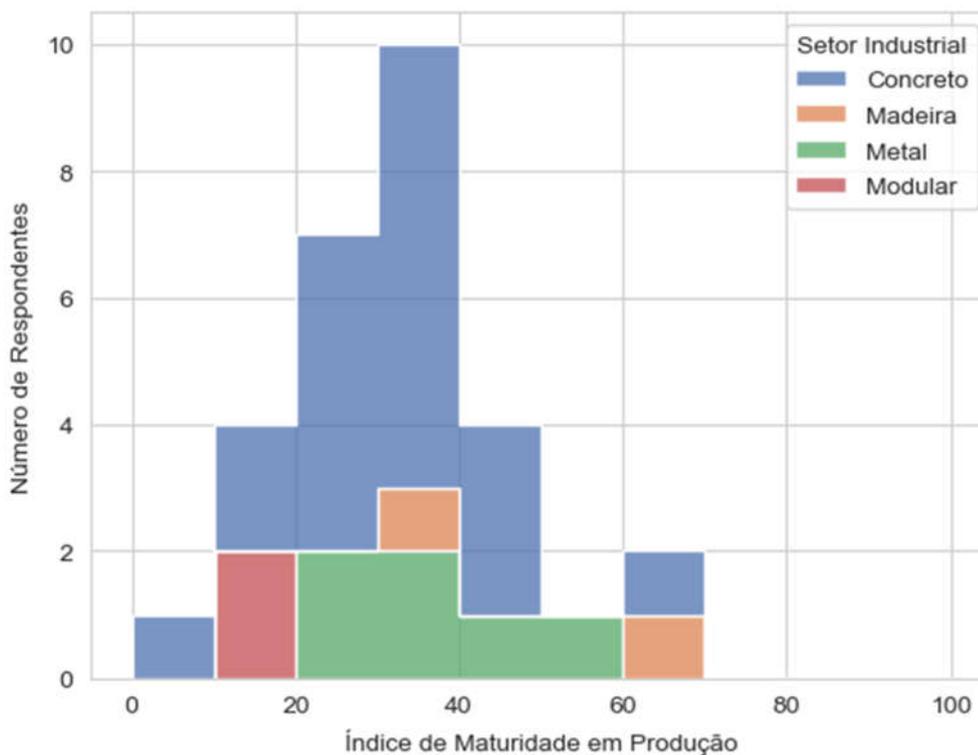
ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	MÉDIA
I9	Fornecimento instruções produção a funcionários	0,1887	20,69
I11	Máquinas controladas por comandos numéricos	0,1887	37,07
I12	Robótica	0,1887	18,10
I19	Máquinas controladas TI – funcionalidade atual	0,1887	33,62
I24	Máquinas controladas TI – adaptabilidade	0,1887	32,76
I40	MES - Sistemas de Execução de Fabricação	0,0566	31,03
		1,0000	28,59

O cálculo do intervalo de confiança efetuado sobre os dados coletados mostra que há uma probabilidade 95% da média populacional real do Fator de Maturidade de Entrada de Parâmetros de Produção cair neste intervalo: de 20 e 37.

7.3.3. OP3 - Produção

O Fator de Maturidade Operacional que aborda os processos físicos de produção centraliza o tema de pesquisa e, inevitavelmente, envolve a maior parte dos itens de maturidade. O Gráfico 16 mostra a distribuição do índice de maturidade em produção, discernindo as empresas por setor industrial.

Gráfico 16 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP3



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se uma distribuição que se aproxima da normal, com modo principal entre 30 e 40 coincidente com a média, 32,53. Duas empresas se apresentam acima de 60, sendo um fabricante de concreto pré-moldado e outro, de pré-fabricação em madeira.

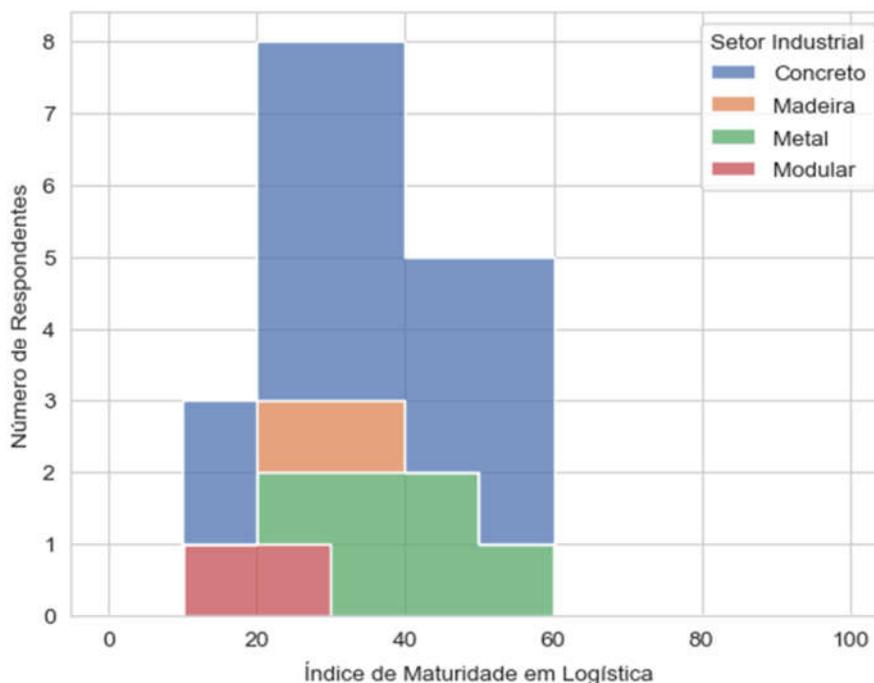
A estatística inferencial aponta que, com nível de confiança de 95%, a média populacional se situa entre 27 e 38.

7.3.4. OP4 - Logística

A logística interna refere-se ao movimento e armazenamento de materiais, componentes e produtos acabados dentro de uma empresa de manufatura. Ela desempenha um papel importante no processo de produção, pois garante que os materiais e recursos necessários estejam disponíveis quando e onde forem necessários para a produção. Os aspectos da logística que são abordados nesta pesquisa são a logística do chão de fábrica, logística de entrada de insumos e organização de estoques, logística do pátio de produtos prontos, e logística de saída e entregas. Como o foco da pesquisa é na produção, a logística recebe menor ênfase e o cálculo deste fator envolve número reduzido de itens de maturidade. No entanto,

a avaliação das interfaces da logística com a produção é essencial para que se desenvolva uma compreensão abrangente do estado real de maturidade. Gráfico 17 mostra a distribuição dos índices de maturidade calculados, por setor industrial.

Gráfico 17 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP4

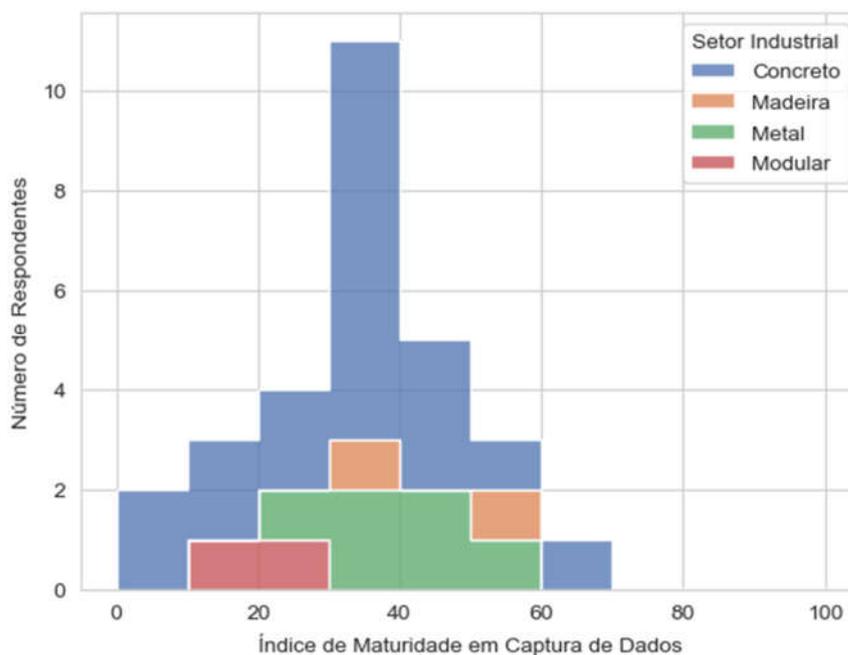


Fonte: Próprio Autor.

É possível verificar uma distribuição concisa, sem caudas. Todos os respondentes se situam entre 10 e 60, com média em 34,72. A estatística inferencial pela Distribuição t de Student aponta que há 95% de probabilidade que a média populacional se situe entre 30 e 40.

7.3.5. OP5 - Captura de Dados

O Fator de Maturidade Operacional de Captura de Dados se aproxima conceitualmente do GT4 – Sensores da Dimensão Tecnológica mas possui o diferencial de incluir a coleta de dados por meios não automatizados. O Gráfico 18 mostra a distribuição do Índice de Maturidade em Captura de Dados, distinguindo fabricantes dos diferentes setores industriais.

Gráfico 18 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP5

Fonte: Próprio Autor.

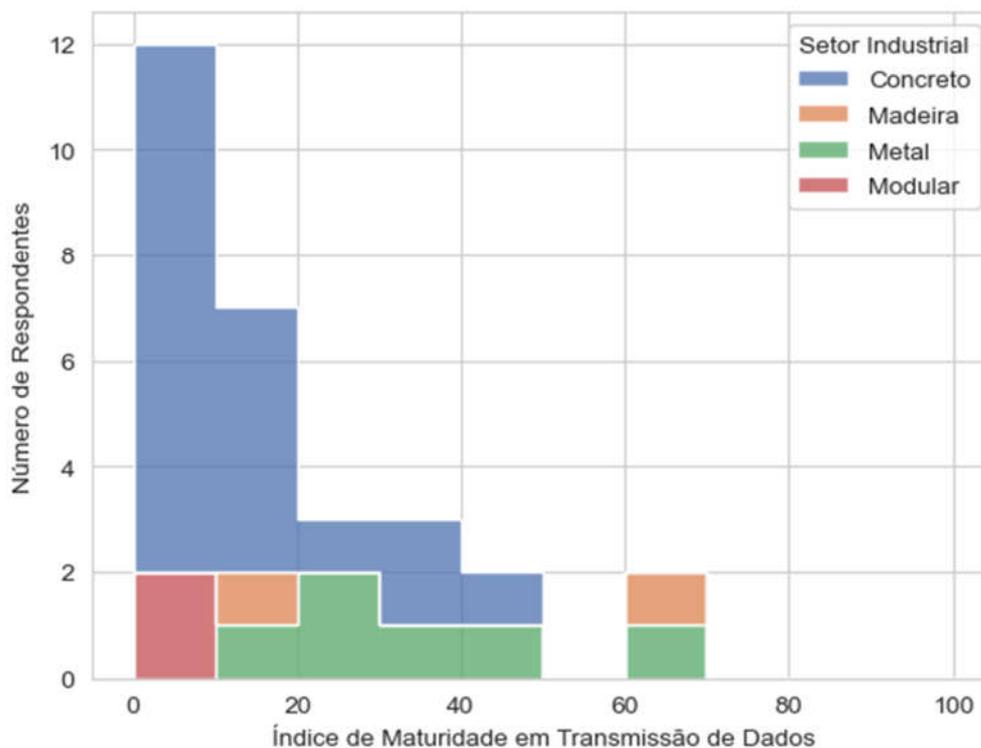
A distribuição com formato que se aproxima de um sino mostra uma concentração elevada de respondentes entre 30 e 40, especialmente de fabricantes de concreto armado. Os fabricantes de estruturas metálicas também apresentam uma distribuição normal, porém mais achatada. A média amostral é 33,38 e o desvio padrão 14,74. A inferência estatística a partir dos dados pela distribuição t de Student permite afirmar, com 95% de confiabilidade, que a média populacional está entre 28 e 39.

7.3.6. OP6 - Transmissão de Dados

O Fator de Maturidade Operacional que trata da Transmissão de Dados aborda redes industriais, capacidades de comunicação das máquinas, interoperabilidade entre máquinas, além da integração de TI com clientes, fornecedores e parceiros.

A distribuição, mostrada no Gráfico 19, possui forte obliquidade positiva, com uma concentração elevada de respondentes entre 0 e 20, e especialmente concentrado entre 0 e 10. O resultado desponta dos resultados em outros fatores pela média baixa e a baixíssima penetração de soluções de comunicação industrial por meios digitais.

