



UFAM

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM,

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-PPGEP

MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



MODELO DE MATURIDADE DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL

ALBERTO ANTÔNIO TUMA NETO

MANAUS
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-PPGEP
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ALBERTO ANTÔNIO TUMA NETO

MODELO DE MATURIDADE DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção, área de concentração: Tecnologias Emergentes.

Orientador: Prof. Dr. Armando Araújo de Souza Junior.

MANAUS

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

T925m Tuma Neto, Alberto Antonio
Modelo de maturidade de tecnologias da Indústria 4.0 para a
construção civil / Alberto Antonio Tuma Neto . 2022
87 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Armando Araújo de Souza Júnior
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Inovação. 2. Indústria 4.0. 3. Construção civil. 4. Engenharia. 5.
Modelo de maturidade. I. Souza Júnior, Armando Araújo de. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

ALBERTO ANTÔNIO TUMA NETO

MODELO DE MATURIDADE DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção, área de concentração: Tecnologias Emergentes.

Aprovada em 27 de outubro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Armando Araújo de Souza Júnior, Presidente
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, Membro
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

Prof. Dr. Manoel Carlos de Oliveira Júnior, Membro Externo
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

“O mundo que criamos é um processo do
nosso pensamento. Ele não pode ser
mudado sem mudar nosso pensamento”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, criador do universo e todas as coisas, pelo zelo que Ele tem por mim.

À minha família, em especial aos meus pais Átila e Waldia, que me trouxeram ao mundo e seguem sendo meus melhores orientadores na vida, agradeço por todo o suporte para minha formação intelectual e cultural.

À Lica, pelo apoio e por ser minha parceira em tudo.

Ao Ananias (*in memoriam*) por me ensinar, com sua maneira simples e espontânea, a Engenharia que não está nas salas de aula e livros.

À Gleica pela amizade e grande ajuda na reta final dessa dissertação de mestrado, agradeço pelas valorosas contribuições.

Ao meu professor e orientador, Dr. Armando Araújo de Souza Júnior, pelos conhecimentos transmitidos e inúmeras revisões e correções realizadas para aprimorar meu trabalho.

Agradeço à UFAM, em especial aos professores e colaboradores do PPGEP por toda dedicação ao curso e apoio prestado durante os últimos anos.

Aos colegas da turma pela parceria nos diversos trabalhos, provas e apresentações.

Agradeço à SUFRAMA por essa oportunidade única concedida a nós servidores dessa nobre Autarquia.

RESUMO

A Quarta Revolução Industrial, mais conhecida como Indústria 4.0, é considerada a evolução dos processos produtivos industriais, já sendo uma realidade em setores como o aeronáutico e automobilístico, e avança para outras áreas como a construção civil. Esperam-se grandes ganhos de produtividade e flexibilidade, que tendem a intensificar a competitividade global, promover mudanças sociais e desenvolvimento econômico, além de estimular novos trabalhos acadêmicos, como a proposição de modelos capazes de identificar o nível de maturidade de uma organização nesse contexto. Portanto, o presente trabalho propõe um modelo de maturidade para mensurar o nível de maturidade das empresas de construção civil quanto à adoção de tecnologias e práticas da Indústria 4.0. O modelo proposto foi construído a partir de modelos de maturidade existentes e é sustentado por um questionário elaborado de vinte e três questões considerando quatro dimensões (Tecnologia, Organização, Pessoas e Sustentabilidade) que foi submetido a sete empresas diferentes da cidade de Manaus/Brasil. Os resultados após a aplicação prática do modelo mostraram que as empresas já adotam tecnologias e princípios da Indústria 4.0 em diferentes níveis, entretanto, ficou evidente que há muito espaço para melhorias.

Palavras-chave: Inovação; Indústria 4.0; Construção Civil; Engenharia; Modelo de Maturidade.

ABSTRACT

The Fourth Industrial Revolution, better known as Industry 4.0, is considered the evolution of industrial production processes, already being a reality in sectors such as aeronautics and automobiles, and advancing to other areas such as civil construction. Great gains in productivity and flexibility are expected, which tend to intensify global competitiveness, promote social changes and economic development, in addition to stimulating new academic works, such as the proposition of models capable of identifying the level of maturity of an organization in this context. Therefore, the present work proposes a maturity model to measure the maturity level of civil construction companies regarding the adoption of Industry 4.0 technologies and practices. The proposed model was built from existing maturity models and is supported by a questionnaire made up of twenty-three questions considering four dimensions (Technology, Organization, People and Sustainability) that was submitted to seven different companies in the city of Manaus/Brazil. The results after the practical application of the model showed that the companies have already adopted I4.0 principles and technologies, although it is evident that there is a lot of room for improvement.

Keywords: Innovation; Industry 4.0; Construction; Engineering; Maturity Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0	24
Figura 2 - Robô semi automated mason (SAM).....	38
Figura 3 - Robô In situ Fabricator	38
Figura 4 - Os níveis de maturidade de processos a partir do CMM.....	43
Figura 5 - Níveis de maturidade do Modelo ACATECH.....	46
Figura 6 - Construção do Modelo.....	51
Figura 7 - Etapas para desenvolvimento de modelo de maturidade.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revoluções Industriais e suas tecnologias correspondentes	23
Quadro 2 - Dificuldades identificadas na indústria da construção civil.....	33
Quadro 3 - Tipos de modelos de maturidade	41
Quadro 4 - Aspectos dos Modelos de Maturidade	42
Quadro 5 - Resumo dos níveis de maturidade do modelo CMM.....	44
Quadro 6 - Níveis de Capabilidade e Maturidade do CMMI.....	45
Quadro 7 - Modelos de maturidade da Indústria 4.0.....	47
Quadro 8 - Combinações de palavras-chave	48
Quadro 9 - Exemplo de pergunta do questionário.....	54
Quadro 10 - Procedimentos metodológicos	56
Quadro 11 - Dimensões do Modelo	61
Quadro 12 - Níveis de Maturidade	62
Quadro 13 - Nível de maturidade dos participantes.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espelho das respostas das empresas participantes da pesquisa. 63

Tabela 2 – Média simples das respostas das empresas participantes da pesquisa..... 64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados da empresa 1 por dimensão	64
Gráfico 2 - Resultados da empresa 2 por dimensão	65
Gráfico 3 - Resultados da empresa 3 por dimensão	65
Gráfico 4 - Resultados da empresa 4 por dimensão	66
Gráfico 5 - Resultados da empresa 5 por dimensão	66
Gráfico 6 - Resultados da empresa 6 por dimensão	67
Gráfico 7 - Resultados da empresa 7 por dimensão	67

LISTA DE SIGLAS

ACATECH - *NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING*

AR – REALIDADE AUMENTADA

BIM – *BUILDING INFORMATION MODELING*

CAD – *COMPUTER AIDED DESIGN*

CMM – *CAPABILITY MATURITY MODEL*

CMMI – *CAPABILITY MATURITY MODEL INTEGRATED*

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA

CPS – *CYBER-PHYSICAL SYSTEM*

DFAB – *DIGITAL FABRICATION*

FIRJAN – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

I4.0 – INDÚSTRIA 4.0

IoT – *INTERNET OF THINGS*

IoS – *INTERNET OF SERVICES*

OECD - ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO

P&D – PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

PIB – PRODUTO INTERNO BRUTO

RFID - *RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Situação problemática	15
1.3	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.4	Justificativa	17
1.5	Estrutura da Dissertação	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Indústria 4.0	19
2.1.1	Big Data	25
2.1.2	Robôs autônomos	26
2.1.3	Realidade aumentada	27
2.1.4	Manufatura aditiva	28
2.1.5	Simulações	29
2.1.6	Integração de sistemas	30
2.1.7	<i>Internet</i> das coisas	30
2.1.8	Computação em nuvem	31
2.1.9	Cibersegurança	31
2.2	Construção Civil	32
2.3	Tecnologias 4.0 voltadas para a construção civil	34
2.4	Modelo de Maturidade	39
2.4.1	<i>Capability Maturity Model (CMM)</i>	42
2.4.2	<i>Capability Maturity Model Integrated (CMMI)</i>	44
2.4.3	Modelos de Maturidade da Indústria 4.0	45
2.5	Modelos de Maturidade da Indústria 4.0 para a Construção Civil	48
3	PERCURSO METODOLÓGICO	49
3.1	Natureza da Pesquisa	49
3.2	Objetivos da Pesquisa	50

3.3	Abordagem da Pesquisa	50
3.4	Proposição do Modelo	51
3.5	Procedimentos da Pesquisa	52
3.6	Coleta de Dados	52
3.7	Análise de Dados.....	55
3.8	Operacionalização da Pesquisa	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Apresentação do Modelo de Maturidade	57
4.1.1	Apresentação das Dimensões	60
4.1.2	Apresentação dos Níveis de Maturidade.....	61
4.2	Aplicação do Modelo de Maturidade	62
4.3	Diagnóstico das tecnologias utilizadas.....	69
4.4	DIFICULDADES PARA ADOÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS.....	71
4.5	COMPARAÇÃO TECNOLOGIAS NOVAS X TRADICIONAIS	71
5	CONCLUSÃO	73
6	CONTRIBUIÇÕES.....	74
6.1	Contribuições Acadêmicas.....	74
6.2	Contribuições Sociais.....	74
6.3	Contribuições Econômicas.....	74
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A construção civil é um dos setores mais relevantes para o desenvolvimento de qualquer economia mundial, já que é capaz de gerar milhares de empregos diretos, além de outros milhares de empregos indiretos em outros setores industriais, como os da ciência e tecnologia, e movimentar uma alta quantidade de capital financeiro (THOMAS; SUDHAKUMAR, 2014; VIEIRA; NOGUEIRA, 2018).

A economia brasileira é dividida em três setores: Agropecuária, Indústria e Serviços, estando a Construção Civil inserida no setor da Indústria, sendo grande responsável pelo desenvolvimento e produção nacional (FIRJAN, 2014). Vários estudos, entre eles o do *World Bank* (1984), confirmam que há uma forte conexão entre a indústria da construção civil e a economia, onde mutações de demanda geram reflexos direta e indiretamente em diversas áreas econômicas, seja no fornecimento dos insumos de produção ou nos níveis de emprego.