Gráfico 19 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP6



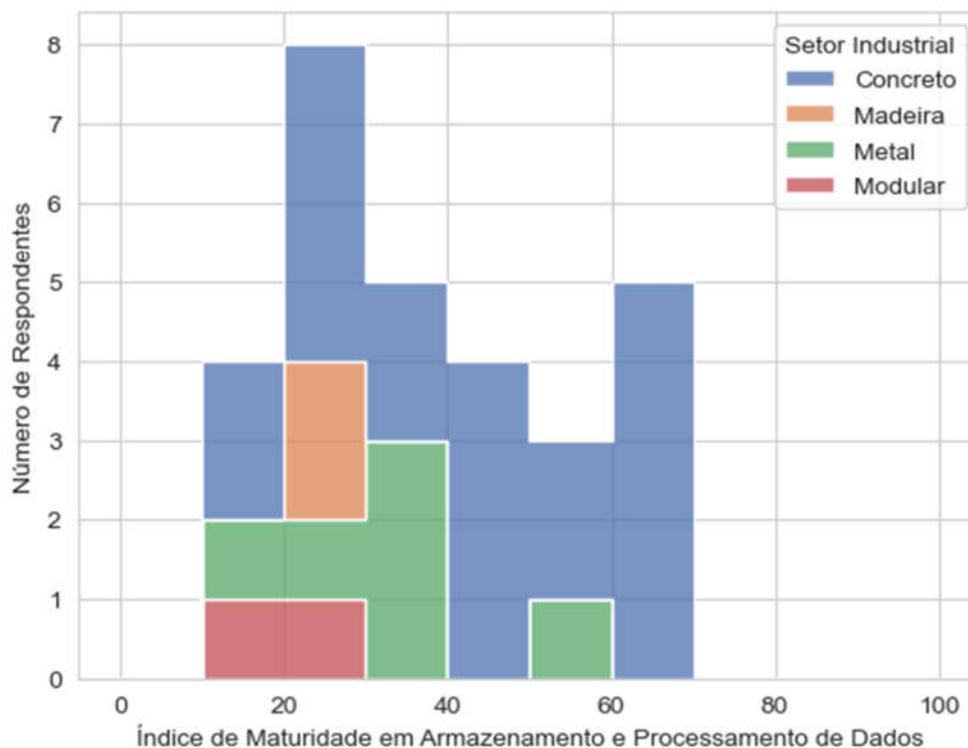
Fonte: Próprio Autor.

A inferência estatística aponta, com 95% de confiabilidade, que a média populacional se posiciona entre 12 e 26.

7.3.7. OP7 - Armazenamento e Processamento de Dados

O índice maturidade no Fator que trata de Armazenamento e Processamento de Dados possui uma curva irregular, com dois modos: o principal entre 20 e 30 e o segundo entre 60 e 70. É interessante notar uma concentração maior de fabricantes de concreto pré-moldado acima de 40 pontos, representando 11 dos 12 melhores colocados na escala. O Gráfico 20 apresenta a distribuição de FCIs respondentes quanto ao nível de maturidade no OP7.

Gráfico 20 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP7



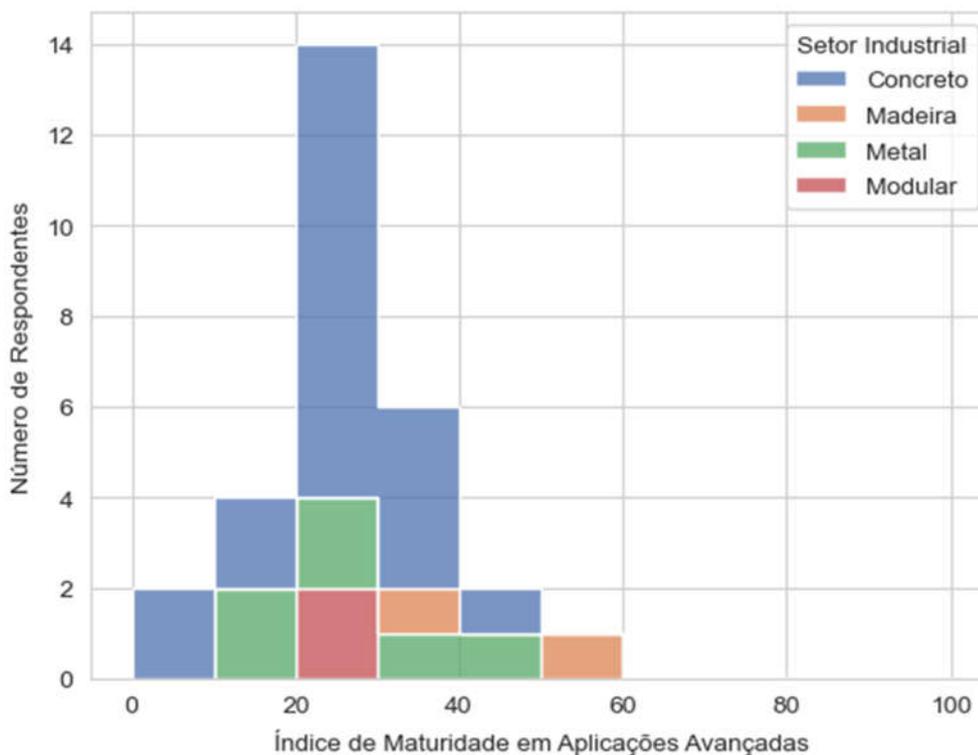
Fonte: Próprio Autor.

Com 95% de confiança, pode-se inferir a partir dos dados amostrais que a média populacional se situa entre 32 e 44.

7.3.8. OP8 - Aplicações Avançadas

As Aplicações Avançadas incluem itens de maturidade que tratam de análises de dados que, acima de 50 pontos, são realizadas de forma automática. Além disso, são incluídos os itens que avaliam as capacidades de ajuste flexível, dinâmico e autônomo do sistema produtivo e logístico. O Gráfico 21 mostra a distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP8.

Gráfico 21 - Distribuição de FCIs quanto ao nível de maturidade no OP8



Fonte: Próprio Autor.

A distribuição do nível de maturidade neste Fator possui distribuição aproximadamente normal. Isso acontece porque as capacidades avançadas de fato somente são capturadas pelo modelo de maturidade na maioria dos itens, na escala de respostas acima de um limiar mínimo.

O intervalo de 95% de confiança da média populacional do índice de maturidade em Aplicações Avançadas varia de 22 a 30.

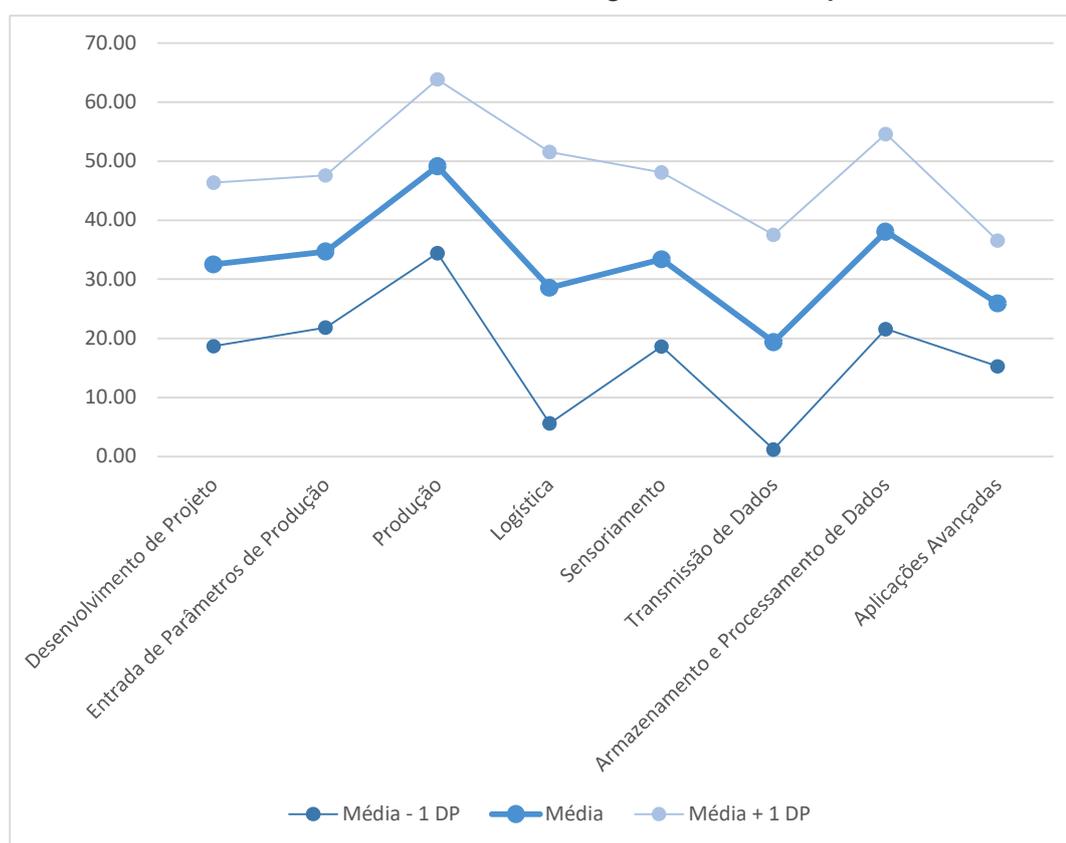
7.3.9. Perfil de Maturidade ao Longo da Cadeia de Produção

A análise da maturidade através da Dimensão Operacional permite a visualização dos resultados de pesquisa sob a ótica da cadeia produtiva, em que cada estágio no fluxo de materiais, dados e informações interage com estágios precedentes e sucessivos. Com esse objetivo, Gráfico 22 apresenta os níveis de maturidade médios, médios mais um desvio padrão, e médio menos um desvio padrão para as empresas amostradas da população, para cada processo da Dimensão Operacional. O gráfico de linhas é escolhido para denotar as relações de interdependência e

sucessão dos processos envolvidos, de forma que déficits dos níveis de maturidade em um estágio provoque repercussões ao longo da cadeia.

Notam-se níveis especialmente baixos em Logística e Transmissão de Dados. É interessante como esses dois fatores são correlatos. A Logística Interna é responsável por estabelecer vínculos entre setores do chão de fábrica através da integração física de estágios de manufatura e da gestão e movimento eficientes de materiais e produtos em processamento. Analogamente, a Transmissão de Dados exerce papel vital na criação de vínculos virtuais, horizontalmente ao longo dos processos da cadeia produtiva e verticalmente, integrando informações do chão de fábrica com níveis superiores de gestão empresarial. Percebe-se, portanto, a fragmentação da cadeia tanto no mundo físico material quanto no mundo virtual dos dados e informações.

Gráfico 22 - Nível de maturidade ao longo da Dimensão Operacional

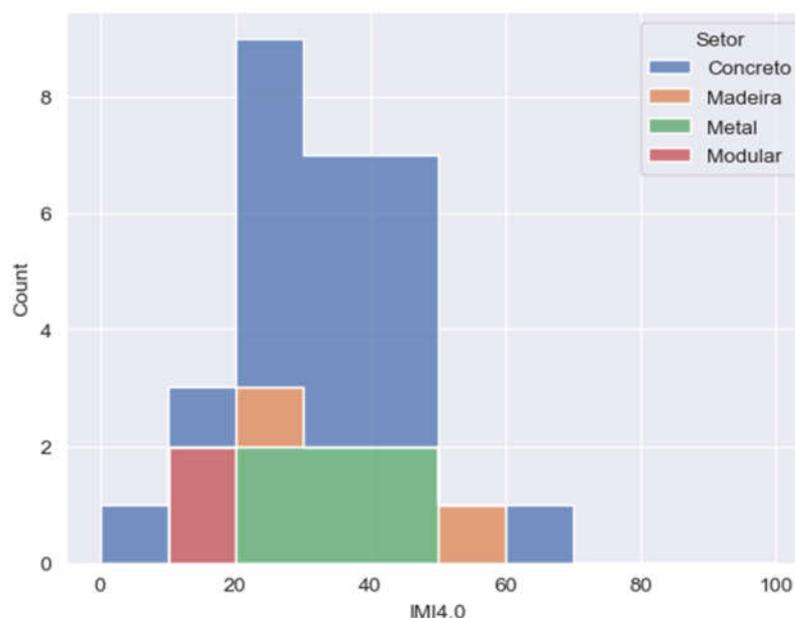


Fonte: Próprio Autor.

7.4. ÍNDICE DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0

O Gráfico 23 apresenta a distribuição de Índice de Maturidade da Indústria 4.0, com discernimento dos setores industriais indicados com cores diferentes.

Gráfico 23 - Distribuição de FCIs quanto ao IMI4.0



Fonte: Próprio Autor.

A partir dos dados calcula-se a média geral em 32,97, o desvio padrão em 12,00. A estatística de Shapiro-Wilk, calculada através da biblioteca Python Scipy, é 0,9853 com um valor-p de 0,9488, indicando que a amostra de dados provavelmente foi extraída de uma distribuição normal.

Na distribuição de IMI4.0, percebe-se que as empresas de construção modular se apresentam agrupadas, com níveis de maturidade baixas. Já as empresas de pré-fabricação em madeira não se encontram próximas, com níveis de maturidade distintos. As empresas de estruturas metálicas se distribuem uniformemente entre IMI4.0 20 e 50. Com maior número de respondentes, a caracterização da normalidade da distribuição vem principalmente das empresas de concreto pré-moldado. Estas apresentam maior variância em comparação com as empresas de estruturas metálicas, que se concentram mais próximas da média amostral.