No cenário brasileiro, a construção civil é o setor que mais contribui para a redução da pobreza no país quando comparado a outros ramos econômicos. A atividade tem considerável papel econômico na criação de empregos, renda, impostos e valor adicionado. O setor se destaca pela grande quantidade de atividades envolvidas no seu ciclo de produção e heterogeneidade de companhias, trabalhadores e tecnologias utilizadas (GHINIS; FOCHEZATTO, 2013; TEIXEIRA; CARVALHO, 2005).

Os investimentos realizados na construção civil influem diretamente no desempenho dos demais setores industriais, nos setores de serviços e na agricultura e, assim, contribuem de maneira essencial para a expansão do PIB (Souza *et al.* 2015; VIEIRA; NOGUEIRA, 2018).

A indústria da construção civil sempre teve grande importância para a economia brasileira. Dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção mostram que em 2020 o setor teve participação de 3,3% do PIB brasileiro. Entretanto, em períodos recentes de maior atividade econômica, como nos anos de 2012 e 2013, essa participação chegou a 6,5%. De maneira similar, os dados de mão de obra também atestam a relevância da construção civil para o país, já que em 2019 foram registrados mais de dois milhões de empregos formais no setor.

Como outros setores, a construção civil tem passado por transformações, apesar de nunca ter protagonismo na adoção de tecnologias. De acordo com Soto *et al.* (2019), o termo Construção 4.0 é a correspondência da Indústria 4.0 no setor da construção civil e se refere à digitalização e automação dessa indústria.

A Construção 4.0 visa à implantação de um ambiente de construção virtual capaz de contemplar todo o ciclo de vida de um projeto com o auxílio de diferentes tecnologias. Logo, essa nova forma de construir é capaz de mudar não apenas os processos produtivos usuais, como também integrar toda uma indústria que hoje é altamente fragmentada (RASTOGI, 2017; SOTO *et al.*, 2019).

1.2 Situação problemática

Apesar de sua grande capacidade industrial, devido às particularidades dos processos produtivos e de mercado desse setor, as teorias organizacionais e de gestão, usualmente empregadas nas indústrias de bens e de consumo, encontram barreiras para serem utilizadas (FRIGIERI E ZILBOVICIUS 2002). Características inerentes à construção civil como baixa produtividade, falta de políticas de recursos humanos, pouca integração das várias fases do processo produtivo, dificuldades de manter padrões de qualidade e elevados patamares de desperdícios são exemplos de barreiras que podem ser encontradas (GRISI e SEVERIANO, 2002).

No geral, as construções brasileiras são caracterizadas pela falta de qualidade, atrasos e desperdícios. A baixa eficiência e qualidade produtiva, aliadas à baixa qualificação profissional e grande rotatividade de mão de obra podem ser apontadas como alguns dos fatores que dificultam a evolução do setor. A falta de planejamento e gestão são também entraves das construtoras, que enxergam as obras apenas pela ótica construtiva e sem maiores preocupações com processos gerenciais (SOUTO, 2006; MELLO, 2007).

As inovações tecnológicas não são tão facilmente adotadas nos processos produtivos das empresas construtoras. O investimento em capacitação da mão de obra para que se possa utilizar novas tecnologias de gestão e para realização de P&D dentro das empresas são alguns dos desafios a serem superados ainda nesta década para que haja uma evolução tecnológica na construção civil (FIRJAN, 2014).

Na visão de Koskela (2000), as transformações ocorridas na indústria, principalmente após a segunda Guerra Mundial, proporcionaram aumento da complexidade dos produtos e de seus respectivos processos, o que vem exigindo mudanças também nos sistemas de desenvolvimento de produtos na indústria da construção civil. Rodrigues (2016) aponta, que o setor tem apostado em novos métodos e técnicas, originários de outros setores industriais, com o fito de aprimorar o planejamento e controle produtivo.

De acordo com Zapparoli (2019), apesar de estar atrasado em relação ao resto do mundo, o setor de construção civil nacional está adotando inovações tecnológicas que hoje já são empregadas em outras áreas, assim como projetos realizados em ambientes virtuais que proporcionam maior controle das etapas construtivas e de mão de obra estão sendo cada vez mais adotados pelas empresas. O setor saiu das ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) para o BIM (*Building Information Modeling*), o que representa uma grande mudança de prática e inovação da construção civil (CASTELO *et al.*, 2018; LEUSIN, 2018).

Diante desse cenário, a questão norteadora da pesquisa foi definida como: Quais tecnologias da Indústria 4.0 estão sendo utilizadas na indústria da construção civil?

1.3 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de maturidade da indústria 4.0 para a construção civil.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as tecnologias da indústria 4.0 utilizadas na construção civil;
- Analisar as dificuldades para a utilização das tecnologias da indústria 4.0 pelas empresas locais de construção civil.
- Comparar os benefícios das tecnologias 4.0 em relação às técnicas tradicionais empregadas na construção civil;

1.4 Justificativa

Nas últimas décadas o setor da construção civil brasileira passou por diferentes cenários, sempre influenciados pelos quadros político-econômicos do país, assim, observa-se um setor que experimentou muitos períodos de estagnação (SOUZA, 2012). Para Fabricio (2008), esse cenário de instabilidade gerou desestímulo de investimento nos grandes projetos de infraestrutura e nas mudanças na base técnica da construção.

Constituído por um grande número de pequenas e médias empresas, o setor da construção civil é altamente fragmentado e competitivo, sendo observadas algumas práticas em seus processos produtivos a fim de reduzir custos e melhorar a qualidade de seus produtos para enfrentar um mercado cada vez mais competitivo, exigente e informado (LI *et al.*, 2001; ZANETTI, 2002).

Segundo o Manual de Oslo da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD (2005), inovação é a “a implementação de um produto (bem ou serviço) novo ou significativamente melhorado, ou um processo, ou um novo método de marketing, ou novo método organizacional nas práticas de negócios, na organização do local de trabalho ou nas relações externas”. Para Loosemore (2014), a inovação acaba sendo um fator de vantagem competitiva, onde velhas ideias são substituídas por novas ideias, a partir de uma invenção ou de uma tecnologia já existente.

Nesse contexto, a adoção de inovações se apresenta como alternativa para suprir as necessidades do setor da construção, proporcionando redução de custos de produção, aumento de produtividade e diminuição da mão de obra empregada (BOUGRAIN, 2010; GAMBATESE; HALLOWELL, 2011). Adicionalmente, Vargas (1992) aponta que o emprego de novas tecnologias melhora as condições de trabalho, aumenta o ritmo das construções, otimiza o emprego da mão de obra e acaba por aprimorar a qualidade do produto final.

Sétima maior cidade do Brasil em termos populacionais, Manaus desponta como um importante centro de desenvolvimento no norte do país. Sede de um grande polo industrial, a cidade recebeu grandes obras na última década e atualmente possui um importante mercado imobiliário. Dados do Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatísticas apontaram um crescimento de 10,82% do setor de construção civil do Amazonas em 2020, apesar dos efeitos da pandemia do coronavírus.

A partir dos aspectos citados, o presente trabalho se propôs a fazer uma avaliação da aplicação de tecnologias da indústria 4.0 no setor da construção civil, e tendo como foco a cidade de Manaus, verificar os recursos e tecnologias atualmente utilizados, as possíveis dificuldades em suas adoções e os benefícios observados pelas construtoras locais.

Assim, no âmbito teórico esse estudo é relevante ao abordar conceitos da Indústria 4.0 e seus pilares, além de associá-los ao campo da engenharia ao identificar as tecnologias mais relevantes aplicadas à construção civil, e auxiliar futuras pesquisas relacionadas à área. Destaca-se também a contribuição à temática proposta a partir da aplicação prática da mensuração de adoção de novas tecnologias em empresas da construção civil.

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. A introdução apresentou as considerações prévias da pesquisa com a contextualização do tema, a exposição da situação problemática, os objetivos almejados e a justificativa do estudo.

O segundo capítulo contém uma revisão da literatura onde são abordados os principais conceitos de Indústria 4.0, sua origem e seus pilares, além das mais recentes tecnologias empregadas na indústria da construção civil, com o intuito de servir como embasamento teórico e nortear a pretendida pesquisa.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos e as ferramentas escolhidos e utilizados na realização da pesquisa, além da descrição da forma de coleta de dados e o tratamento subsequente. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com a pesquisa após aplicação do modelo de maturidade, enquanto o quinto capítulo apresenta as considerações finais do trabalho. O último capítulo trata das contribuições acadêmicas, sociais e econômicas da dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria 4.0

O primeiro uso do termo *Industrie 4.0* é datado de 2011, durante a Feira de Hannover, sendo essa um tradicional ponto de encontro global de vários segmentos industriais. Em 2013 houve a adoção oficial do termo para designar a iniciativa alemã de se manter pioneira mundial nas inovações que atualmente estão transformando o setor da manufatura. A Indústria 4.0 simboliza o início da Quarta Revolução Industrial (ALEXOPOULOS *et al.*, 2016).

Desde sua concepção em 2011, houve um grande número autores tentando definir o termo Indústria 4.0, e embora não haja uma definição exata do conceito, há claramente uma compreensão de sua importância não só para o setor industrial, mas para toda a sociedade (HERMANN *et al.*, 2016). Em seu estudo, Mouef *et al.* (2017) citam que há mais de cem definições para Indústria 4.0, sempre envolvendo o conceito de redes de recursos manufatureiros (máquinas, robôs, sistemas de armazenamento e instalações) autônomos e capazes de se controlarem de acordo com diferentes situações.

De maneira similar, Buer *et al.* (2018) citam o uso de processos e produtos inteligentes de modo a possibilitar a coleta de dados e forte interação entre produtos, processos, clientes e fornecedores através de redes de *internet*. De fato, essa integração entre os diversos participantes das cadeias de valores se mostra como um dos principais ganhos da Indústria 4.0 (HERMANN *et al.*, 2016; GEISSBAUER *et al.*, 2016)

Segundo Hermann *et al.* (2016), a Indústria 4.0 simboliza a atual tendência de tecnologias de automação no setor manufatureiro, e se baseia principalmente em tecnologias habilitadoras como sistemas ciberfísicos (CPS), computação em nuvem e *Internet of Things* (IoT). Há uma forte integração entre o ambiente virtual e o físico, além de novos sistemas de produção para possibilitar essas transformações.