A partir dos dados coletados, utiliza-se a distribuição t de Student para inferir que há uma probabilidade 95% da média populacional real do fator de maturidade em redes industriais cair no intervalo de 28 a 38. No entanto, considerando que as empresas estudadas não foram escolhidas aleatoriamente, mas são, em sua maioria,

empresas pertencentes a associações importantes da indústria da construção, pode-se estimar que a média populacional deve se aproximar mais ao limite inferior do intervalo de confiança.

7.4.1. Resultados por Faturamento Anual

Aqui se apresentam os resultados da análise da influência da categoria de faturamento anual dos respondentes nos níveis de maturidade calculados para os Fatores da Dimensão Tecnológica, da Dimensão Operacional e no Índice de Maturidade Indústria 4.0. Veja os valores de Tau de Kendall e valor-p na Tabela 21.

Todos os valores de Tau de Kendall encontrados são inferiores a 0,300 indicando associações fracas entre a classe de Faturamento Anual e os Fatores calculados do Modelo de Maturidade. O único valor-p abaixo de 0,050 ocorre para OP2 – Logística, mas também corresponde a um valor muito baixo de Tau de Kendall. Portanto, pode-se concluir que o avanço da maturidade tecnológica das empresas de pré-fabricação não apresenta relação direta com o nível de faturamento das mesmas.

Tabela 21 - Tabela de Tau de Kendall entre fatores de análise do modelo e faturamento anual

	Tau de Kendall	Valor-p
DIMENSÃO TECNOLÓGICA		
GT1 - Tecnologias de Projeto	0,1651	0,2635
GT2 - Máquinas de Produção	0,1859	0,2087
GT3 - Redes Industriais	0,1219	0,4009
GT4 - Sensores	0,1001	0,5027
GT5 - Análítica de Dados	0,0085	0,9532
GT6 - Gêmeos Digitais	0,2616	0,0696
GT7 - Sistemas de Produção Ciberfísicos	0,1196	0,4115
DIMENSÃO OPERACIONAL		
OP1 - Produção	0,2265	0,1182
OP2 - Logística	0,2954	0,0405
OP3 - Desenvolvimento de Projetos	0,1642	0,2572
OP4 - Entrada de Parâmetros de Produção	0,2845	0,0506
OP5 - Captura de Dados	0,0986	0,4946
OP6 - Comunicação	0,0818	0,5714
OP7 - Armazenamento de Processamento de Dados	0,2056	0,1543
OP8 - Aplicações Avançadas	0,0372	0,7990
ÍNDICE DE MATURIDADE INDÚSTRIA 4.0	0,2143	0,1380

7.4.2. Resultados por Número de Funcionários

De modo similar, analisam-se as relações dos níveis de maturidade calculados para os Fatores do Modelo com a classe de tamanho das empresas respondentes, mensurada por número de funcionários. Os resultados são apresentados na Tabela 22. O valor máximo de Tau de Kendall encontrado, em módulo, de 0,1789 indica uma associação fraca entre a classe de tamanho de empresa e os Fatores calculados do Modelo de Maturidade. As correlações avaliadas não apresentam significância estatística, pois o menor valor-p de 0,2241 é superior ao limiar tipicamente adotado de 0,05. Conclui-se, dessa forma, que o número de funcionários de um fabricante não apresenta influência alguma no nível de maturidade tecnológica.

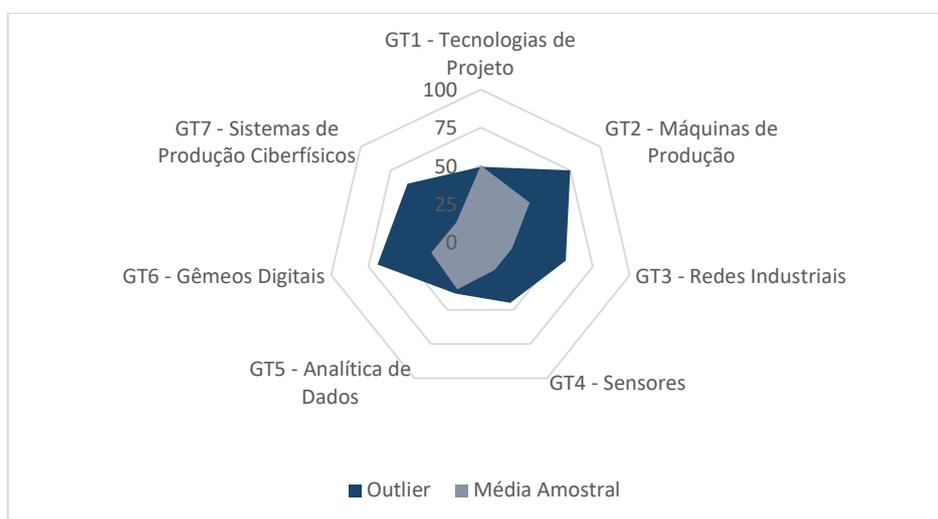
Tabela 22 - Tabela de Tau de Kendall entre fatores de análise do modelo e tamanho da empresa

	Tau de Kendall	Valor-p
DIMENSÃO DE TECNOLOGIAS E CONCEITOS		
Tecnologias de Projeto	0,1429	0,3358
Máquinas de Produção	0,0848	0,5684
Redes Industriais	-0,0913	0,5313
Sensores	-0,0207	0,8901
Analítica de Dados	-0,1380	0,3472
Gêmeos Digitais	0,1019	0,4818
Sistemas de Produção Ciberfísicos	-0,0688	0,6384
DIMENSÃO OPERACIONAL		
Produção	-0,0028	0,9844
Logística	0,0850	0,5578
Desenvolvimento de Projetos	0,1054	0,4692
Entrada de Parâmetros de Produção	0,1317	0,3680
Captura de Dados	-0,0766	0,5977
Comunicação	-0,1363	0,3482
Armazenamento de Processamento de Dados	0,0737	0,6114
Aplicações Avançadas	-0,1789	0,2241
ÍNDICE DE MATURIDADE INDÚSTRIA 4.0	0,0085	0,9532

7.4.3. Análise do Outlier

Conforme discutido na Seção 7.1, uma empresa se destaca claramente com faturamento anual muito superior aos demais fabricantes da mesma categoria de tamanho medida por número de funcionários. O Modelo de Maturidade revelou que esta mesma empresa, atingiu o maior Índice de Maturidade da Indústria 4.0 de todas os FCIs avaliados. Esta empresa, fabricante de concreto pré-moldado e protendido, alcança IMI4.0 de 60,18, oito pontos acima do segundo colocado, e mais de doze pontos a mais que o terceiro. Veja o seu diagrama radar da Dimensão Tecnológica comparado com a média amostral no Gráfico 24.

Gráfico 24 - Gráfico de radar da Dimensão Tecnológica da empresa outlier



Fonte: Próprio Autor.

Os níveis de maturidade da empresa, analisada pela Dimensão Tecnológica, são muito superiores à média das demais empresas estudadas em todos os Fatores com exceção do GT1 – Tecnologias de Projeto e GT5 – Análítica de Dados, onde a empresa se encontra próximo da média amostral. Enquanto não é possível estabelecer um vínculo causal entre a Maturidade da Empresa avaliada pelo MM-FCI4.0 e a razão de faturamento anual por funcionário, a coocorrência é certamente muito curiosa e digna de investigação aprofundada.

7.5. SÍNTESE DOS RESULTADOS

7.5.1. Resumo do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico do Setor

O Quadro de Desenvolvimento Tecnológico dos Fabricantes da Construção Industrializada se refere ao estado atual das tecnologias utilizadas para projetar e produzir elementos para diferentes sistemas construtivos industrializados, sob a ótica da Indústria 4.0. Este Quadro é descrito neste trabalho principalmente através dos dados coletados através do Modelo de Maturidade da Indústria 4.0 e das inferências estatísticas efetuadas.

Análise do GT1 – Tecnologias de Projeto aponta para uma lacuna na infraestrutura para colaboração em projetos com clientes externos, fornecedores e parceiros, destacando o atraso na implementação do BIM interorganizacional.

No GT2 – Máquinas de Produção, fabricantes de estruturas metálicas alcançam níveis de maturidade significativamente superiores que os demais. Como regra geral, os níveis de implementação dos diferentes equipamentos de produção são decrescentes com o nível de sofisticação da tecnologia envolvida. No entanto, há indicação de que a maior parte do maquinário instalado seja automatizada e que tenha capacidade de programação numérica. Por fim, o emprego de robótica industrial ainda é muito baixo e não possui correlação com o avanço de outros equipamentos de produção.

No que diz respeito ao GT3 – Redes Industriais, são observados níveis baixos de implementação, com níveis desiguais de máquinas automatizadas, caracterizando ilhas de automação.

No GT4, o uso de sensores para monitoramento de indicadores de qualidade e de máquinas com capacidade de sensoriamento são relativamente baixos. Contudo, mais de 50% dos respondentes indicaram o emprego de QR-Code para localização e rastreamento de ativos.

Quanto ao GT5, a coleta de dados demonstra aumentar em várias métricas de desempenho de produção ao mesmo tempo assim como a prática de análise de dados tende a aumentar simultaneamente em diversas áreas de aplicação. No entanto, não há indícios de que haja uma relação proporcional entre a coleta de dados e a análise desses dados.

Em se tratando de Sistemas de Informação e Gêmeos Digitais (GT6), os itens que mensuram a visibilidade digital em tempo real na produção e na logística apresentam alta correlação entre si, assim como os itens que abordam a rastreabilidade histórica digital. Porém o nível de associação entre os dois conjuntos, visibilidade em tempo real e rastreabilidade histórica, é moderado.

A maior média amostral no GT7 é observada na porcentagem de etapas de produção que empregam máquinas controladas por comandos numéricos. Conforme a proporção de máquinas capazes de comunicar e ajustar suas operações cresce, também aumenta a habilidade do sistema de manufatura para reagir de maneira dinâmica e eficiente. No entanto, a alta flexibilidade para ajuste de maquinário para manufatura de novos produtos depende de intervenções manuais por parte de funcionários no chão-de-fábrica. A disseminação de máquinas controladas por comandos numéricos e robótica industrial no chão-de-fábrica não mostra uma forte relação com a capacidade de ajuste autônomo do sistema produtivo. De fato, as habilidades de autorregulação e auto-otimização se mostram praticamente inexistentes.

A análise de maturidade da Dimensão Operacional permite avaliar os resultados da pesquisa na perspectiva da cadeia produtiva, em que cada estágio de produção interage com os estágios anteriores e posteriores no fluxo de materiais, dados e informações. Nessa análise, os níveis mais baixos foram observados nas áreas de Logística e Transmissão de Dados. Enquanto a Logística Interna tem a função de integrar fisicamente os estágios de manufatura e gerir o movimento eficiente de materiais e produtos em processamento, a Transmissão de Dados é fundamental para estabelecer vínculos virtuais entre os processos da cadeia produtiva e integrar informações do chão de fábrica com a gestão empresarial. Os níveis baixos confirmam a fragmentação da cadeia produtiva da construção, tanto no domínio físico quanto virtual, até mesmo no escopo de fabricante individual. A Figura 19 mostra um resumo visual do Quadro Atual de Desenvolvimento Tecnológico dos FCIs, resultado da avaliação dos dados coletados pelo MM-FCI4.0.

Os fatores calculados para os três objetivos da Indústria 4.0 (Integração Digital, Eficiência Operacional e Individualização da Produção), são utilizados para calcular o Índice de Maturidade da Indústria 4.0. O setor que demonstra maior IMI4.0 é o de pré-fabricação em madeira, com média amostral de 41, apesar de ser representado por

somente dois respondentes. Os fabricantes de estruturas metálicas apresentam média amostral 37, com maior número de respondentes. Apesar do fato do fabricante com maior IMI4.0 ser do setor de concreto pré-moldado, a média amostral dos fabricantes deste sistema construtivo foi encontrado em 32. Os fabricantes da construção modular são claramente os respondentes com menores níveis de maturidade na implementação de tecnologias da Indústria 4.0. Com o aumento dos graus de pré-fabricação, há uma maior transferência de diversas atividades do canteiro de obras para o contexto da fábrica. Essa adição de diferentes operações resulta em um aumento na complexidade e dificuldade de automação.

A Figura 19 apresenta um breve resumo dos resultados de pesquisa. Para cada setor, são indicados a média amostral do IMI4.0, assim como o intervalo de 95% de confiança para a média populacional calculada pelo t de Student, no canto superior direito de cada janela.

Figura 19 – Resumo Visual do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico da Indústria 4.0



Fonte: Próprio Autor.

7.5.2. Caminhos para Avanço da Indústria 4.0 nos FCIs

Avançar na Indústria 4.0 é um desafio complexo que exige investimentos substanciais em vários setores dentro de uma organização: estratégia, cultura corporativa, capacitação da força de trabalho. Essa pesquisa, com escopo tecnológico e operacional encontra indicações de possíveis trajetórias para avanço da Indústria 4.0 nos FCIs para alcançar os objetivos de aumento da Integração Digital, da Eficiência Operacional e da capacidade de Individualização da Produção.