A Indústria 4.0, na visão de Russmann *et al.* (2015), representa a nova Revolução Industrial e é definida como um novo nível de organização e de controle sobre a cadeia de valor do ciclo de vida dos produtos, cada vez mais individualizada para atender às necessidades dos clientes. O atendimento individual do cliente é o objetivo central, o que afeta os setores de gerência, forma de manufatura, pesquisa e desenvolvimento, além do transporte final e até mesmo a reciclagem desses produtos.

Diante das novas necessidades do homem e do avanço da tecnologia, foi criada a concepção da fábrica inteligente que é capaz de atender as necessidades com custo reduzido e rapidez. Na Indústria 4.0, a fábrica faz produtos inteligentes, utilizando máquinas inteligentes e utilizando cadeias de abastecimento inteligentes. Um outro aspecto da Indústria 4.0 é a possibilidade de fornecer produtos individualmente customizados da mesma maneira como se tratasse a produção seriada, em massa (ACATECH, 2013; FRAZIER, 2014).

Na concepção de Coelho (2016), a Indústria 4.0 é sinônimo de “Quarta Revolução Industrial”, “manufatura avançada”, “*smart factory*” e “*intelligent factory*”. Para ele todos esses termos retratam adequadamente o conceito de como serão as plantas fabris no futuro. Por essa visão, as fábricas serão dotadas de muito mais inteligência, flexibilidade e dinamismo, se integrando em todas as etapas da cadeia de valor (desenvolvimento de produtos, produção, venda, marketing, distribuição etc.).

O Governo Federal da Alemanha apresenta a Indústria 4.0 como uma estrutura emergente onde a manufatura e sistemas logísticos, apresentados na forma de sistemas de produção ciberfísicos, fazem uso intensivo das informações e redes de comunicação disponíveis para permitir que os processos empresariais estejam alinhados com as necessidades da produção (BAHRIN *et al.*, 2016; RUSSMAN *et al.*, 2015).

De fato, a origem do conceito Indústria 4.0 está profundamente cravado na Alemanha, país esse com grande tradição e importância mundial no setor manufatureiro. Em sua obra, Schwab (2016) aponta que a *Industrie 4.0* está inserida em um ambiente de incremento dos níveis de competitividade da manufatura no mundo e a evidente queda da participação alemã no PIB industrial global, fenômeno esse em grande parte atribuído à ascensão das economias asiáticas e suas crescentes expansões em diversos setores industriais.

O autor ainda resume o termo como uma iniciativa de governo para levar informatização de sistemas produtivos através de diversas avançadas tecnologias capazes de revolucionar a interação entre os mundos físicos e virtuais de produção, tendo como objetivo básico e maior a reinserção da Alemanha no topo dos rankings de performance e competitividade da indústria mundial. Assim, a Indústria 4.0 se firmou como um dos pilares do plano de ação *High Tech Strategy 2020*.

Trazendo para a ótica brasileira, a Indústria 4.0 é caracterizada pela informação digital segundo relatório da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro –

FIRJAN (2016). A entidade tem a visão de que a tecnologia da informação se torna parte essencial dos processos industriais, e decisões são automaticamente tomadas através do uso de um enorme conjunto de dados (*Big Data*). Também são elencadas as tecnologias que precisam ser adotadas para tornar a Indústria 4.0 factível: internet das coisas, *Big Data*, manufatura avançada, *Analytics*, simulações, robôs automatizados e realidade aumentada.

Entretanto, esse termo ainda não é amplamente difundido no Brasil, e segundo a Confederação Nacional da Indústria – CNI (2016) esse fato é um obstáculo para a adoção de tecnologias no país. Em pesquisa realizada entre indústrias nacionais foi constatado que apenas 48% delas usam pelo menos uma das tecnologias da Quarta Revolução Industrial. Entre grandes empresas esse número sobe para 63% e reduz para 25% em empresas de pequeno porte.

É notório que a indústria mundial tem passado por diversas mudanças ao longo do tempo e algumas dessas mudanças foram tão significativas que acabaram promovendo verdadeiras revoluções. Tais mudanças aconteceram para atender às crescentes necessidades humanas e de mercado, e geraram tantos impactos na produção, e conseqüentemente em várias outras áreas, que se tornaram marcos e símbolos de diferentes períodos da História recente (SILVA *et al*, 2018; LANDES, 2003).

Para Collabo (2016), a evolução da indústria e suas tecnologias podem ser divididas primeiramente em três fases: a Primeira Revolução Industrial é marcada pelo advento da máquina a vapor e a utilização de carvão vegetal como combustível, na Segunda Revolução Industrial houve o advento da energia elétrica e o conceito da linha de produção em série, e a Terceira Revolução Industrial foi caracterizada pelo uso intensivo de computação e automação de máquinas e equipamentos.

A Indústria 4.0 não pode ser enxergada como algo que já nasceu pronto com exata data de início. Ela é a evolução das tecnologias de produção desenvolvidas nos últimos séculos. Para traçar esse histórico é preciso voltar ao final do século XVIII, época de grandes transformações socioeconômicas na Inglaterra que caracterizaram a Primeira Revolução Industrial (MOHAJAN, 2019; WILSON, 2014). Nesse período houve uma transição do trabalho manual para o emprego de máquinas. O grande destaque dessa época foi a criação da máquina movida a vapor. Em adição, Wilson (2014) aponta que essa invenção possibilitou o começo da era industrial moderna, trazendo avanços para as indústrias têxteis, mineradoras, transporte por locomotivas,

siderúrgicas e muitas outras áreas. Houve também a consolidação de centros industriais com novas infraestruturas que possibilitaram a expansão de cidades.

Em seu trabalho, Machado (2016) pontua que a Primeira Revolução Industrial teve como palco a Inglaterra do século XVIII, e se caracteriza pela mecanização da indústria e também da agricultura, graças ao advento da máquina a vapor, essa movida pela queima do carvão vegetal como combustível básico, em substituição à força muscular humana e tração animal. O autor também enfatiza o desenvolvimento da locomotiva que impulsionou o transporte de mercadorias, e a divisão do trabalho que permitiu o aumento dos níveis de produtividade.

A Segunda Revolução Industrial representa a continuação dos processos em evolução nas indústrias, exemplificados como novos meios de produção, surgimento de novas máquinas e técnicas. Nesse contexto a industrialização, antes restrita à Inglaterra, sofre um processo de expansão e chega a outros países (EUA, Alemanha, França, dentre outros). Começa a era da produção em massa e o surgimento das indústrias elétrica e química. O refino de petróleo, a eletrificação e os motores a combustão são símbolos dessa segunda era de inovações na indústria (SANTOS,2017).

Em relação à transição entre um período e outro, Cuogo (2012) diz que houve uma adaptação progressiva, sem haver precisamente um tempo determinado entre o fim da primeira revolução e o início da segunda. Assim como a 1º Revolução Industrial, a 2º Revolução Industrial teve impactos profundos na humanidade como um todo. Houve uma especialização do trabalho, a fim de se obter incrementos de produtividade, e o surgimento de máquinas em substituição a trabalhos manuais possibilitou aumento de qualidade de vida (SANTOS,2017).

Segundo Cuogo (2012), a 2º Revolução Industrial não representou uma ruptura ou um reinício dos processos industriais. Houve uma evolução das tecnologias disponíveis e uma expansão no plano geográfico, já que os Estados Unidos serviram de principal palco para essa nova fase da industrialização.

A Terceira Revolução Industrial é datada da metade do século XX e mais uma vez as inovações geraram novos patamares de produção e reflexos na sociedade. Schwab (2016) afirma que ela pode ser chamada também de revolução do computador ou digital, pois está fortemente apoiada no advento de semicondutores, do computador pessoal (década de 70) e do surgimento da internet (década de 90). O autor também

aponta o surgimento de robôs para automatizar as linhas de produção e maior interligação e interdependência dos mercados financeiros e de produção no mundo todo.

Essa nova Revolução trouxe novas formas de organização do trabalho e teve como base a alta tecnologia. Medeiros e Rocha (2004) sintetizam que a Terceira Revolução Industrial consiste em um processo difuso com repercussão nas artes, costumes sociais e hábitos culturais. Os autores apontam que apesar do desenvolvimento de tecnologias como a comunicação móvel, foguetes de longo alcance e energia atômica, houve também o surgimento de políticas neoliberais que acabaram por provocar desemprego e precarizar relações trabalhistas.

Durante esse período o mundo testemunhou grandes mudanças geopolíticas, com o crescente desenvolvimento de países fora do Ocidente. Nesse sentido, Schwab (2016) afirma que nesse período houve aumento da importância de países asiáticos, inicialmente do Japão, que se tornou a segunda maior potência econômica no mundo. Na década de 1980 houve também a consolidação dos chamados tigres asiáticos (Cingapura, Coreia do Sul, Hong Kong e Taiwan), além do crescimento expressivo da China nas décadas seguintes.

O Quadro 1 sintetiza as três primeiras revoluções, indicando os períodos em que ocorreram e evidenciando suas principais características tecnológicas.

Quadro 1 - Revoluções Industriais e suas tecnologias correspondentes

Revolução Industrial	Período	Tecnologias características
1º	1760 - 1840	Máquina a vapor; mecanização; ferrovias
2º	Final do século XIX	Energia elétrica; linha de montagem; produção em massa
3º	Meados de 1960	Automação; componentes eletrônicos; computação

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Schwab (2016).

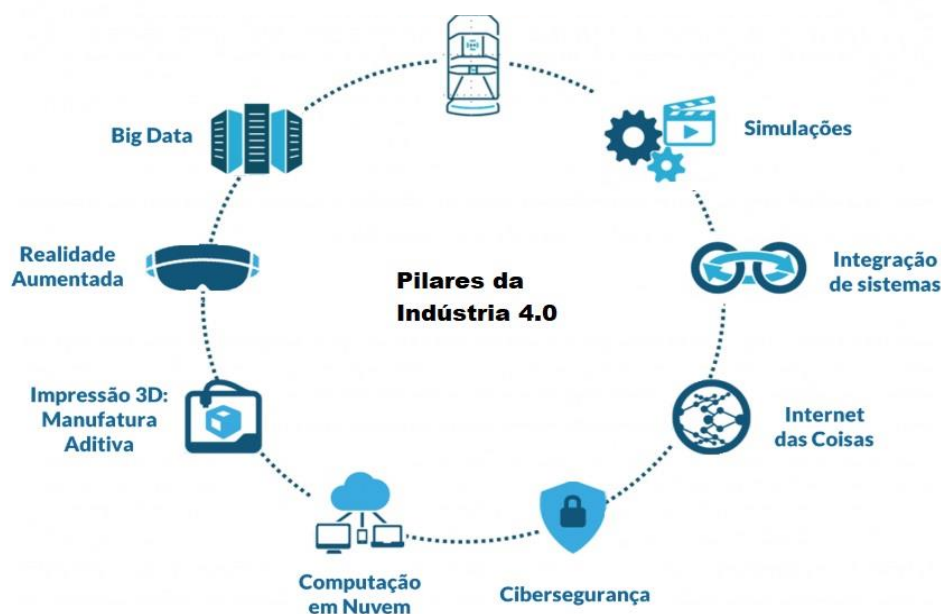
Verifica-se, a partir da extensa literatura apresentada, que o mundo está passando por sua quarta revolução industrial. Ela ocorre agora, pois há uma grande disponibilidade e convergência de tecnologias digitais com custos mais acessíveis. Os impactos que essa revolução pode causar ainda não são totalmente conhecidos, e por ser

um evento ainda recente, ajustes e melhorias ainda podem acontecer ao longo dos anos gerando uma constante adaptação (BRUNO, 2016; VENANCIO e BREZINSKI, 2017).

As tecnologias que hoje estão associadas ao conceito da indústria 4.0 podem ser classificadas em físicas (impressão 3D, robótica avançada, veículos autônomos, dentre outros), digitais (Internet das coisas) e biológicas (biotecnologia e genética) estão interconectadas graças às tecnologias digitais (SCHWAB, 2016).

O conjunto de tecnologias capazes de promover o processo de digitalização das organizações é conhecido como tecnologias habilitadoras para a Indústria 4.0, não havendo um consenso sobre a totalidade dessas tecnologias. Em relatório da entidade Boston Consulting Group, Russmann *et al.* (2015) listaram um total de nove tecnologias que se apresentam como ferramentas habilitadoras para o desenvolvimento da Indústria 4.0, conforme figura 1.

Figura 1 - Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Boston Consulting Group (2015).

Entretanto, para Hermann et al. (2015) são quatro as principais tecnologias da Indústria 4.0: sistemas ciber-físicos (CPS); internet das coisas (IoT); internet dos serviços (IoS) e fábrica inteligente (*smart factory*). Algumas tecnologias não podem ser associadas exclusivamente à Indústria 4.0, pois estão em uso desde antes e já estão consolidadas, como por exemplo, a comunicação *machine to machine*, o *big data* e a

computação em nuvem. Porém, sem essas tecnologias não se mostra viável a implantação da Indústria 4.0.

2.1.1 Big Data

O *Big Data* pode ser definido como a coleta e processamento de informações de diferentes fontes (equipamentos de produção, sistemas, gerenciamento, dentre outros) com o objetivo de dar suporte em tempo real na tomada de decisão de organizações. Essa grande análise de informações pode ser útil para apontar deficiências existentes e até prever e impedir ameaças aos processos industriais (RUSSMANN *et al.*, 2015; WITKOWAKI, 2017).

A coleta de dados de diferentes equipamentos e sistemas, aliada ao vasto processamento de informações são apontados por Russman *et al.* (2015) como práticas comuns a serem adotadas por organizações na tomada de decisões em tempo real. Os autores apontam o *big data* como um instrumento para mensurar riscos e desempenho na gestão de cadeias de suprimento.

Complementarmente, Addo-Tenkorang e Helo (2016) enxergam o *Big Data* como um conjunto de tecnologias capazes de gerar valor a partir de grandes conjuntos de dados. Considerando o aumento do volume de informações geradas nos últimos anos, principalmente com aumento da conectividade das pessoas, o *Big Data* tem se firmado como uma das tecnologias mais promissoras da Indústria 4.0.

Para se ter uma ideia da quantidade de informações geradas pela humanidade, Coelho (2016) cita que no ano de 2000 estimava-se em 800.000 petabytes (PB) o volume de dados armazenados em todo o mundo, contra uma estimativa de 35 zettabytes (ZB) até 2020, onde 1 petabyte equivale a 10^{15} bytes e 1 zettabyte representa 10^{21} bytes.

Na visão de Coelho (2016) e Campos (2015), dados podem ser enxergados como números e palavras que representam uma realidade objetiva, podendo ser apurados e validados, entretanto sem qualquer importância caso não sejam devidamente interpretados, dando origem à informação. Assim, essa grande quantidade de dados gerados incessantemente necessita de poderosos instrumentos de análise para geração de valor.

Entretanto, de acordo com Tian (2017), o *Big Data* ainda se encontra em um estágio incipiente e em desenvolvimento, e que observando casos de sistemas da informação antecedentes, muitas vezes concluiu-se que a contribuição de novas tecnologias está atrelada a fatores organizacionais e, particularmente, humanos.

2.1.2 Robôs autônomos

De acordo com Gonzalez *et al.* (2017), a Indústria 4.0 é caracterizada pela maior dependência em automação e interconexão de sistemas, e nesse sentido, robôs autônomos são apresentados como máquinas móveis dotadas de capacidade de movimentação de objetos para estocagem ou para que sigam para outras etapas do processo fabril sem necessidade de interferência humana, estando apenas remotamente conectados.

De acordo com Bahrin *et al.* (2016) os robôs autônomos podem executar tarefas com maior precisão e em lugares em que existe restrição para a presença de humanos, sendo utilizados nas áreas de produção, logística e distribuição. Os avanços tecnológicos dos últimos anos permitiram que os robôs apresentassem maior capacidade de autonomia, flexibilidade e cooperação, a ponto de serem capazes de interagir entre si e realizar tarefas ao lado de humanos (BAHRIN *et al.*, 2016; RUSSMAN *et al.*, 2015).

O uso de robôs em fábricas não é novidade, pois já são usados há décadas para executar tarefas repetitivas e insalubres. Entretanto, principalmente por motivos de segurança, os robôs historicamente sempre estiveram enclausurados e longe do contato direto de humanos durante sua operação (MULLER *et al.*, 2016).

Os robôs autônomos são considerados uma tecnologia derivada da robótica e da inteligência artificial e vários autores apontam para uma maior colaboração entre máquinas e pessoas. Enquanto humanos possuem limitações quanto à força física, repetição e velocidade, que tendem a reduzir eficiência e qualidade, os robôs oferecem esse complemento para atingir os objetivos de customização em massa (RUSSMANN *et al.*, 2015; Muller *et al.*, 2016).

Nesse sentido, os robôs colaborativos, do inglês *collaborative robots* ou *cobots*, são capazes de ocupar o mesmo ambiente de trabalho e interagir com humanos para cumprir etapas do processo produtivo. O termo *cobots* surgiu no final da década de 1990, entretanto apenas na última década houve um aumento de popularidade do

conceito, e no presente, robôs colaborativos já são projetados para atender necessidades específicas de indústrias (DJURIC *et al.*, 2016).

Apesar das vantagens já destacadas, Schmidt *et al.* (2018) afirmam que ainda há um longo caminho para uma colaboração plena entre robôs e homens, já que a maioria das empresas optam por níveis baixos de interação devido à preocupação com a segurança de seus funcionários, além da necessidade da infraestrutura de interconectividade necessária para que os *cobots* possam tomar decisões baseadas em dados de outros sistemas e equipamentos.

2.1.3 Realidade aumentada

A tecnologia de realidade aumentada, do inglês *augmented reality* (AR), se baseia em equipamentos dotados de câmeras (celular, *tablet* ou *smart glasses*) e *software* próprio. Quando apontados para um objeto, os equipamentos de realidade aumentada fazem seu reconhecimento e apresentam dados desse mesmo objeto, ou seja, o usuário recebe informações apresentadas visualmente de forma sobreposta à realidade que está a sua frente (PORTER; HEPPELMANN, 2017).

Para He *et al.* (2017), a realidade aumentada é definida como a tecnologia que permite a inserção do mundo virtual no ambiente real, sendo o *Google Glass* um dos primeiros óculos a permitir a visualização da realidade aumentada. A realidade aumentada é capaz de fornecer informações precisas para seus usuários, como no caso de reparos de equipamentos e inspeções visuais (RUSSMANN, 2015; HE *et al.*, 2017).

De modo semelhante, Elia *et al.* (2016) sintetizam a realidade aumentada como uma tecnologia que permite aos usuários a visualização do cenário real combinado com informações e cenários adicionais gerados digitalmente, a fim de simular, testar e melhorar processos industriais antes de serem implementados. Segundo Massod e Egger (2019) a realidade aumentada opera entre o mundo real e realidade virtual, sendo que nesta última todos os dados são apresentados virtualmente.

O conceito de realidade aumentada, hoje amplamente difundido, se originou na década de 1960. A falta de equipamentos com custos acessíveis sempre foi o principal obstáculo para a adoção da realidade aumentada, entretanto, a atual popularização e larga utilização de dispositivos móveis tem superado essa barreira, uma vez que muitos *smartphones* e *tablets* são dotados de sensores e processadores capazes de executar

aplicações de realidade aumentada, embora a tendência seja o uso de dispositivos do tipo *wearable*, a exemplo de lentes de contato e *headsets* (DE PACE *et al.*, 2018).

A realidade aumentada tem potencial de ampla aplicabilidade em diferentes setores. Ela pode ser usada logo no início de projetos para evitar erros de *design* e diminuir a necessidade de gastos com protótipos físicos, além de facilitar a separação e localização precisa de itens no processo de armazenagem (MASSOD; EGGER, 2019; DE PACE *et al.*, 2018).

2.1.4 Manufatura aditiva

Também conhecida com impressão 3D, a Manufatura Aditiva desponta como uma das principais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. De acordo com Giordano *et al.* (2016) a manufatura avançada realiza a fabricação de produtos a partir da adição de matéria prima, faixa após faixa, atingindo uma forma tridimensional e utilizando máquinas de prototipagem rápida, também conhecidas como impressoras 3D.