As tecnologias da Indústria 4.0 exibem interdependências, com diversas aplicações abrangendo operações industriais envolvidas na Fabricação para a Construção Industrializada. Conforme elucidado pela atribuição de pesos aos objetivos da Indústria 4.0 com auxílio de consultores especialistas nacionais e internacionais, existem intersecções significativas dos Objetivos da Indústria 4.0 de Integração Digital, Eficiência Operacional e Individualização da Produção de forma que investimentos para avanço de um desses objetivos implica, necessariamente no avanço nos demais.

A análise cruzada entre Fatores da Dimensão Tecnológica por meio de regressão linear demonstrou que o nível de maturidade em Sistemas de Produção Ciberfísicos (GT7) pode ser melhor descrito pelos níveis de maturidade em Máquinas de Produção (GT2) e Redes Industriais (GT3). A análise de correlação entre os Grupos Tecnológicos (GTs) mostrou também uma associação forte entre Sensores (GT4) e Sistemas de Produção Ciberfísicos (GT7). Estes aprendizados parecem indicar que investimentos em GT2, GT3 e GT4 teriam maiores resultados para aumento em GT7. Por outro lado, a média amostra do nível de maturidade em Máquinas de Produção (GT2) é relativamente alto (40,95) em comparação com Redes Industriais (GT3), indicando maior carência de avanço em tecnologias para integração digital do chão de fábrica.

De fato, sob a ótica de operações, Logística (OP4) e Transmissão de Dados (OP6) demonstraram níveis inferiores de maturidade. Responsáveis por estabelecer vínculos físicos e virtuais, respectivamente, esses índices definem a movimentação eficiente de materiais e produtos em processamento assim como a comunicação clara de informações necessárias para tomadas de decisão.

Com o oferecimento de novas tecnologias e abordagens apresentadas no contexto da Indústria 4.0, uma empresa FCI com maquinário automatizado que carece de uma rede industrial integrada a sensores em chão de fábrica e sistemas de informação corporativos poderia saltar certas etapas no desenvolvimento tecnológico adotando um sistema baseado na Internet das Coisas e Computação em Nuvem, transformando assim o atraso relativo em uma oportunidade de avanço rápido. Empresas que já tenham efetuado esses investimentos anteriormente poderiam se encontrar em desvantagem pelo desafio adicional de migrar sistemas antigos baseados em infraestrutura de rede e sistemas de informação legado, com necessidades de reestruturação de processos, treinamento de funcionários e resolução de possíveis problemas de compatibilidade.

Apesar das análises de correlação entre os Fatores das Dimensões de Análise e faturamento anual não apresentar valores elevados, a constatação de que a empresa outlier na razão de faturamento anual por funcionário também apresentou o maior Índice de Maturidade I4.0 aponta para a possibilidade de alcançar resultados tangíveis de aumento de produtividade da mão-de-obra pelo investimento em tecnologias da Indústria 4.0.

Em síntese, os resultados da pesquisa sugerem a existência de uma fragmentação digital nos Fabricantes da Construção Industrializada. A expansão do envelope de domínio tecnológico, a priori, poderia se beneficiar por investimentos na Internet das Coisas (infraestrutura de redes industriais) que permitam a integração digital ao longo dos processos que compõem a cadeia produtiva interna dos fabricantes. Com isso, será possibilitada a entrada de parâmetros de produção sem intervenção humana, a captura e transmissão de dados de produção, além do controle de processos. Em decorrência da maior disponibilidade de dados, é viabilizada a gestão baseada em dados, além de aplicações de analítica de big data e aprendizado de máquina. A realimentação dessas aprendizagens também depende da existência das redes industriais.

8. CONCLUSÃO

Esta pesquisa procurou identificar o estágio de maturidade dos Fabricantes da Construção Industrializada brasileiros no que se refere à implementação de tecnologias da Indústria 4.0. Para tanto, foi criado o Modelo de Maturidade para Fabricantes da Construção Industrializada 4.0 (MM-FCI4.0) uma ferramenta de avaliação associada a um sistema de pontuação para determinar o Índice de Maturidade da Indústria 4.0.

O MM-FCI4.0 possui 68 itens de maturidade constituídas de uma pergunta e uma escala de respostas possíveis.

Os resultados dos itens de maturidade permitem o cálculo dos níveis de maturidade em diversos Fatores das Dimensões de Análise. Na Dimensão Tecnológica, os Fatores avaliados são os grupos de tecnologias e conceitos associados. Na Dimensão Operacional, os Fatores avaliados são os processos físicos que descrevem o fluxo físico de materiais e os processos virtuais, que descrevem o fluxo de dados e informações nas operações dos FCIs. Na Dimensão dos Objetivos da Indústria 4.0, são avaliados os níveis de implementação de tecnologias na intenção de aumentar a Integração Digital, a Eficiência Operacional e a Individualização da Produção. Estes, por sua vez, são somados a fim de calcular o Índice de Maturidade da Indústria 4.0.

A pesquisa oferece contribuições para o campo prático pela apresentação de uma ferramenta avaliativa para acompanhar a evolução tecnológica de Fabricantes da Construção Industrializada no sentido da criação de sistemas produtivos mais inteligentes e autônomos. Além disso, a pesquisa também expõe o quadro atual de desenvolvimento tecnológico destes fabricantes, possibilitando identificar áreas para investimento e direcionar esforços de inovação. Conforme a arguição deste trabalho, esses esforços podem ser relevantes para enfrentar desafios na construção industrializada como o aumento simultâneo da produtividade e da capacidade de atender a variabilidade de tipologias dos edifícios.

A pesquisa teve êxito na coleta de contribuições de 29 FCIs, sendo a maior parte, empresas relevantes nas regiões Sul e Sudeste do Brasil dos setores de pré-fabricação em concreto, pré-fabricação em aço, pré-fabricação em madeira e construção modular.

O Índice de Maturidade da Indústria 4.0 (IMI4.0) médio das empresas amostradas é 32,97, com desvio padrão 12,00, com indicação de normalidade da distribuição populacional. Pelo teste t, calcula-se com 95% de confiança que a média populacional se situa entre 28,4 a 37,5. Não há indício de correlação dos níveis de maturidade calculados para Fatores de Análise do Modelo com faturamento anual nem mesmo com o tamanho da empresa em número de funcionários. No entanto, há um fabricante que demonstra uma relação de faturamento anual ao tamanho da empresa muito superior aos demais, que também apresentou o maior IMI4.0 entre os fabricantes estudados. Apesar de não ser possível comprovar a relação de causalidade entre esses achados, uma investigação mais aprofundada pode fornecer informações valiosas e ajudar a estabelecer uma compreensão mais clara da relação entre as variáveis em questão.

Em resumo, os resultados do MM-FCI4.0 apontam para um quadro de desenvolvimento tecnológico dos FCIs marcados por: BIM interorganizacional deficitário; máquinas de produção relativamente sofisticadas, porém sem conexão a redes industriais; baixa implementação de sensores e coleta de dados automática com exceção do uso de QR-Code, fragmentação nos fluxos de dados e informações digitais.

A pesquisa foi bem-sucedida em atingir os objetivos específicos de sistematização das tecnologias da Indústria 4.0, identificação da aplicabilidade destas tecnologias no contexto da pré-fabricação, na elaboração de um modelo de maturidade tecnológica para FCIs e na coleta e análise de dados para indicação do Quadro de Desenvolvimento Tecnológico no sentido da Indústria 4.0.

Apesar do evento do Webinar da Indústria 4.0 ter tido um alcance de número significativo de participantes e ter criado uma oportunidade para contatar associações setoriais, seus representantes e associados, não foi efetivo para coletar contribuições ao Modelo de Maturidade, sendo necessário estender o esforço por outros meios.

Outro ponto que deve ser ressaltado é que a ferramenta de avaliação, o MM-FCI4.0, pode ter apresentado limitações devido à complexidade dos assuntos abordados que ter prejudicado a capacidade dos respondentes de fornecer respostas precisas. Dessa forma, entende-se que uma avaliação mais acurada do estado de implementação de tecnologias da Indústria 4.0 necessita da consultoria de um especialista na área.

A formulação matemática dos Fatores da Dimensão de Objetivos da Indústria 4.0 resultou na necessidade de adaptação da abordagem utilizada, conforme explanada na Sessão 5.6. O cálculo dos Fatores por meio dos vetores de pesos que se comportam, para todos os efeitos, como vetores de probabilidade, com pouquíssimos pesos iguais a zero, e a multiplicação pelo vetor de respostas mostrou tender sempre para a média simples dos valores do vetor de respostas. Por isso, um fabricante com maior nível de maturidade em Integração Digital que outro, também vai apresentar maior nível de maturidade em Eficiência Operacional e Individualização da Produção. A análise desses Fatores independentemente é redundante. Pode-se sugerir que uma avaliação mais efetiva da orientação de uma empresa para atingir os objetivos da Indústria 4.0 seja feita não por meio dos investimentos em tecnologias nos processos internos, mas através de uma avaliação sistêmica do planejamento estratégico e da cultura corporativa da empresa em questão.

Para trabalho futuro, com o objetivo de definir uma matriz de pesos entre os Itens de Maturidade e os Fatores das Dimensões de Análise de forma mais robusta, sugere-se o uso do “*Analytic Hierarchy Process*” ou do “*Bayesian Best-Worst Method*” que são abordagens compreensivas e bem estabelecidas na literatura acadêmica.

Outro trabalho potencial seria a aplicação do MM-FCI4.0, ou versão revisada deste, no contexto internacional, com interesse especial em obter contribuições de empresas em países onde a construção industrializada se encontra em níveis mais avançados, como no Japão, Reino Unido, EUA, Canada, Alemanha, Espanha e China.

Seguindo o protocolo do DSR, a heurística de construção da pesquisa pode ser generalizada para uma classe de problemas lidando com a evolução tecnológica de sistemas produtivos em outras indústrias. Conforme indicado pela avaliação de outras ferramentas avaliativas como modelos de maturidade para a Indústria 4.0 e BIM, há uma lacuna em instrumentos que tratem da integração dos processos de projeto e de produção. O Modelo de Maturidade proposto poderia, em princípio, ser utilizado para avaliar fabricantes de produtos projetados sob demanda (ETO, do inglês, *Engineered to Order*) de outras indústrias que incorporem processos intensivos em engenharia e desenvolvimento. A individualização da produção, conceito central à Indústria 4.0, exige a avaliação conjunta dos processos de projeto e produção.

Dando um passo para trás, identifica-se que a sistematização do escopo da pesquisa, da identificação das inter-relações entre os seus elementos constituintes

assim como os pré-requisitos para o desenvolvimento de determinada conjuntura foi fundamental para que a ferramenta avaliativa não refletisse somente as concepções mais superficiais apontadas por trabalhos imediatamente evidentes.

Em conclusão, os resultados deste estudo têm implicações importantes para compreensão do estado atual da construção industrializada, particularmente no domínio da pré-fabricação. Além disso, esta pesquisa ajuda a delinear caminhos potenciais para a progressão tecnológica em direção ao aumento da inteligência e autonomia nos sistemas de produção, de acordo com os paradigmas defendidos pela Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABANDA, F. H.; TAH, J. H. M.; CHEUNG, F. K. T. BIM in off-site manufacturing for buildings. **Journal of Building Engineering**, v.14, n. 89-102, 2017.

ABDELGHANY, A.; ABDELGHANY, K. **Modeling Applications in the Airline Industry**. Ashgate e-Book. 2009.

ACATECH. **Deutsch Akademie der Technikwissenschaften**. Disponível em: <https://www.acatech.de/akademie/>. Acesso em: 20/11/2020.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Manual da construção industrializada**. Conceitos e etapas. Volume I: estrutura e vedação. Brasília: ABDI, 2015. Disponível em: <http://www.abramat.org.br/datafiles/publicacoes/manual-construcao.pdf>. Acesso em 20 de abril de 2021.

AKDIL, K. Y.; USTUNDANG, A.; CEVIKCAN, E. Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*, p.61–94. Cham: Springer, 2018.

ALANKARAGE, S. *et al.* Organisational BIM maturity models and their applications: a systematic literature review. **Architectural Engineering and Design Management**, p. 1-19, 2022.

BABIC, N. C.; PODBREZNIK, P.; REBOLJ, D. Integrating resource production and construction using BIM. **Automation in Construction**, v. 19, n. 5, p. 539–543, 2010.

BAESENS, B. **Analytics in a Big Data world**: the essential guide to data science and its applications. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014.

BAHETI, Radhakisan; GILL, Helen. Cyber-physical systems. **The impact of control technology**, v. 12, n. 1, p. 161-166, 2011.

BANKS, J.; CARSON J.; NELSON B.L.; NICOL, D. **Discrete-event system simulation** (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. ISBN 978-0-13-088702-3. 2005.

BANKS, J.; HUGAN, J.C.; LENDERMANN, P.; MCLEAN, C.; PAGE, E.H.; PEDGEN, C.D. *et al.* The future of the simulation industry. In: Chick S et al (ed) **Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference**. IEEE, Piscataway, NJ, p. 2033–2043, 2003.

BARROS, M. **Metodologia para Implantação de Tecnologias Construtivas Racionalizadas na Produção de Edifícios**. 1996. Tese (Dourado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BERMAN J. **Principles of Big Data**: preparing, sharing, and analysing complex information. Morgan Kaufmann, 2013.

BERTRAM, N. *et al.* **Modular construction**: From projects to products. McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure, p. 1-34, 2019.

BIM Excellence Maturity Matrix. Disponível em: <https://bimexcellence.org/resources/300series/301in/>. Acesso em: nov., 2020.

BISHOP, Christopher M.; NASRABADI, Nasser M. **Pattern recognition and machine learning**. New York: springer, 2006.

BLAYSE, A.M.; MANLEY K. Key influences on construction innovation, **Construction Innovation**, v. 4, p. 143-154, 2004.

BLISMAS, N. **Off-site Manufacture in Australia**: Current State and Future Directions, Cooperative Research Centre for Construction Innovation, Australia, 2007.

BLOCH, Henry. "Modular Automation means flexible production" Henry Bloch, Holder of the Namur Award 2016, in Conversation with atp editon about the Orchestration of Process Functions. ATP EDITION, n. 5, p. 19-21, 2017.

BOCK, T. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. **Automation in Construction**, v. 59, p. 113-121, 2015.

BOCK, T.; LINNER, T. **Robotic industrialization**. Cambridge University Press, 2015.

BORDEL, B.; ALCARRIA, R.; ROBLES, T.; MARTÍN, D. Cyber-Physical Systems: Extending Pervasive Sensing from Control Theory to the Internet of Things. **Pervasive and Mobile Computing**. v. 40, p. 156-184. 2017.

BOSCHERT, S.; HEINRICH, C.; ROSEN, R. Next generation digital twin. In: Horvath, I., Suarez Rivero, J.P., Hernandez Castellano, P.M. (eds.) Proceedings of TMCE, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2018.

BRETTEL, M.; FRIEDERISCHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. World Academy of Science, Engineering and Technology. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.

BRISSI, Sara *et al.* A review on the interactions of robotic systems and lean principles in offsite construction. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 29, n. 1, p. 383-406, 2022.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The Second Machine Age**: Work, Progress, and Prosperity In A Time of Brilliant Technologies, WW Norton & Company, New York, NY, 2014.

CARDOSO, F. Capítulo II: A Dimensão Organizacional da Construção Civil. In: ABIKO, A.; MARQUES, F.; CARDOSO, F. Setor de construção civil: segmento de edificações. Série Estudos Setoriais n. 5. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Departamento Nacional / SENAI. DN – Brasília, 2005. p.71-124.

CARSON, J. S. **Introduction to modeling and simulation**. In: Kuhl ME et al (ed) Proceedings of the 2005 winter simulation conference. IEEE, Piscataway, NJ, pp 16–23, 2005.

CHEN, D.; CHANG, G.; SUN, D.; JIA, J.; WANG X. Modeling access control for cyber-physical systems using reputation, **Computers & Electrical Engineering**. v. 38, n.5, p. 1088–1101, 2012.

CHEN, Chen *et al.* Optimal facility layout planning for AGV-based modular prefabricated manufacturing system. **Automation in Construction**, v. 98, p. 310-321, 2019.

CHEN, Yunfeng *et al.* Structural equation model of building information modeling maturity. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 9, p. 04016032, 2016.

CHENG, Jack CP *et al.* A service oriented framework for construction supply chain integration. **Automation in construction**, v. 19, n. 2, p. 245-260, 2010.

CHIARELLO, F.; TRIVELLI, L.; BONACCORSI, A.; FANTONI, G. Extracting and Mapping Industry 4.0 Technologies Using Wikipedia. **Computers in Industry**. v. 100, p. 244-257. 2018.

CONWAY, J. The Industrial Internet of Things: An Evolution to a Smart Manufacturing Enterprise. Schneider Electric Whitepaper, 2015.

CORRÊA, F. R. Is BIM Big Enough to Take Advantage of Big Data Analytics? ISARC. **Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction**, v. 32., 2015, Oulu, Finlândia.

DEMIRDÖĞEN, Gökhan *et al.* Lean based maturity framework integrating value, BIM and big data analytics: evidence from AEC industry. **Sustainability**, v. 13, n. 18, p. 10029, 2021.

DIAB, W.; HARPER, E.; LIN, S.-W.; SOBEL, W. **Industrial Analytics: The Engine Driving the IIoT Revolution**. An Industrial Internet Consortium Technical White Paper. 2017.

DOMO. Data Never Sleeps 10.0. Disponível em: <https://www.domo.com/>>. Acesso em: mar. 2023.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Ed. Bookman, 2015.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A guide to building information modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**, Hoboken, N.J: Bookman; Wiley & Sons, 2014. 503 p. ISBN 9780470185285.

EUROPEAN COMMISSION. **Vision and Challenges for Realising the Internet of Things**. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2010. 229p.

FARDHOSSEINI, M. S. *et al.* Automating the digital fabrication of concrete formwork in building projects: Workflow and case example. In: *Computing in civil engineering 2019: Data, sensing, and analytics*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. p. 360-367.

FARDHOSSEINI, M. S. *et al.* The cost-effectiveness of integrating digital fabrication for concrete formworks. In: *Construction Research Congress 2020: Computer Applications*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 1077-1086.

GANZARAIN, J.; ERRASTI, N. Three stage maturity model in SME's towards Industry 4.0. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 9. n. 5. p. 1119-1128, 2016.

GEISSBAUER, Reinhard; VEDSO, J. V.; SCHRAUF, S. The Industry 4.0/digital operations selfassessment. PricewaterhouseCoopers Report, 2016. Disponível em: <https://www.pwc.com>. Acesso em: 14 set. 2019.

GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**. v. 29, n.6, 2018.

GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, 2013.

GUO, J.; WANG, Q.; PARK, J.-H.. Geometric quality inspection of prefabricated MEP modules with 3D laser scanning. **Automation in Construction**, v. 111, p. 103053, 2020.

HE, Rui *et al.* BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123505, 2021.

HE, W.; XU, L. A state-of-the-art survey of cloud manufacturing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. 2015

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios**: A Literature Review. Working Paper No. 01 / 2015.

HIRSCHBERG, S. Semantic Data and Resource Description Framework. Fullstack Academy, agosto 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zeYfT1cNKQg&list=PLIGaNMFB07EkwKfDvsR-L3yXBKxJK4kYy>. Acesso em: 17 de mai. 2021.

HOMAG. Disponível em: <https://www.homag.com/>. Acesso em: out. 2021.

HOSSEINI, M. Reza *et al.* Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis. **Automation in construction**, v. 87, p. 235-247, 2018.

HUYNH, S. X.; QUAN, D. A. Cloud Computing in Manufacturing Environment. AIChE Spring National Meeting, New Orleans, LA, 2008.

HWANG, Bon-Gang; SHAN, Ming; LOOI, Kit-Ying. Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction. **Journal of cleaner production**, v. 183, p. 183-193, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indústria e Construção. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IFR – International Federation of Robotics: Robot History. Disponível em: <https://ifr.org/robot-history>. Acesso em: mai. 2021.

INTERNATIONAL DATA CORPORATION. IDC's Global StorageSphere Forecast Shows Continued Strong Growth in the World's Installed Base of Storage Capacity. 2020. Disponível em: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46303920>. Acesso em: 09/01/2021.

IOT ANALYTICS Disponível em: <https://iot-analytics.com/>, Acesso em: jan. 2022.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 8373:2012 Robots and robotic devices — Vocabulary. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>. Acesso em: mai. 2021.

JIN, Ruoyu *et al.* BIM investment, returns, and risks in China's AEC industries. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 12, p. 04017089, 2017.

JIN, Ruoyu *et al.* A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018. **Journal of cleaner production**, v. 202, p. 1202-1219, 2018.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W. WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. VDI nachrichten, 13. 2011.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W. HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013.

KAM, C.; SENARATNA, D.; MCKINNEY, B.; XIAO, Y.; SONG, M. The VDC Scorecard: Formulation and Validation. CIFE Working Paper #WP135. Stanford University, 2013

KLINGENBERG, C.; BORGES, M. A.; ANTUNES JR., J. A. Industry 4.0 as a Data-Driven Paradigm: A Systematic Literature Review on Technologies. **Journal of Manufacturing Technology Management**. v. 32, n. 3. 2019.

KREINSEN, Hartmut *et al.* **Research and development needs for successful implementation of Industrie 4.0**. Key themes of Industrie 4.0. Munique: ACATECH (National Academy of Science and Engineering), 2019.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G.; HENJES, J.; SIHN, W.: **Digital twin in manufacturing**: a categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51(11), 1016–1022. 2018.

KUNZ, J.; FISCHER, M. **Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation Suggestions**. CIFE # 097 Versão 14; Janeiro de 2012. STANFORD UNIVERSITY.

LEE, E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 11, IEEE Computer Society. p. 363-369. 2008.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach**. ed. 2. MIT Press, 2017.

LEE, J.-S.; KWON, N.; HAM, N.-H.; KIM, J.-J.; AHN, Y.-H. BIM-Based Digital Fabrication Process for a Free-Form Building Project in South Korea. **Advances in Civil Engineering**. v. 2019.

LI, Clyde Zhengdao *et al.* SWOT analysis and Internet of Things-enabled platform for prefabrication housing production in Hong Kong. **Habitat International**, v. 57, p. 74-87, 2016.

LI, Clyde Zhengdao *et al.* Schedule risks in prefabrication housing production in Hong Kong: a social network analysis. **Journal of cleaner production**, v. 134, p. 482-494, 2016.

LI, Clyde Zhengdao *et al.* Integrating RFID and BIM technologies for mitigating risks and improving schedule performance of prefabricated house construction. **Journal of cleaner production**, v. 165, p. 1048-1062, 2017.

LI, Shancang; XU, Li Da; ZHAO, Shanshan. The internet of things: a survey. **Information systems frontiers**, v. 17, p. 243-259, 2015.

LI, Xiao *et al.* RBL-PHP: Simulation of lean construction and information technologies for prefabrication housing production. **Journal of Management in Engineering**, v. 34, n. 2, p. 04017053, 2018.

LI, Xiao *et al.* Integrating building information modeling and prefabrication housing production. **Automation in Construction**, v. 100, p. 46-60, 2019.

LI, Zhengdao; SHEN, Geoffrey Qiping; XUE, Xiaolong. Critical review of the research on the management of prefabricated construction. **Habitat international**, v. 43, p. 240-249, 2014.

LIANG, C. *et al.* Development of a multifunctional BIM maturity model. **Journal of construction engineering and management**, v. 142, n. 11, p. 06016003, 2016.

LICHTBLAU, K. *et al.* IMPULS-Industrie 4.0- Readiness. Aachen-Köln: Impuls-Stiftung des VDMA, 2015.

LIN, C.; RAMAKRISHNAN, K.; LIU, J.; NGAI, E. "Guest Editorial Special Issue on Cloud Computing for IoT," in **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 3, p. 254-256, 2016.

LIN, S. *et al.* Architecture Alignment and Interoperability. An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper. IIC:WHT:IN3:V1.0:PB:20171205. 2017.

LIU, G.; NZIGE, J. H.; LI, K. Trending topics and themes in offsite construction (OSC) research: The application of topic modelling. **Construction Innovation**, 2019.

LIU, Y.; XU, D.; AGMELL, M.; SAOUBI, R. M.; AHADI, A.; STAHL, J-E.; ZHOU, J. Numerical and experimental investigation of tool geometry effect on residual stresses in orthogonal machining of Inconel 718. **Simulation Modelling Practice and Theory**. 2020.

MACHADO, F. A. **BIM e Internet das Coisas para o monitoramento do consumo de energia da edificação**. 2018. 1 recurso online (208 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

MANESIS, S.; NIKOLAKOPOULOS, G. **Introduction to Industrial Automation**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.

MARTINEZ, Pablo; AHMAD, Rafiq; AL-HUSSEIN, Mohamed. A vision-based system for pre-inspection of steel frame manufacturing. **Automation in Construction**, v. 97, p. 151-163, 2019.

MARWEDEL, P. **Embedded System Design - Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems**. ed. 2. Springer, 2011.

MASKURIY, Raihan *et al.* Industry 4.0 for the construction industry—how ready is the industry? **Applied Sciences**, v. 9, n. 14, p. 2819, 2019.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Reinventing Construction: a Route to Higher Productivity**. 1. ed., New York, 2017.

MELL, P.; GRANCE, T. National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Special Publication 800-145. The NIST Definition of Cloud Computing. 2011.

MITTAL, S.; KHAN, M.; ROMERO, D.; WUEST, T. A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs), **Journal of Manufacturing Systems**, v. 49, p. 194-214, 2018.

MORLHON, Romain; PELLERIN, Robert; BOURGAULT, Mario. Building information modeling implementation through maturity evaluation and critical success factors management. **Procedia Technology**, v. 16, p. 1126-1134, 2014.

NBIMS, N. B. National BIM Standard-United States® Version 3. Building Smart Alliance, 2010.

NEGAHBAN, A.; SMITH, J. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems** v. 33, p. 241–261. 2014.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manuf.* v.11, p. 939–948, 2017.

NIU, Yuhan *et al.* Smart construction objects. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, p. 04015070, 2016.