Essa ferramenta poderá ser largamente utilizada para permitir a produção de pequenos lotes de produtos customizados de acordo com a necessidade dos clientes, além de possibilitar a materialização de formas geométricas complexas e uso de materiais de baixo peso e alta resistência (FRAZIER, 2014; RUSSMAN *et al.*, 2015).

A manufatura aditiva pode possibilitar uma economia de produção, já que há um melhor aproveitamento de matéria prima, além da redução da quantidade de etapas produtiva, pois no método produtivo convencional há várias etapas até o produto final, enquanto, na manufatura 3D, o processo produtivo pode ser realizado em poucas etapas (GIORDANO *et al.*, 2016).

Conner *et al.* (2014) descrevem que a maior vantagem da manufatura aditiva está na redução do *lead time* e do volume necessário para produção, além de aumentar as possibilidades de customização sob demanda. Landher *et al.* (2016) também apontam para uma redução de custos, já que a descentralização da produção possibilitada pela manufatura 3D reduzirá distâncias de transporte e a necessidade de grandes estoques de produtos acabados.

Entretanto, segundo Sasson e Johnson (2016) e Laplume *et al.* (2016), as tecnologias existentes de manufatura avançada possuem algumas barreiras que restringem seu uso hoje. Primeiramente, as máquinas ainda são lentas e tornam seus

produtos acabados mais caros, logo, seu uso tem sido voltado principalmente para a produção de protótipos e peças de reposição já descontinuadas. Os autores também apontam para a baixa variedade de tipos e cores de materiais a serem impressos, além da limitação das impressora 3D em termos de dimensões do produto final.

Assim, Sasson e Johnson (2016) argumentam que, ao menos por enquanto, objetos de grandes dimensões, produtos que requerem alto grau de precisão ou itens sensíveis a calor e humidade deverão continuar sendo concebidos por tecnologias tradicionais.

2.1.5 Simulações

Para Weyer *et al.* (2016), no atual ambiente global de cada vez maior competitividade, as ferramentas de simulação oferecem a possibilidade de se planejar a operação de sistemas complexos. Simuladores 2D e 3D podem ser criados para obter estimativas de *cycle times*, consumo de energia elétrica e também aspectos ergométricos de instalações industriais. Ademais, as tecnologias simuladoras são capazes de reproduzir virtualmente as interações entre humanos, produtos e máquinas, resultando em menores tempos de *setup* e aumento de qualidade de produção (RUSSMANN *et al.*, 2015).

Considerando o desenvolvimento das ciências da computação e tecnologia da informação, os sistemas ciberfísicos se apresentam como um importante avanço da Indústria 4.0. De acordo com Monostori *et al.* (2016) os sistemas ciberfísicos são capazes de integrar o ambiente físico ao mundo virtual, controlando e coordenando processos e operações.

De maneira similar, Pereira e Romero (2017) definem sistemas ciberfísicos como uma tecnologia inovadora que possibilita o gerenciamento de sistemas interconectados através da integração de seus ambientes físicos e digitais.

Como exemplo do uso dessa tecnologia, Mendes *et al.* (2018) citam o caso da Volkswagen do Brasil, que desde 2008 utiliza conceitos de sistemas ciberfísicos. Nessa empresa os sistemas reais são elaborados a partir de sistemas virtuais, aumentando a eficiência, ergonomia e flexibilidade de suas etapas produtivas. Os autores explanam o processo:

A Fábrica Digital utiliza programas computacionais interligados que simulam virtualmente os processos produtivos antes de suas implantações. Os modelos virtuais são conceituados através da metodologia PLM (*product lifecycle management*), que gerencia todo o ciclo de vida do produto; com isso, qualquer necessidade de alteração nas instalações físicas pode ser simulada e avaliada, em qualquer fase de fabricação do produto, através de uma plataforma digital. Dessa forma, problemas e erros que poderiam surgir posteriormente, agora, podem ser detectados e corrigidos virtualmente, reduzindo custo e tempo de implementação (MENDES *et al.*, 2018, p. 21).

2.1.6 Integração de sistemas

No contexto da Indústria 4.0 sistemas geralmente são projetados para se integrarem utilizando tecnologias como a *Internet of Things*, permitindo a interoperabilidade entre objetos, dados, pessoas e serviços, ou seja, proporcionando-lhes condições de comunicação, coordenação e cooperação entre si (SANCHEZ *et al.*, 2020).

A integração de sistemas listada como um dos pilares da Indústria 4.0 é dividida em integração vertical e horizontal. A integração vertical se refere à eficiência proporcionada pela integração de sistemas reconfiguráveis e flexíveis dentro de um ambiente fabril. Já a integração horizontal trata da aproximação de todos os integrantes da cadeia de valor (WANG *et al.*, 2016; SCHUH *et al.*, 2014).

Pereira e Romero (2017) enxergam a integração vertical como a integração de sistemas de TI, processos, recursos e fluxos de informações dentre todos os departamentos e níveis hierárquicos de uma organização. Já a integração horizontal se refere à aproximação desses elementos dentro de uma organização com seus clientes e fornecedores.

2.1.7 *Internet* das coisas

O termo *Internet of Things* (IoT) foi primeiramente usado em 1999 para se referir à possibilidade de utilização de etiquetas RFID para rastrear itens na cadeia de suprimentos da empresa Procter & Gamble (BEM-DAYA; HASSINI;BAHROUN, 2017). Os mesmos autores citam uma rede de objetos físicos que são digitalmente conectados para monitorar e interagir dentro de uma organização e entre empresas e suas cadeias de suprimento.

Para Hozdic (2015), a Internet das Coisas é uma rede global de dispositivos com endereços próprios e interconectados que se comunicam através de um protocolo padrão. Em uma fábrica cada equipamento ou máquina pode ter seu próprio endereço e se conectar através de uma rede própria. Uma importante aplicação da Internet das coisas é na armazenagem de insumos e produtos, onde armazéns inteligentes garantirão uma melhor gestão de inventário (RAHMAN e RAHMANI, 2018; DUTRA e SILVA, 2016).

2.1.8 Computação em nuvem

A computação em nuvem, também conhecida como *cloud computing*, é uma tecnologia que possibilita a utilização remota de recursos da computação através da *internet*, hospedando uma infinidade de informações, programas e recursos sem a necessidade de um servidor local (ACETO *et al.*, 2020).

Ao permitir a interligação de diferentes dispositivos em um ambiente único para a troca de informações, a computação em nuvem representa o principal suporte para a comunicação e conexão dos diversos elementos da Indústria 4.0. Por não depender de um servidor físico na planta fabril, o uso da nuvem ajuda na redução de custos com infraestrutura e economia de espaço, como exemplo de sistema em nuvem pode-se citar o *Google Drive* (LANDHERR *et al.*, 2016; HAUG *et al.*, 2016).

2.1.9 Cibersegurança

O avanço tecnológico aliado à onipresença da *internet* possibilitou a digitalização dos meios físicos e uma conexão entre os mundos real e virtual. Já é usual a comunicação de pessoas através de redes sociais instaladas em computadores e *smartphones*. Similarmente, essa digitalização e conectividade têm sido incorporadas pela indústria, adicionando inteligência à já existente automatização de fábricas (SCHWAB, 2017; TUPTUK e HAILES, 2018).

Inevitavelmente, a conectividade intrínseca à Indústria 4.0 e o uso de protocolos de comunicação padrões podem representar uma ameaça para a segurança de sistemas industriais e linhas de produção. Assim, se torna essencial o uso de redes de

comunicações seguras e confiáveis, além de avançada gestão de identificação e acesso de pessoas e equipamentos (RUSSMANN *et al.*, 2015).

De maneira similar, Tuptuk e Hailes (2018) afirmam que o atual contexto de ambientes digitais e fortemente conectados acarreta diversos desafios, a exemplo da segurança de dados e das operações de produção, visto que há possibilidade de ataques nesses sistemas, pois suas vulnerabilidades e fraquezas ainda não são totalmente conhecidas.

De acordo com Nayyar e Kumar (2020) medidas de *cyber security* abrangem desde a utilização de *firewall* para filtrar o tráfego de dados da rede, até ações básicas como o uso de senhas fortes. Um exemplo de solução *cyber security* é a análise de ataques cibernéticos anteriores e suas características para prevenir ataques futuros. Para Cho e Woo (2017) soluções de *cyber security* eficientes são caras para as empresas, mas seus custos ainda são menores que as perdas geradas por ataques cibernéticos.

2.2 Construção Civil

Embora seja responsável por aproximadamente 6% do produto interno bruto mundial, a indústria da construção civil encontra-se atrás de outros setores econômicos na adoção de tendências tecnológicas, uma vez que a maioria dos processos construtivos ainda é executada de maneira artesanal, coordenados por ferramentas básicas de gerenciamento e dotados de baixa tecnologia (LA RIVERA *et al.*, 2020).

Apesar de seu papel relevante no incremento da qualidade de vida da população, através do conforto e bem estar proporcionados por diferentes espaços físicos, o setor construtivo é caracterizado por baixos indicadores de produtividade, constantes atrasos na finalização de projetos e, principalmente, pelos seus custos excedentes (OESTERREICH e TEUTEBERG, 2016).

La Rivera *et al.* (2020) apontam que o baixo desempenho do setor é resultado da fragmentação da cadeia de suprimentos, além da existência de múltiplos participantes com visões diferentes e sem conexão ao atuarem em fases diferentes, e muitas tarefas repetitivas executadas de forma linear. Os autores também apontam que, diferentemente de outros setores industriais, não é possível ter um controle total do ambiente físico de produção, por causa de diversas variáveis internas e externas, e porque cada produto final é único e erguido em espaços abertos com pouca viabilidade de controle.

De maneira similar, Oesterreich e Teuteberg (2016) explicitam algumas das causas para o atraso observado no setor:

Complexidade: projetos de construção possuem muitos processos e subprocessos relacionados, além da grande quantidade de atores envolvidos (arquitetos, engenheiros, empreiteiros, subempreiteiros, fornecedores e clientes) em diferentes fases e locais.