OLAWUMI, Timothy O.; CHAN, Daniel WM. Development of a benchmarking model for BIM implementation in developing countries. *Benchmarking: An International Journal*, v. 26, n. 4, p. 1210-1232, 2019.

ORLOWSKI, K. Automated manufacturing for timber-based panelised wall systems. **Automation in Construction**, v. 109, p. 102988, 2020.

OSHA – Occupational Safety and Health Administration: Guidelines for Robotics Safety. Disponível em: <https://www.osha.gov/enforcement/directives/std-01-12-002>> Acesso em: mai. 2021.

OWEN-HILL, A. Robo-DK. What's the Difference Between Robots and CNC Machines? 2019. Disponível em: <https://robodk.com/blog/difference-robots-cnc-machines/#:~:text=Programming%20%E2%80%94%20CNC%20machines%20are%20programmed,via%20a%20robot%20post%2Dprocessor>. Acesso em: mai. 2021.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2020.

PAN, M.; LINNER, T.; PAN, W.; CHENG, H.-M.; BOCK, T. Influencing factors of the future utilisation of construction robots for buildings: A Hong Kong perspective. **Journal of Building Engineering**, 2020.

PAN, M.; PAN, W. Determinants of adoption of robotics in precast concrete production for buildings. **Journal of Management in Engineering**, v. 35, n. 5, p. 05019007, 2019.

PENN STATE, BIM Project Execution Planning Guide – Version 3 – DRAFT. Disponível em: <https://psu.pb.unizin.org/bimprojectexecutionplanning/>. Acesso em: mai. 2022.

PHANG, Thomas CH; CHEN, Chen; TIONG, Robert LK. New model for identifying critical success factors influencing BIM adoption from precast concrete manufacturers' view. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 4, p. 04020014, 2020.

PwC – PricewaterhouseCoopers. The Industry 4.0 Digital Operations Self Assessment. 2016. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-yourdigital-enterprise-april-2016.pdf>. Acesso em: mai. 2021.

QI, B.; CHEN, K.; COSTIN, A. RFID and BIM-enabled prefabricated component management system in prefabricated housing production. In: *Construction Research Congress 2018*. 2018. p. 591-601.

RASCHKA, S.; PATTERSON, J.; NOLET, C. Machine Learning in Python: Main Developments and Technology Trends in Data Science, Machine Learning, and Artificial Intelligence. **Information**. v. 11, n. 4, 2020.

RASHID, Khandakar; LOUIS, Joseph. Activity identification in modular construction using audio signals and machine learning. **Automation in construction**, v. 119, p. 103361, 2020.

RASURE, E. Labor Productivity. 2020. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/l/labor-productivity.asp>. Acesso em: 05 de abr. 2021.

RAZKENARI, Mohamed *et al.* Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 2020.

REIS, M.; GINS, G. Industrial Process Monitoring in the Big Data/Industry 4.0 Era: From Detection, to Diagnosis, to Prognosis. **Process**. MDPI, 2017

RICHARD, Roger-Bruno. Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. **Automation in construction**, v. 14, n. 4, p. 442-451, 2005.

ROCKWELL AUTOMATION, Automated Material Handling Systems. Disponível em: <https://www.rockwellautomation.com/en-za/capabilities/machine-equipment-builders/automated-material-handling-systems.html>. Acesso em: mai. 2021.

ROCKWELL AUTOMATION. The Connected Enterprise Maturity Model, 2014. Disponível em: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf. Acesso em: 12 de nov. 2020.

ROSEN, R.; WICHERT, G.; LO, G.; BETTENHAUSEN, K. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. **International Federation of Automatic Control**, 2015.

RWTH AACHEN UNIVERSITY. **Industrie 4.0 in der Zementindustrie** – Status quo und Perspektiven. Eine Studie im Auftrag der Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie. 2019.

SABBATINI, F. H. **Desenvolvimento de Métodos, Processos e Sistemas Construtivos**: Formulação e Aplicação de uma Metodologia. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SAID, H.; EL-RAYES, K. Automated multi-objective construction logistics optimization system, **Automation in Construction**. v. 43, p. 110–122, 2014.

SCHLATTER GROUP. Disponível em: <https://www.schlattergroup.com>, Acesso em: out. 2021.

SCHLUND, S.; BAAIJ, F. Describing the Technological Scope of Industry 4.0 – A Review of Survey Publications. **Scientific Journal of Logistics**. v. 14, n. 3, p. 341-353. 2018.

SCHNELL BRASIL. Disponível em: <https://www.schnellbrasil.com.br>, Acesso em: out. 2021.

SCHUH, G.; ANDERL, R.; GAUSEMEIER, J.; ten HOMPEL, M.; WAHLSTER, W. **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies** (ACATECH STUDY), Munich: Herbert Utz Verlag 2017.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. **Procedia Cirp** v.52, p.161–166, 2016.

SEBASTIAN, Rizal; VAN BERLO, Léon. Tool for benchmarking BIM performance of design, engineering and construction firms in the Netherlands. **Architectural engineering and design management**, v. 6, n. 4, p. 254-263, 2010.

SHAFTO, M. *et al.* **DRAFT - Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap**. NASA. Technology Area 11, 2010.

SHAFTO, M.; CONROY, M.; DOYLE, R.; GLAESSGEN, E.; KEMP, C.; LEMOIGNE, J.; WANG, L. **Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap**. NASA. Technology Area 11, 2012.

SÖDERBERG, R.; WÄRMEFJORD, K.; CARLSON, J.S.; LINDKVIST, L. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production. **CIRP Ann.** 66(1), 137–140, 2017.

STÄIB, G.; DÖRRHÖFER, A.; ROSENTHAL, M. **Components and Systems**. Modular Construction Design, Structure, New Technologies. Munique: Birkhäuser, 2008.

STOBIERSKI, T. The Advantages of Data-driven Decision-making. Harvard Business School Online. Disponível em: <https://online.hbs.edu/blog/post/data-driven-decision-making#:~:text=According%20to%20a%20survey%20of,who%20rely%20less%20on%20data..> Acesso em: 09/01/2021.

SUCCAR, Bilal. A Proposed Framework To Investigate Building Information Modelling Through Knowledge Elicitation and Visual Models. Conference Proceedings of The Australasian Universities Building Education Association, Melbourne, 2007.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, 18(3), p.357-375, 2009.

SUCCAR, B. Building Information Modelling maturity matrix. In J. Underwood & U. Isikdag (Eds.), Handbook of research on Building Information Modelling and construction informatics: concepts and technologies p. 65-103: **Information Science Reference**, IGI Publishing, 2010.

SUCCAR, B.; SHER, W.; WILLIAMS, A. Measuring BIM performance: five metrics. **Architectural Engineering and Design Management**, 8(2), 120-142, 2012.

SYSTEMA – Systementwicklung Dipl.-Inf. Manfred Austen GmbH. Automated Material Handling Systems (AMHS): An aspect of digital transformation in manufacturing. Disponível em: [https://www.systema.com/automated-material-handling-systems#:~:text=Automated%20Material%20Handling%20Systems%20\(AMHS\)&text=Automated%20material%20handling%20systems%20ensure,even%20in%20two%20separate%20buildings](https://www.systema.com/automated-material-handling-systems#:~:text=Automated%20Material%20Handling%20Systems%20(AMHS)&text=Automated%20material%20handling%20systems%20ensure,even%20in%20two%20separate%20buildings). Acesso em: mai. 2021.

SZTIPANOVITS, Janos et al. Toward a Science of Cyber–Physical System Integration. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE, 2012, v. 100, n. 1, p. 29-44.

TEICHOLZ, Paul. Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies. 2004. Disponível em: https://www.aecbytes.com/viewpoint/2004/issue_4.html. Acesso em: 25 de mar. 2021.

TEICHOLZ, Paul. Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies (Another Look). 2013. Disponível em: https://www.aecbytes.com/viewpoint/2013/issue_67.html. Acesso em: 25 de mar. 2021.

TERKAJ, W.; URGO, M. Ontology-based modeling of Production Systems for design and performance evaluation. 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2014.

VÄHÄ, Pentti *et al.* Extending automation of building construction—Survey on potential sensor technologies and robotic applications. **Automation in construction**, v. 36, p. 168-178, 2013.

VERNIKOS, V. Optimising building information modelling and off-site construction for civil engineering. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, v. 165, n. 4, p. 147-147. Thomas Telford Ltd, 2012.

VYATKIN, V.; SALCIC, Z.; ROOP, P. S.; FITZGERALD J. Now That's Smart! **Industrial Electronics Magazine**, IEEE, vol. 1, no. 4. pp. 17–29, 2007.

WADHWA, S.; RAO, K. S.; CHAN, F. T. S. Flexibility-enabled lead-time reduction in flexible systems, **International Journal of Production Research**, 43:15, 3131-3162, 2005.

WAGIRE, A.; JOSHI, R.; RATHORE, A.; JAIN, R. Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. **Production Planning & Control**, 2020.

WANG, Mudan *et al.* A systematic review of digital technology adoption in off-site construction: Current status and future direction towards industry 4.0. **Buildings**, v. 10, n. 11, p. 204, 2020.

WANG, Y.; MA, H.-S.; YANG, J.-H.; WANG, K.-S. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production, **Advances in Manufacturing**, v. 5 n. 4, p. 311-320, 2017.

WANG, Zhaojing *et al.* Precast supply chain management in off-site construction: A critical literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 1204-1217, 2019.

WARSZAWSKI, A. System Building - Education and Research. In: Construction Research International. Lancaster (GB), CIB, 1977. v.D, p.113-125. Anais do 7º Congresso do CIB.

WAYAND, B. What is a PLC? 2020. Disponível em: <https://www.mroelectric.com/blog/what-is-a-plc/>. Acesso em: mai. 2021

WECKENMANN. Disponível em: <https://weckenmann.com/pt/produtos>>, Acesso em: out. 2021.

WON, Jongsung; CHENG, Jack CP. Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. **Automation in Construction**, v. 79, p. 3-18, 2017.

YAN, J.; MENG, Y.; LI, L. Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance. **IEEE Access**. Special Section on Complex System Health Management Based on Condition Monitoring and Test Data. 2017

YILMAZ, Gokcen; AKCAMETE, Asli; DEMIRORS, Onur. A reference model for BIM capability assessments. **Automation in Construction**, v. 101, p. 245-263, 2019.

YIN, Xianfei *et al.* Building information modelling for off-site construction: Review and future directions. **Automation in Construction**, v. 101, p. 72-91, 2019.

ZEBAU. Disponível em: <https://zebau.com/machines/sba>>, Acesso em: out. 2021.

ZHAI, Yue *et al.* An Internet of Things-enabled BIM platform for modular integrated construction: A case study in Hong Kong. **Advanced engineering informatics**, v. 42, p. 100997, 2019.

ZHANG, Jinyue *et al.* BIM-enabled modular and industrialized construction in China. **Procedia engineering**, v. 145, p. 1456-1461, 2016.

ZHAO, LIU, MBACHU. Development of intelligent prefabs using IoT technology to improve the performance of prefabricated construction projects. **Sensors**, v. 19, n. 19, p. 4131, 2019.

ZHONG, Ray Y. *et al.* Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things. **Automation in Construction**, v. 76, p. 59-70, 2017.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

ITEM	PERGUNTA	0 pontos	25 pontos	50 pontos	75 pontos	100 pontos
11	Como se caracterizam os softwares de desenvolvimento de projetos em sua empresa?	Trabalhamos com projetos 2D desenvolvidos em AutoCAD ou outro software CAD equivalente.	Trabalhamos com projetos 2D desenvolvidos em AutoCAD ou outro software CAD equivalente. Utilizamos outros softwares de modelagem 3D não-semânticos como Sketchup para auxiliar na visualização.	Trabalhamos com ferramentas de projeto paramétrico 3D (como REVIT ou ArchiCAD, SolidWorks, SolidEdge, Inventor ou CATIA). Exportações do modelo 3D para pranchas 2D são necessárias para alimentar os processos de produção.	Trabalhamos com ferramentas de projeto paramétrico 3D apropriadas para nossos processos de produção. As ferramentas são capazes de gerar projetos executivos para produção em fábrica.	Trabalhamos com ferramentas de projeto paramétrico 3D apropriadas para nossos processos de produção. As ferramentas são capazes de gerar projetos executivos para produção em fábrica e gerar instruções computacionais necessárias para operação do maquinário.

12	Como se caracteriza a infraestrutura de rede para colaboração interna em projetos?	As soluções de rede são inexistentes ou provisórias. Indivíduos, organizações (único local / dispersos) e equipes de projeto usam qualquer que seja a ferramenta para se encontrar, comunicar e compartilhar dados. As partes interessadas não têm a infraestrutura de rede necessária para coletar, armazenar e compartilhar conhecimento.	As soluções para compartilhamento de informações e controle de acesso são identificadas dentro da organização. No projeto, as partes identificam as suas necessidades de compartilhamento de dados/informações. As organizações e as equipes de são conectadas por meio de conexões de banda relativamente baixas.	As soluções de rede para a coleta, armazenamento e compartilhamento do conhecimento dentro da organização e são geridas através de plataformas comuns. As ferramentas de gerenciamento de conteúdo e de ativos são implantadas para regular os dados através de conexões de banda larga.	As soluções de rede permitem múltiplas facetas do processo BIM para ser integrado através do compartilhamento em tempo real de dados, informações e conhecimento. As soluções incluem redes/portais de projeto específicos que permitem o intercâmbio de dados intensivos (troca interoperável) entre as partes interessadas.	As soluções de rede são continuamente avaliadas e substituídas pelas últimas inovações testadas. As redes facilitam a aquisição de conhecimento, armazenamento e compartilhamento entre todas as partes interessadas. A otimização dos canais de dados, processos e comunicações integradas é rígida.
13	Como se caracteriza a infraestrutura para colaboração em projetos com clientes externos?	Não há colaboração externa.	Trocamos informações por telefone, e-mail e aplicativos de mensagem por celular.	Trocamos informações por telefone, e-mail e aplicativos de mensagem por celular, mas possuímos procedimentos padronizados para garantir rastreabilidade das informações.	Utilizamos um serviço de armazenamento e sincronização de arquivos na nuvem.	Utilizamos uma plataforma de colaboração multidisciplinar em projetos pela nuvem.
14	Como se caracteriza a infraestrutura para colaboração em projetos com fornecedores externos?	Não há colaboração externa.	Trocamos informações por telefone, e-mail e aplicativos de mensagem por celular.	Trocamos informações por telefone, e-mail e aplicativos de mensagem por celular, mas possuímos procedimentos padronizados para garantir rastreabilidade das informações.	Utilizamos um serviço de armazenamento e sincronização de arquivos na nuvem.	Utilizamos uma plataforma de colaboração multidisciplinar em projetos pela nuvem.

15	Como se caracteriza a infraestrutura para colaboração em projetos com outros parceiros externos?	Não há colaboração externa.	Trocamos informações por telefone, e-mail e aplicativos de mensagem por celular.	Trocamos informações por telefone, e-mail e aplicativos de mensagem por celular, mas possuímos procedimentos padronizados para garantir rastreabilidade das informações.	Utilizamos um serviço de armazenamento e sincronização de arquivos na nuvem.	Utilizamos uma plataforma de colaboração multidisciplinar em projetos pela nuvem.
16	Como você caracteriza a integração do desenvolvimento de produto e produção de sua empresa? - Temos uma cultura de Desenvolvimento Integrado de Produtos, envolvendo profissionais de todos os setores.	Não.	-	Sim, parcialmente.	-	Sim, de forma padronizada e sistemática.
17	Como você caracteriza a integração do desenvolvimento de produto e produção de sua empresa? - Temos diretrizes para Design para Manufatura e Montagem.	Não.	-	Sim, parcialmente.	-	Sim, de forma padronizada e sistemática.

18	Qual é a porcentagem das etapas de produção que são mecanizadas?	Nossas etapas de produção são manuais com auxílio de ferramentas elétricas comuns de canteiro de obras.	Nossas etapas de produção são predominantemente manuais com auxílio de ferramentas elétricas comuns de canteiro de obras, mas temos algumas etapas mecanizadas (até 25% das etapas mecanizadas).	Nossas etapas de produção são predominantemente manuais com auxílio de ferramentas elétricas comuns de canteiro de obras, mas temos algumas etapas mecanizadas (de 25% a 50% das etapas mecanizadas).	Nossas etapas de produção são predominantemente mecanizadas (de 50% a 75% das etapas mecanizadas) com algumas atividades exigindo trabalho manual dos trabalhadores.	Nossas etapas de produção são predominantemente mecanizadas (acima de 75% das etapas mecanizadas) com algumas atividades exigindo trabalho manual dos trabalhadores .
19	Como são fornecidas as instruções de produção a funcionários do chão de fábrica?	Verbalmente ou em papel.	-	Em um computador no local de produção.	-	Em celular ou tablet.
110	Qual é a porcentagem das etapas de produção possuem máquinas automatizadas? Consideram-se automatizadas máquinas que executem uma operação mecânica com mínima intervenção humana.	Nossa empresa não possui máquinas automatizadas.	Nossa empresa possui algumas máquinas automatizadas (até 25% das etapas de produção).	Nossa empresa possui algumas máquinas automatizadas (de 25% a 50% das etapas de produção).	Grande parte de nossas máquinas são automatizadas (de 50% a 75% das etapas de produção).	A maior parte de nossas máquinas são automatizadas (acima de 75% das etapas de produção).

I11	A empresa utiliza máquinas controladas por comandos numéricos? Essas máquinas podem ajustar sua operação de forma flexível, com baixa ou nenhuma necessidade de configuração manual para iniciar um novo conjunto de instruções. Pode incluir atividades de corte, usinagem, soldagem, pintura, dosagem de composição química , etc.)	Não possuímos máquinas com comando numérico computacional.	Possuímos máquinas com comando numérico computacional para uma parte pequena das atividades de corte, usinagem, soldagem ou pintura (até 25% das etapas de produção).	Possuímos máquinas com comando numérico computacional para algumas das atividades de corte, usinagem, soldagem ou pintura (entre 25% e 50% das etapas).	Possuímos máquinas com comando numérico computacional para grande parte das atividades de corte, usinagem, soldagem ou pintura (entre 50% e 75% das etapas de produção).	Possuímos máquinas com comando numérico computacional para mais de 75% das atividades de corte, usinagem, soldagem ou pintura.
I12	A empresa utiliza robôs para atividades como manuseio, corte, usinagem, soldagem ou pintura?	Não possuímos robôs para atividades como manuseio, corte, usinagem, soldagem ou pintura.	Possuímos robôs para uma parte pequena das atividades de manuseio, corte, usinagem, soldagem ou pintura (até 25% das etapas de produção).	Possuímos robôs para algumas das atividades de manuseio, corte, usinagem, soldagem ou pintura (entre 25% e 50% das etapas).	Possuímos robôs para grande parte das atividades de manuseio, corte, usinagem, soldagem ou pintura (entre 50% e 75% das etapas de produção).	Possuímos robôs para mais de 75% das atividades de manuseio, corte, usinagem, soldagem ou pintura.
I13	O equipamento de produção de sua empresa possui capacidade de sensoriar, processar e comunicar dados?	Não possuímos máquinas com sensores e capacidade de processar e comunicar dados de produção.	Possuímos algumas máquinas com sensores e capacidade de processar e comunicar dados de produção (até 25% das etapas de produção).	Possuímos máquinas com sensores e capacidade de processar e comunicar dados de produção (entre 25% a 50% das etapas de produção).	Possuímos máquinas com sensores e capacidade de processar e comunicar dados de produção (entre 50% a 75% das etapas de produção).	Possuímos máquinas com sensores e capacidade de processar e comunicar dados de produção (mais de 75% das etapas de produção).

I14	A empresa usa tecnologias de identificação para rastrear e localizar ativos como produtos, peças, equipamentos ou pessoas nas várias áreas da fábrica?	Não utilizamos tecnologias de identificação.	Utilizamos código de barras ou QR Code para localizar e rastrear alguns de nossos ativos (até 50%).	Utilizamos código de barras ou QR Code para localizar e rastrear a maior parte de nossos ativos (mais de 50%).	Utilizamos RFID para localizar e rastrear alguns de nossos ativos (até 50%).	Utilizamos RFID para localizar e rastrear a maior parte de nossos ativos (mais de 50%).
I15	A empresa usa câmeras com reconhecimento de imagens para rastrear e localizar ativos como produtos, peças, equipamentos ou pessoas nas várias áreas da fábrica?	Não temos câmeras na fábrica.	Temos câmeras na fábrica mas não temos capacidade de reconhecimento de imagens.	Temos câmeras na fábrica e já experimentamos com reconhecimento de imagens para localização de ativos.	Temos câmeras na fábrica com capacidade de reconhecimento de imagens para localização de ativos em alguns locais da fábrica.	A maior parte da fábrica é monitorada por câmeras com reconhecimento de imagens para localização de ativos.
I16	A empresa utiliza sensores para monitorar qualidade da produção?	Não possuímos sensores para monitorar qualidade da produção.	Possuímos sensores para monitorar e registrar uma pequena parte (até 25%) das nossas métricas de qualidade de produção.	Possuímos sensores para monitorar e registrar uma parte (entre 25% e 50%) das nossas métricas de qualidade de produção .	Possuímos sensores para monitorar e registrar grande parte (entre 50% e 75%) das nossas métricas de qualidade de produção.	Possuímos sensores para monitorar e registrar a maior parte (acima de 75%) das nossas métricas de qualidade de produção.
I17	A empresa emprega câmeras com reconhecimento de imagens para monitorar qualidade da produção? (Entende-se que esses critérios de qualidade sejam detectáveis por visão humana a olho nu).	Não temos câmeras na fábrica.	Temos câmeras na fábrica mas não temos capacidade de reconhecimento de imagens.	Temos câmeras na fábrica e já experimentamos com reconhecimento de imagens para monitorar qualidade de produção.	Temos câmeras na fábrica com capacidade de reconhecimento de imagens para monitorar alguns critérios de qualidade de produção.	Temos câmeras na fábrica com capacidade de reconhecimento de imagens para monitorar a maior parte dos nossos critérios de qualidade de produção.

I18	A empresa possui rede para comunicação entre máquinas, sistemas de controle e sistemas de gestão da manufatura?	Não temos rede industrial para comunicação entre máquinas e sistemas de controle ou gestão.	-	A fábrica possui uma rede (ou redes) de comunicação industrial com fio como ControlNet, DeviceNet, HART ou Profibus.	-	A fábrica possui uma rede de comunicação industrial sem fio resiliente, de alta confiabilidade e baixa latência para monitoramento e controle de processos automatizados de fabricação.
I19	Qual é a porcentagem dos equipamentos de produção executando as seguintes funcionalidades? - Máquinas podem ser controladas por TI.	0%	Até 25%	Entre 25% e 50%	Entre 50% e 75%	Acima de 75%
I20	Qual é a porcentagem dos equipamentos de produção executando as seguintes funcionalidades? - Máquinas são capazes de se comunicar através de redes sem fio.	0%	Até 25%	Entre 25% e 50%	Entre 50% e 75%	Acima de 75%
I21	Qual é a porcentagem dos equipamentos de produção executando as seguintes funcionalidades? - Máquinas são capazes de se comunicar pela internet.	0%	Até 25%	Entre 25% e 50%	Entre 50% e 75%	Acima de 75%

I22	Qual é a porcentagem dos equipamentos de produção executando as seguintes funcionalidades? - Máquinas são capazes de comunicar com outras máquinas.	0%	Até 25%	Entre 25% e 50%	Entre 50% e 75%	Acima de 75%
I23	Qual é a porcentagem dos equipamentos de produção executando as seguintes funcionalidades? - Máquinas de diferentes fabricantes possuem interoperabilidade para integração e colaboração.	0%	Até 25%	Entre 25% e 50%	Entre 50% e 75%	Acima de 75%
I24	Qual é o grau de adaptabilidade dos equipamentos de produção para as seguintes funcionalidades? - Máquinas podem ser controladas por TI.	Upgrade não possível	Upgrade difícil e/ou custoso	Upgrade relativamente simples	Funcionalidade já disponível mas não utilizada	Funcionalidade já em operação
I25	Qual é o grau de adaptabilidade dos equipamentos de produção para as seguintes funcionalidades? - Máquinas são capazes de se comunicar através de redes sem fio.	Upgrade não possível	Upgrade difícil e/ou custoso	Upgrade relativamente simples	Funcionalidade já disponível mas não utilizada	Funcionalidade já em operação

I26	Qual é o grau de adaptabilidade dos equipamentos de produção para as seguintes funcionalidades? - Máquinas são capazes de se comunicar pela internet.	Upgrade não possível	Upgrade difícil e/ou custoso	Upgrade relativamente simples	Funcionalidade já disponível mas não utilizada	Funcionalidade já em operação
I27	Qual é o grau de adaptabilidade dos equipamentos de produção para as seguintes funcionalidades? - Máquinas são capazes de comunicar com outras máquinas.	Upgrade não possível	Upgrade difícil e/ou custoso	Upgrade relativamente simples	Funcionalidade já disponível mas não utilizada	Funcionalidade já em operação
I28	Qual é o grau de adaptabilidade dos equipamentos de produção para as seguintes funcionalidades? - Máquinas de diferentes fabricantes possuem interoperabilidade para integração e colaboração.	Upgrade não possível	Upgrade difícil e/ou custoso	Upgrade relativamente simples	Funcionalidade já disponível mas não utilizada	Funcionalidade já em operação

I29	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Tempos de processamento.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I30	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Utilização da capacidade do equipamento.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I31	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Resíduos de produção.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I32	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Taxa de erro.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.

I33	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Utilização de funcionários.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I34	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Dados de posição.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I35	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Dados sobre o processamento restante.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I36	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Tempos de transição.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.