Incerteza: as peculiaridades e diferenças de ambientes de cada construção são responsáveis pela ausência de especificações completas de processos construtivos e uniformidade de materiais e mão de obra, resultando em um ambiente imprevisível.

(...)

Cultura empresarial: o setor é conhecido pela sua cultura gerencial rígida e resistente a mudanças (OESTERREICH e TEUTEBERG, 2016, p. 123).

De maneira resumida, os problemas enfrentados pela construção civil estão listados no Quadro 2.

Quadro 2 - Dificuldades identificadas na indústria da construção civil

Problema	Descrição
Custos excedentes e atrasos	Atrasos e sobrepreços são algumas dos maiores desafios enfrentadas pelo setor, causados por dificuldades técnicas inerentes de construções e conflitos administrativos e legais. Ambos diminuem a competitividade de empresas e impedem o cumprimento de contratos
Gerenciamento ineficiente de dados	Em empresas de construção é comum não haver redes internas que permitam o compartilhamento eficiente de informações de projetos anteriores. Assim, aprendizados adquiridos em projetos anteriores (informações técnicas, incidentes construtivos, correção de problemas em obras, falhas de orçamento) ficam restritos às equipes locais e não são transmitidos para toda a organização.
Baixa qualificação da mão de obra	O setor carece de mão de obra especializada e possui altíssima rotação de pessoal. Em geral, a indústria da construção civil não é considerada atraente para os trabalhadores jovens e especializados, dadas as condições do ambiente de trabalho, baixos salários e questões de segurança do trabalho.
Grande diversidade de agentes	De maneira geral, as construções são o resultado da união temporária de diversas empresas distintas que estão envolvidas em diferentes projetos. As empresas envolvidas têm diferentes portes e maquinários, além métodos de trabalho e interesses distintos. Essa fragmentação gera conflitos entre empreiteiros a dificulta a integração da cadeia de suprimentos.
Mudanças de projeto	Alterações de projeto durante a fase construtiva são comuns por variados motivos: inconsistências no projeto, modificações solicitadas pelo cliente, mudanças de normas, etc. Tais modificações elevam os custos finais e comprometem o cumprimento de cronogramas.
Mau planejamento	Erros nas fases de projeto e planejamento são recorrentes e acabam gerando atrasos e retrabalho devido à falta de insumos, equipamentos e mão de obra.
Acidentes de trabalho	Os canteiros de obra com a dinâmica de trabalho tradicional se tornam ambientes propícios para a ocorrência de acidentes de trabalho. Justifica-se pela baixa qualificação e instrução dos trabalhadores, aliadas às más práticas recorrentes de segurança do trabalho .

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em La Rivera *et al.* (2020).

Para Pasetti *et al.* (2018) a construção civil pode ser definida como indústria de engenharia sob encomenda, isso significa que cada produto final, ou seja, cada obra é praticamente única e um tipo de protótipo. Cada produto é projetado em seu próprio tempo de acordo com as necessidades específicas de cada cliente.

A despeito da resistência a mudanças, algumas estratégias de outras indústrias foram introduzidas no setor. Desde os anos 1940, a pré-fabricação e modularização de edifícios e componentes complexos têm sido utilizadas para aprimorar o processo construtivo. Entretanto, devido a limitações técnicas, os elementos pré-fabricados muitas vezes não satisfazem totalmente às necessidades de projeto, o que pode explicar seu uso restrito até hoje (PASETTI *et al.*, 2018).

Apesar do atraso tecnológico do setor construtivo, algumas áreas são foco de inovações, a exemplo do estudo de novos materiais e sistemas estruturais mais leves e resistentes. Entretanto, essas inovações apresentam baixo uso de tecnologias de informação e de comunicação, dando continuidade à utilização de máquinas e equipamentos convencionais com viés ainda semi-artesanal na implementação de projetos (LA RIVERA *et al.*, 2020).

No aspecto gerencial, algumas ações de gerenciamento de projetos têm sido observadas nos últimos anos na indústria construtiva para aprimorar níveis de produtividade e eficiência. Para Yeganeh *et al.* (2019) vale apontar a *lean construction*, ou construção enxuta, metodologia com intuito de promover melhoras contínuas em empresas de construção, minimizando perdas e potencializando o valor do produto final através de planejamentos e controles claros.

Para Pasetti *et al.* (2018) o maior desafio para a indústria construtiva hoje é a melhora dos níveis de produtividade, em comparação a outras áreas, através da redução de desperdícios de recursos e melhora da eficiência das cadeias de suprimento. Essas ações são capazes de reduzir custos socioeconômicos, diminuir impactos ambientais e até melhorar a qualidade final das obras.

Existe hoje uma grande atenção à maior eficiência na utilização de recursos naturais e atividades industriais limpas e preocupadas com o meio ambiente, sendo essas atitudes para enfrentar os crescentes desafios ambientais e econômicos. Assim, segundo Mhaske *et al.* (2017), um adequado gerenciamento de seus resíduos gerados, tornará a atividade construtiva mais sustentável, além de mais competitivas e rentáveis.

2.3 Tecnologias 4.0 voltadas para a construção civil

A indústria da construção civil sempre foi reconhecida por ser mais resistente a mudanças e à adoção de novas tecnologias em comparação a outros setores, como o

aeroespacial e o automotivo. No mundo todo há certa relutância de empresas de construção em investir e implementar novas tecnologias (HAMPSON *et al.*, 2015; HARGADEN *et al.*, 2019; KLINK e TURK, 2019).

Por se tratar de um setor extremamente fragmentado e formado em sua maioria por empresas de pequeno e médio porte, existe uma grande limitação de recursos destinados ao desenvolvimento e adoção de inovações, assim, atualmente apenas uma pequena porção das empresas da área é capaz de operar e se beneficiar das mais recentes ferramentas tecnológicas (ARAYICI e COATES, 2012; DALLASEGA *et al.*, 2018).

A transformação observada pelo o setor da construção civil pode ser também chamada de Construção 4.0, em analogia ao termo mais popular Indústria 4.0. Em seu relatório, a *European Construction Industry Federation* (2015) usa o termo Construção 4.0 para se referir à digitalização da indústria de construção. Similarmente, Craveiro *et al.* (2019) e Forgues *et al.* (2019) definem o termo com sendo a introdução dos princípios da Indústria 4.0 na construção civil.

De maneira análoga, Oesterreich e Teuteberg (2016) definem a Construção 4.0 como o conjunto de tecnologias interdisciplinares que possibilitam a digitalização, automação e integração de todas as fases e cadeia de valor do processo construtivo.

Para La Rivera *et al.* (2020), apesar da diversidade de significados e falta de um padrão, é consensual o entendimento de que o termo Construção 4.0 corresponde à aplicação da Indústria 4.0 no setor construtivo, representando a ampla digitalização dessa área. Segundo Chen *et al.* (2018) a automação na construção civil ainda não é suficientemente representativa para atestar o incremento de produtividade, mas os testes preliminares e experiências bem-sucedidas de outras áreas são fortes evidências para seu desenvolvimento.

Para atingir o sucesso na adoção de tecnologias, algumas ações devem ser tomadas pelas empresas do ramo. É essencial o mapeamento integral dos fluxos de trabalho para possibilitar a integração e transição entre pessoas, dados e informações de projetos, além de mensurar o êxito das tecnologias implementadas (HOSSAIN; NADEEM, 2019). Adicionalmente, Maskurity *et al.* (2019) apontam que gerentes e diretores de projetos devem desenvolver novas habilidades para utilizar as novas tecnologias de forma eficiente de modo a coordenar devidamente as equipes, processos e equipamentos.

Outra mudança esperada na mão de obra, proporcionada pela digitalização, é o refinamento das responsabilidades e atribuições dos trabalhadores, uma vez que deixarão de executar tarefas perigosas e repetitivas, assumindo um papel de controladores e supervisores de tecnologias. Assim, trabalhadores humanos serão responsáveis pelo gerenciamento tecnológico, realizando atividades especializadas e livres de riscos (SOTO *et al.*, 2018).

Há algumas tecnologias chaves, a exemplo *Building Information Modeling* (BIM), técnicas paramétricas de design, computação em nuvem e IoT. Em alguns casos a Construção 4.0 é usada para descrever a adoção de tecnologias de informação e comunicação, sendo o BIM a ferramenta central para a digitalização da construção civil (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; PASETTI *et al.*, 2018).

Essas tecnologias hoje se encontram em diferentes níveis de maturidade. Algumas delas, como o BIM e modularização, foram difundidas no mercado e estão amplamente disponíveis. Já outras tecnologias, como manufatura aditiva e realidade aumentada, ainda estão em fase formativa, pois seus protótipos e aplicações ainda estão em desenvolvimento para uso no mercado (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; PASETTI *et al.*, 2018).

De acordo com Oesterreich e Teuteberg (2016) a adoção de componentes da Indústria 4.0 traria grande impacto em toda cadeia da construção civil. Além das vantagens geradas pelo incremento de produtividade, eficiência, qualidade e colaboração, a adoção desses componentes pode aumentar a segurança e sustentabilidade, melhorando o desempenho do setor.

Apesar de estar atrasada em relação a outros setores, a área da construção pode se beneficiar grandemente com cadeias de produção e modelos de negócio mais eficientes proporcionados por mudanças tecnológicas (AXELSSON *et al.*, 2018).

Atualmente, o *Building Information Modeling* (BIM) tem sido apontado como a principal ferramenta para proporcionar a digitalização do setor da construção. Essa tecnologia pode ser detalhada como um modelo virtual altamente preciso, ao longo de todas as etapas de uma construção, possibilitando melhor controle e avaliação do que os tradicionais métodos manuais (LI e YANG, 2017; GAO *et al.*, 2019). Adicionalmente, Eastman *et al.* (2011) apontam que o BIM pode ser considerado fruto do aprimoramento dos *softwares* CAD, possibilitando que linhas sejam mais que meras representações gráficas de um projeto.

Para Olatunji (2011) o BIM tem potencial para causar mudanças radicais na construção civil e vem sendo usado em diversos lugares do mundo. Dada a importância do tema, o governo brasileiro implementou em 2018 a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM – Estratégia BIM BR. Baseada nos Decretos 9377/2019 e 9983/2019, a iniciativa BIM BR visa promover um ambiente adequado ao investimento em BIM e sua difusão no país em um prazo de 10 anos.

Considerando que a adoção de novas tecnologias é lenta na construção civil, a maioria dos estudos que se propõem a tratar das tecnologias da Construção 4.0 acaba por focar principalmente no BIM, uma ferramenta já consolidada. (HOSSAIN e NADEEM,2019)

A *Internet of Things* – IOT desponta como outra ferramenta relacionada à Indústria 4.0 que pode beneficiar a construção civil. Associada ao uso de sensores e algoritmos de tratamento de dados é possível monitorar as condições de elementos estruturais, a partir da geração de dados de pontos cruciais das edificações e posterior envio dessas informações através de redes sem fio (WANG *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2017).

Qualquer tipo de obra precisa de fornecimento de insumos e equipamentos em quantidade e tempo corretos, sob pena de gerar grandes prejuízos. Nesse sentido, se baseando na IoT, pode-se utilizar sensores RFID para otimizar a gestão de inventário, mantendo níveis de estoques adequados e assegurando o correto recebimento e armazenamento de materiais. Assim, a IoT permite a prevenção de perdas e desperdícios (MAHMUD *et al.*, 2018).

Embora o uso de robôs na construção civil seja estudado desde a década de 1980, a sua efetiva utilização ainda é limitada, no entanto, há grande expectativa que haja sua popularização com o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis. Também conhecido com *dfab*, o campo de *digital fabrication*, ou fabricação digital, é amplo e passível de várias aplicações. A fabricação digital surge da combinação de planejamento digital e automação de processos construtivos, sendo esses tipicamente classificados em métodos subtrativos, formativos ou aditivos (SOTO *et al.*, 2018).

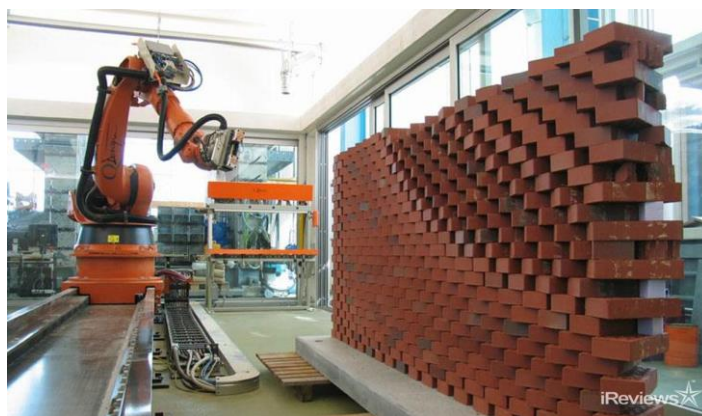
A *dfab* subtrativa envolve a remoção de materiais utilizando processos elétricos, químicos ou mecânicos. No método formativo forças mecânicas, calor ou vapor são aplicados para remodelar ou deformar determinado material. Já a fabricação digital

aditiva consiste na gradual agregação de material camada a camada através de extrusão, montagem ou jateamento de material ligante (SOTO et al., 2018).

Nos últimos anos, segundo Labonnote *et al.* (2016), processos aditivos de fabricação digital, em especial a impressão 3D, tiveram grande desenvolvimento em muitas indústrias. Com esse aumento de interesse, algumas pesquisas revelaram potencial de sua utilização em larga escala na construção. Os autores definem a *dfab* aditiva como a agregação de materiais através de técnicas de montagem, laminação e extrusão.

Como exemplo dessa tecnologia podem ser citados o *Semi Automated Mason* (SAM), robô desenvolvido pela empresa *Construction Robotics* para realizar o assentamento de tijolos apresentado na figura 2, e o *In situ Fabricator*, equipamento similar desenvolvido pelo Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHZ) conforme figura 3.

Figura 2 - Robô *semi automated mason* (SAM)



Fonte: IReviews, 2017.

Figura 3 - Robô *In situ Fabricator*



Fonte: InHabitat, 2015.

Em relação à responsabilidade ambiental inserida no conceito de Construção 4.0, Stock e Seliger (2016) afirmam que as tecnologias e serviços de informações provenientes da Indústria 4.0 terão papel fundamental no aprimoramento da sustentabilidade dos processos construtivos. Nesse sentido, Ribeiro (2017) aponta que a conectividade e troca de fluxos de informações viabilizará a rastreabilidade dos insumos de construções, e permitirá a identificação de materiais que podem ser reutilizados, aumentando a eficiência de processos de reciclagem e dando maior aproveitamento aos materiais.

As novas tecnologias da Indústria 4.0 permitirão novas formas de lidar com a gestão de resíduos, já que desde a fase de planejamento será possível identificar ações para diminuir ou eliminar a geração de resíduos, em contraste à prática atual de esperar a fase de execução e tomar decisões apenas após a geração do resíduo. O uso do BIM, sendo este um ambiente virtual e menos oneroso, junto da disponibilidade de informações permitirá que os profissionais avaliem diferentes soluções de projetos e seus respectivos cenários de execução com intuito de reduzir a geração de resíduos (LU *et al.*, 2017).

Nesse diapasão, Cheng e Ma (2013) apresentam um sistema com base no BIM para prever as quantidades de resíduos geradas em construções, permitindo que empresas identifiquem as etapas críticas em termos de geração de resíduos e possam elaborar ações de gerenciamento de resíduo visando sua reutilização e reciclagem.

Apesar dos benefícios apresentados pela utilização dessa tecnologia, Olugbenga *et al.* (2018) alega que grande parte das ferramentas de gerenciamento de resíduos gerados na construção civil ainda não possuem a funcionalidade de operar com a metodologia BIM.

2.4 Modelo de Maturidade

Organizações empresariais atuam em ambientes cada vez mais competitivos, assim, em um cenário global de competição acirrada e cheio de riscos é preciso conduzir seus processos internos de maneira eficiente. Ou seja, é essencial que organizações tenham suporte para a tomada de decisões que alinhem seus processos com suas estratégias de negócio (SANTOS; COSTA, 2019).

Para Marx *et al.* (2012) as empresas operam em ambientes complexos nos aspectos organizacionais, técnicos e estratégicos, e necessitam cada vez mais aferir a situação presente, além de determinar cenários futuros e verificar maneiras possíveis e rentáveis para evoluírem. O progresso tecnológico e introdução de sistemas de gerenciamento proporcionam às organizações significativos benefícios competitivos, além de fornecer recursos para ajudá-las a atingir seus objetivos.

Nesse sentido, modelos de maturidade têm se tornado importantes ferramentas de gestão. Modelos de maturidade demonstram o modo como algum determinado aspecto tem evoluído, permitindo que organizações planejem ações para alcançar os resultados desejados, além de proporcionar uma maneira simples de mensurar seus processos (PÖPPELBUSS; RÖGLINGER, 2011).

No geral, o termo maturidade se refere a uma condição de estar completo, pronto ou perfeito. Desse modo, modelos de maturidade, na visão de Pöppelbuss e Röglinger (2011), são modelos de referência que tratam do atual estado e evolução de maturidade em organizações. Os autores também apontam que os modelos de maturidade surgiram na engenharia de *software* e foram rapidamente espalhados para outras áreas do conhecimento.

Elaborado por Crosby (1979), um dos primeiros modelos de maturidade foi focado na gestão da qualidade, contendo cinco níveis com fatores chaves relacionados. Esse *Grid* de Maturidade da Qualidade serviu de base para outros modelos, como o *Capability Maturity Model* (CMM) e o *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) (DAYAN; EVANS, 2006).

O grau de maturidade caracteriza um estado de desenvolvimento dentro de uma escala, determinada por um ponto inicial (menor grau de desenvolvimento) e por um ponto final (maior grau de desenvolvimento) (BECKER *et al.*, 2009). Os mesmos autores também apontam que uma mudança para um grau maior pode ser vista como um progresso, e cada nível de maturidade possui suas respectivas características.

Os modelos de maturidade são uma maneira de avaliar e classificar uma organização em relação a um conteúdo determinado (LIN, 2007). Adotados em diferentes áreas, tais como, por exemplo, gestão da qualidade, gestão de recursos humanos, entre outros, os modelos de maturidade possibilitam a avaliação de um estado em relação à obtenção de determinados objetivos, além de identificar melhorias a serem adotadas através de níveis (TIKU *et al.*, 2007; PULLEN, 2007).

De maneira similar, Blondiau *et al.* (2016) reconhecem modelos de maturidade como ferramentas capazes de demonstrar o desenvolvimento gradual e sistemático de processos, estruturas e condições de organizações. Assim, primeiramente, é feita a identificação do processo que necessita de melhora e ele é avaliado com base no modelo de maturidade. Em seguida, o resultado dessa avaliação inicial é usado para identificar quais mudanças devem ser implementadas no referido processo a fim de ampliar o nível de maturidade organizacional (HELGESSION *et al.*, 2012).

Os modelos de maturidade foram adotados por diversas outras áreas, como a gestão da cadeia de suprimentos, gestão de projetos, Indústria 4.0 e muitas outras. Os modelos, em sua maioria, se baseiam em dois princípios: *top-bottom approach* e *bottom-up approach*. Na abordagem *top-bottom* ocorre primeiro a definição dos níveis de maturidade e depois os correspondentes itens de avaliação são determinados. Já na abordagem *bottom-up* o processo ocorre de maneira inversa (DE BRUIN *et al.*, 2005).

Em adição a esses tipos de abordagem, a estrutura de um modelo de maturidade pode variar de acordo com seu propósito. Para Maier *et al.* (2012), a aplicação de um modelo de maturidade pode ser direcionada para resultados descritivos, prescritivos ou comparativos, conforme resumido no quadro 3.

Quadro 3 - Tipos de modelos de maturidade

TIPO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
Descritivo	Identificação do nível atual da organização, porém não propõe melhorias e formas de aumentar desempenho.
Prescritivo	Focado no desempenho da organização, propostas de melhorias visando o próximo nível de maturidade.
Comparativo	Identificação das melhores práticas em todas as áreas, permitindo comparação entre organizações.

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Maier *et al.* (2012).