I37	Quais dados sobre suas máquinas, processos e produtos, bem como defeitos e suas causas, são coletados durante a produção e como são coletados? - Eficácia geral do equipamento.	Não coletado.	-	Coleta de dados manual.	-	Coleta de dados automática.
I38	Dados e informações de setores diferentes e sistemas de informações diferentes são coordenados, integrados e consistentes entre si?	Não. As informações existem em silos independentes.	Sistemas de informações são independentes com um nível baixo de integração e coordenação entre si.	Sistemas de informações são independentes com um nível razoável de integração e coordenação entre si.	Sistemas de informações são independentes com um nível alto de integração e coordenação entre si.	Sistemas de informações são completamente integrados e coordenados entre si.
I39	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados)	Não.	-	-	-	Sim.
I40	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - MES (Sistemas de Execução de Fabricação)	Não.	-	-	-	Sim.
I41	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - ERP (Sistema Integrado de Gestão Empresarial)	Não.	-	-	-	Sim.

I42	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - PLM (Gerenciamento de Ciclo de Vida de Produto)	Não.	-	-	-	Sim.
I43	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - SCM (Gestão da Cadeia de Suprimentos)	Não.	-	-	-	Sim.
I44	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - PDM (Gerenciamento de Dados do Produto)	Não.	-	-	-	Sim.
I45	Qual dos seguintes sistemas de TI sua empresa utiliza? - PPS (Sistema de Planejamento de Produção)	Não.	-	-	-	Sim.
I46	A empresa analisa os dados de gestão, projeto, produção, logística e qualidade para - identificar oportunidades de melhorias em produtividade?	Não.	Sim, por funcionários.	Sim, por funcionários e de forma multidisciplinar.	Sim, automaticamente.	Sim, automaticamente e de forma multidisciplinar.

I47	A empresa analisa os dados de gestão, projeto, produção, logística e qualidade para - identificar oportunidades de melhorias em qualidade?	Não.	Sim, por funcionários.	Sim, por funcionários e de forma multidisciplinar.	Sim, automaticamente.	Sim, automaticamente e de forma multidisciplinar.
I48	A empresa analisa os dados de gestão, projeto, produção, logística e qualidade para - monitorar riscos operacionais?	Não.	Sim, por funcionários.	Sim, por funcionários e de forma multidisciplinar.	Sim, automaticamente.	Sim, automaticamente e de forma multidisciplinar.
I49	A empresa analisa os dados de gestão, projeto, produção, logística e qualidade para - prever necessidades de manutenção em equipamentos?	Não.	Sim, por funcionários.	Sim, por funcionários e de forma multidisciplinar.	Sim, automaticamente.	Sim, automaticamente e de forma multidisciplinar.
I50	A empresa analisa os dados de gestão, projeto, produção, logística e qualidade para - otimizar o consumo de recursos materiais e energéticos?	Não.	Sim, por funcionários.	Sim, por funcionários e de forma multidisciplinar.	Sim, automaticamente.	Sim, automaticamente e de forma multidisciplinar.
I51	A empresa analisa os dados de gestão, projeto, produção, logística e qualidade para - orientar o desenvolvimento de novos produtos?	Não.	Sim, por funcionários.	Sim, por funcionários e de forma multidisciplinar.	Sim, automaticamente.	Sim, automaticamente e de forma multidisciplinar.

I52	A empresa executa simulações probabilísticas de suas operações baseadas em dados reais de campo a fim de apoiá-la na tomada de decisões?	Não.	Sim, executamos simulações probabilísticas das operações mas não temos processos padronizados para executá-los sistematicamente.	Sim, as simulações probabilísticas são feitas por funcionários e temos processos padronizados para executar essas análises sistematicamente.	As simulações probabilísticas são feitas por funcionários com algum nível de automação. Temos processos padronizados para executar essas análises sistematicamente.	As simulações probabilísticas são feitas automaticamente e resultados são realimentados ao processo de maneira sistemática.
I53	A empresa executa simulações baseadas em modelos físicos de processos de produção críticos a fim apoiá-la na tomada de decisões?	Não.	Sim, executamos simulações físicas de processos de produção críticos mas não temos processos padronizados para executá-los sistematicamente.	Sim, as simulações físicas de processos de produção críticos são feitas por funcionários e temos processos padronizados para executar essas análises sistematicamente.	As simulações físicas de processos de produção críticos são feitas por funcionários com algum nível de automação. Temos processos padronizados para executar essas análises sistematicamente.	As simulações físicas de processos de produção críticos são feitas automaticamente e resultados são realimentados ao processo de maneira sistemática.
I54	As operações de sua empresa possuem visibilidade digital em tempo real? - Produção.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I55	As operações de sua empresa possuem visibilidade digital em tempo real? - Logística interna do chão de fábrica.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I56	As operações de sua empresa possuem visibilidade digital em tempo real? - Logística de entrada e estoque de insumos.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.

I57	As operações de sua empresa possuem visibilidade digital em tempo real? - Logística de saída e entregas.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I58	Os dados de operações de sua empresa possuem rastreabilidade histórica consistente? - Produção.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I59	Os dados de operações de sua empresa possuem rastreabilidade histórica consistente? - Logística interna do chão de fábrica.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I60	Os dados de operações de sua empresa possuem rastreabilidade histórica consistente? - Logística de entrada e estoque de insumos.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I61	Os dados de operações de sua empresa possuem rastreabilidade histórica consistente? - Logística de saída e entregas.	Não.	-	Sim, mas somente em pontos específicos.	-	Sim, em todos os pontos relevantes a tomada de decisão.
I62	Quão avançada é a sua integração de TI com clientes?	Nenhuma integração de TI.	-	Alguma integração de TI com os principais.	-	Integração completa - interfaces para troca eficiente e segura de dados em tempo real através da nuvem.

I63	Quão avançada é a sua integração de TI com fornecedores?	Nenhuma integração de TI.	-	Alguma integração de TI com os principais.	-	Integração completa - interfaces para troca eficiente e segura de dados em tempo real através da nuvem.
I64	Quão avançada é a sua integração de TI com parceiros?	Nenhuma integração de TI.	-	Alguma integração de TI com os principais.	-	Integração completa - interfaces para troca eficiente e segura de dados em tempo real através da nuvem.
I65	A empresa utiliza um AMHS (sistema automático de movimentação de materiais) ou AGVs (veículos guiados automaticamente) para transporte interno de materiais, insumos ou equipamentos? Esses sistemas funcionam de forma autônoma e têm consciência do entorno que os faz trabalhar em colaboração com o ser humano.	Não.	Sim. Temos alguns AMHS ou AGVs exercendo um número limitado de atividades de transporte interno (até 25% da atividades de transporte interno).	Sim. Entre 25% e 50% das atividades de transporte interno são exercidas por AMHS ou AGVs de forma coordenada e confiável.	Sim. Entre 50% e 75% das atividades de transporte interno são exercidas por AMHS ou AGVs de forma coordenada e confiável.	Sim. Temos AMHS ou AGVs exercendo a maior parte das atividades de transporte interno de materiais, insumos e equipamentos, de forma coordenada e confiável (acima de 75% da atividades de transporte interno).
I66	As máquinas do sistema de manufatura de sua empresa podem se ajustar flexivelmente e eficientemente para manufatura de novos produtos?	Não. Ajustes para produção de novos produtos são muito demorados e custosos.	Ajustes para produção de novos produtos são demorados e custosos. Modificações ao processo produtivo exigem planejamento operacional cuidadoso.	Ajustes para produção de novos produtos são relativamente demorados e custosos. Modificações ao processo produtivo ainda exigem planejamento operacional cuidadoso.	Ajustes para produção de novos produtos são relativamente simples e baratos.	Ajustes para produção de novos produtos são bastante simples e baratos. Nossa produção se ajusta de forma bastante dinâmica.

167	A empresa possui máquinas capazes de ajustar sua operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas?	Não.	Sim. Já fizemos experimentos com máquinas com capacidade de ajustar a operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas.	Sim. Temos algumas máquinas com capacidade de ajustar a operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas (até 25% das máquinas).	Sim. Entre 25% e 50% das nossas etapas de produção possuem máquinas com capacidade de ajustar a operação de acordo com informações recebidas de outras máquinas.	O sistema de produção da nossa empresa permite que máquinas se comuniquem e se ajustem de forma autônoma a requisitos de produção customizados e parâmetros técnicos monitorados a fim de otimizar a eficácia operacional.
168	O sistema de manufatura de sua empresa pode reagir dinamicamente e eficientemente a flutuações de demanda e outras incertezas como falhas de máquinas e variações nos tempos de processamento?	Não. O controle da produção é executado por funcionários.		Sim parcialmente. Alguns parâmetros de produção se ajustam automaticamente. No entanto, o comando geral é exercido por funcionários.		Sim. O sistema de manufatura integra informações de diversos setores e reage dinamicamente e autonomamente a fim de otimizar métricas de desempenho operacional.

APÊNDICE B – MATRIZ DE PESOS

I	DIMENSÃO TECNOLÓGICA							DIMENSÃO OPERACIONAL								DIMENSÃO DE OBJETIVOS DA I4.0		
	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	EOP	ID	IP
Item	Tecnologias de Projeto	Máquinas de Produção	Redes Industriais	Sensores	Análítica de Dados	Gêmeos Digitais	Sistemas de Produção Ciberfísicos	Desenvolvimento de Projeto	Entrada de Parâmetros de Produção	Produção	Logística	Captura de Dados	Transmissão de Dados	Armazenamento e Processamento de Dados	Aplicações Avançadas	Eficiência Operacional	Integração Digital	Individualização da Produção
11	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1818	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0060	0.0048
12	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1455	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0073	0.0035
13	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0909	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0040	0.0066	0.0062
14	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0909	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0055	0.0069	0.0054
15	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0545	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0040	0.0059	0.0046
16	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1455	0.0000	0.0260	0.0218	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0057	0.0053
17	0.1389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1455	0.0000	0.0260	0.0218	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0064	0.0052	0.0043
18	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0056	0.0032	0.0035
19	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1887	0.0208	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0049	0.0055	0.0045
110	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063	0.0049	0.0044
111	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0000	0.1887	0.0182	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0057	0.0048	0.0059
112	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0000	0.1887	0.0182	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065	0.0047	0.0038
113	0.0000	0.0000	0.0424	0.2000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0000	0.0355	0.0169	0.0146	0.0000	0.0061	0.0065	0.0055
114	0.0000	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0064	0.0060	0.0054
115	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0045	0.0059	0.0044
116	0.0000	0.0000	0.0000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0104	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0041	0.0022
117	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0078	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0041	0.0029

118	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0050	0.0075	0.0060
119	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0000	0.1887	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0042	0.0069	0.0052
120	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0031	0.0055	0.0035
121	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0031	0.0060	0.0038
122	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0050	0.0065	0.0051
123	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0058	0.0073	0.0065
124	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.1887	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0065	0.0058
125	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0034	0.0057	0.0037
126	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0035	0.0057	0.0034
127	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0048	0.0062	0.0045
128	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0847	0.0000	0.0000	0.0055	0.0073	0.0055
129	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063	0.0057	0.0019
130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0066	0.0052	0.0015
131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0060	0.0030	0.0004
132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063	0.0036	0.0008
133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0068	0.0036	0.0020
134	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0064	0.0044	0.0024
135	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0068	0.0044	0.0013
136	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0068	0.0041	0.0021
137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0177	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0068	0.0043	0.0024
138	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0053	0.0054	0.0048
139	0.0000	0.0000	0.0254	0.0000	0.0177	0.0532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0284	0.0254	0.0146	0.0000	0.0053	0.0056	0.0049
140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0265	0.0532	0.0000	0.0000	0.0566	0.0208	0.0087	0.0142	0.0169	0.0146	0.0000	0.0058	0.0057	0.0048
141	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0055	0.0056	0.0045
142	0.0278	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0545	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0341	0.0000	0.0057	0.0057	0.0049
143	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0066	0.0055	0.0043
144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0208	0.0087	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0054	0.0057	0.0061
145	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0064	0.0053	0.0049
146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0244	0.0714	0.0068	0.0037	0.0012
147	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0244	0.0714	0.0063	0.0031	0.0010
148	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0244	0.0714	0.0066	0.0035	0.0000
149	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0244	0.0714	0.0070	0.0040	0.0006
150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0244	0.0714	0.0062	0.0029	0.0006

151	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0885	0.0000	0.0000	0.0909	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0244	0.0714	0.0057	0.0039	0.0030
152	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0442	0.0532	0.0714	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0066	0.0042	0.0021
153	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0442	0.0532	0.0714	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0055	0.0038	0.0028
154	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0060	0.0062	0.0037
155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0066	0.0062	0.0043
156	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0060	0.0056	0.0042
157	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0056	0.0057	0.0036
158	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0055	0.0051	0.0024
159	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0055	0.0051	0.0024
160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0055	0.0051	0.0024
161	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0488	0.0000	0.0052	0.0051	0.0024
162	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0593	0.0146	0.0000	0.0039	0.0064	0.0055
163	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0593	0.0146	0.0000	0.0045	0.0063	0.0047
164	0.0000	0.0000	0.0424	0.0000	0.0000	0.0266	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0593	0.0146	0.0000	0.0043	0.0059	0.0049
165	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0053	0.0050	0.0032
166	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0055	0.0059	0.0072
167	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0000	0.0000	0.0130	0.0218	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0053	0.0063	0.0070
168	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0000	0.0000	0.0260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.0066	0.0059	0.0068
SOMA	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3785	0.3620	0.2594