Se um modelo é puramente descritivo, sua aplicação é uma mera avaliação sem indicação de medidas para melhora de maturidade e desempenho, ou seja, é uma demonstração da situação como ela é e nada mais. Já os modelos prescritivos indicam como alcançar a melhora de maturidade e afetar positivamente o valor de processos. Por fim, os modelos comparativos permitem o *benchmarking* em indústrias e regiões, e

comparam práticas similares entre organizações para avaliar a maturidade em diferentes setores (DE BRUIN *et al.*, 2005; ROGLINGER *et al.*, 2012).

Para aferir a maturidade de organizações, métricas qualitativas e quantitativas podem ser usadas (GUEDRIA *et al.*, 2013; LEAL *et al.*, 2016). Métricas qualitativas são subjetivas e baseadas em critérios genéricos de avaliação, e são as mais utilizadas pelos modelos de maturidade. Já as avaliações quantitativas definem valores numéricos para caracterizar os itens avaliados (GUEDRIA *et al.*, 2013).

Os principais aspectos que caracterizam os modelos de maturidade e devem estar inseridos em seus escopos são apresentados no Quadro 4:

Quadro 4 - Aspectos dos Modelos de Maturidade

ASPECTO	DEFINIÇÃO
Objetivo	Avaliação da maturidade de diferentes elementos (tecnologias, processos, gestão de recursos etc.).
Dimensão	Áreas específicas que descrevem diferentes características do elemento em análise. As dimensões são exaustivas e possuem características diferentes em cada nível.
Nível	É particular da maturidade do elemento em avaliação. Os níveis são distintos entre si.
Princípios de Maturidade	Modelos de maturidade podem ser contínuos (evolução em diferentes níveis) ou complexos (cumprimento de todos os elementos em cada nível).
Avaliação	Utiliza-se métodos qualitativos (entrevistas) ou quantitativos (questionários em escala Likert).

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Maier *et al.* (2012), Roglinger *et al.* (2013) e De Bruin *et al.* (2005).

2.4.1 *Capability Maturity Model* (CMM)

O modelo de maturidade *Capability Maturity Model* surgiu em 1986 para atender a uma necessidade do governo norte americano para elaboração de metodologia capaz de avaliar a capacitação de fornecedores de *softwares*. Inicialmente criado para essa área da informática, a posterior agregação de valor possibilitou seu uso em vários outros processos de diferentes empresas (DAYAN; EVANS, 2006).

O CMM se baseia em cinco níveis de maturidade que são bases hierárquicas para contínuas melhorias de processos. Esses níveis de maturidade formam uma escala de avaliação do grau de maturidade e estimativa de capacidade de determinado processo (AFFONSO NETO, 2018). A Figura 4 ilustra os níveis de maturidade em processos do CMM.

Figura 4 - Os níveis de maturidade de processos a partir do CMM



Fonte: Affonso Neto (2018).

Segundo Affonso Neto (2018) e Arruda *et al.* (2019), o CMM propõe uma classificação de organizações entre imaturas e maduras em cinco níveis diferentes. No nível inicial as corporações são classificadas como imaturas, pois apresentam poucos processos definidos e, geralmente, dependem de esforço individual para atingirem sucesso. Já no mais alto nível de maturidade, o quinto nível, as organizações possuem processos institucionalizados e buscam a melhoria contínua, conforme demonstrado no Quadro 5.

Quadro 5 - Resumo dos níveis de maturidade do modelo CMM

NÍVEL	CARACTERÍSTICAS
1 – Inicial	Imaturidade organizacional; Processos improvisados; Descumprimento de prazos e custos; Alta dependência de habilidades pessoais.
2 – Gerenciado	Processos estabelecidos em custo, cronograma e funcionalidade; A disciplina de projeto permite repetição de sucesso de projetos anteriores.
3 – Definido	Processos bem caracterizados e previstos em procedimentos; Processos previsíveis de forma qualitativa.
4 – Gerenciado Quantitativamente	Estabelecimento de objetivos quantitativos para qualidade e desempenho de processos; Controle de desempenho através de técnicas estatísticas e outras técnicas quantitativas.
5 – Otimização	Foco contínuo na melhoria de processos; Melhorias incrementais e inovadoras.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Affonso Neto (2018) e Arruda *et al.* (2019).

2.4.2 *Capability Maturity Model Integrated* (CMMI)

A partir de 1991 diversos modelos CMM surgiram voltados para diferentes áreas: engenharia de software, engenharia de sistemas, desenvolvimento de força de trabalho e outros. Apesar de serem úteis para diversas corporações, observou-se que não havia uma integração quando da utilização de diferentes modelos, tornando difícil a utilização para treinamentos, avaliações e atividades de melhoria (SILVA; BARBALHO 2019).

Visando a integração dos diversos modelos CMM, no começo dos anos 2000 surgiu o CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), modelo de maturidade com intuito de aprimorar os processos de desenvolvimento integrado de hardware e software de organizações. O modelo CMMI permite avaliar melhorias de processos sob dois aspectos: contínuo, através de níveis de capacidade, e por estágios, utilizando níveis de maturidade (SIMONI; CECCONELLO, 2020).

Os níveis de capacidade relacionam-se às melhorias em processos individuais das corporações. Esses níveis buscam melhorar os processos de determinada área de maneira gradual, sendo numerados de 0 a 5. Já os níveis de maturidade aplicam-se à melhoria de processo da organização em um conjunto de áreas de processo. Esses níveis

auxiliam na previsão de resultados em futuros projetos, sendo numerados de 1 a 5 (SILVA; BARBALHO, 2019).

Corporações classificadas com baixo nível de maturidade possuem processos improvisados e alta dependência em pessoas, gerando gastos excessivos em operação. Em contraponto, organizações com processos bem definidos e continuamente aprimorados possuem alto nível de maturidade (SILVA; BARBALHO, 2019). O Quadro 6 apresenta os níveis de capacidade e maturidade do CMMI.

Quadro 6 - Níveis de Capacidade e Maturidade do CMMI

CAPABILIDADE	MATURIDADE
Capacidade de o processo atender plenamente às especificações do cliente ou da Engenharia.	Relacionada à qualidade dos processos de uma organização no desenvolvimento e manutenção
Nível 0: Incompleto	-
Nível 1: Executado	Nível 1: Inicial
Nível 2: Gerenciado	Nível 2: Gerenciado
Nível 3: Definido	Nível 3: Definido
Nível 4: Gerenciado Quantitativamente	Nível 4: Gerenciado Quantitativamente
Nível 5: Otimização	Nível 5: Otimização

Fonte: Silva e Barbalho (2019).

2.4.3 Modelos de Maturidade da Indústria 4.0

Lançado no ano de 2017, o *Industrie 4.0 Maturity Index* foi desenvolvido pela Academia Alemã de Ciências e Engenharia (ACATECH), uma organização do governo alemão, com o intuito de definir uma metodologia de medição do estágio de maturidade de empresas manufatureiras em relação à Indústria 4.0 (SCHUH *et al.*, 2020).

Conforme mostrado na Figura 5, o modelo proposto pela ACATECH possui seis níveis de maturidade, desde os requisitos básicos do começo da transformação digital até a completa implantação da Indústria 4.0. Esses estágios definem as ferramentas e capacidades necessárias alcançar a maturidade almejada e seus respectivos benefícios.

Figura 5 - Níveis de maturidade do Modelo ACATECH

Fonte: Schuh *et al.* (2020).

O primeiro nível (Informatização) corresponde ao uso de tecnologia para realização de tarefas manuais repetitivas. No nível seguinte (Conectividade) as cadeias de negócio são substituídas por sistemas interconectados e interoperados, mesmo que essa integração não esteja completa. O terceiro nível (Visibilidade) permite a tomada de decisão com base em dados de produção disponíveis para toda a cadeia de valor.

No nível de Transparência usam-se dados adquiridos anteriormente para identificação de problemas e geração de padrões para resolução de falhas. A Capacidade Preditiva, no quinto nível, trata da simulação de variados cenários e identificação de suas probabilidades e tendências. O último nível (Adaptabilidade) permite às organizações a tomada de decisões automatizadas através de dados e modelos, dando rapidez de resposta a situações de mudanças.

Outros exemplos de modelos de maturidade voltados à Indústria 4.0 foram identificados através de revisão de literatura e estão expostos no Quadro 7 junto ao modelo ACATECH anteriormente explanado.

Quadro 7 - Modelos de maturidade da Indústria 4.0

Modelo	Fonte	Descrição
ACATECH	Schuh <i>et al.</i> (2020)	4 dimensões (Recursos, Sistemas de Informação, Estrutura Organizacional e Cultura) 6 estágios de maturidade (Informatização, Conectividade, Visibilidade, Transparência, Capacidade preditiva e Adaptabilidade)
SIMMI 4.0 – <i>System Integration Maturity Model Industry 4.0</i>	Leyh <i>et al.</i> (2017)	4 dimensões (Integração vertical, Integração horizontal, Desenvolvimento de produtos digitais e Critérios de tecnologia transversal) 5 estágios (Nível básico de digitalização, Digitalização entre setores, Digitalização horizontal e vertical, Digitalização completa e Digitalização completa otimizada)
360DMA – <i>360 Digital Maturity Assessment</i>	Colli <i>et al.</i> (2018)	Baseado no Modelo ACATECH e uso de <i>Problem Based Learning</i> para tomada de decisão.
SM3E <i>Maturity Model</i>	Mittal <i>et al.</i> (2018)	Possui 3 eixos: Dimensões organizacionais (eixo X), Kit de ferramentas (eixo Y), e o estágio de maturidade alocado no eixo Z.
<i>Industry 4.0 Maturity Model</i>	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	9 dimensões e 62 itens relacionados para avaliação da maturidade 4.0. Utilização da escala de Likert para determinação o nível de maturidade de cada dimensão.
<i>Industry 4.0 – MM</i>	Gökalp <i>et al.</i> (2017)	5 dimensões(Gestão de ativos, Governança de dados, Gestão de aplicações, Processo de transformação e Alinhamento organizacional) 6 níveis de maturidade (Incompleto, Executado, Gerenciado, Estabelecido, Preditivo e Otimizado)
<i>PWC Maturity Model</i>	PWC (2017)	7 dimensões (Modelo de negócio e acesso de clientes digitais, Digitalização de produtos e serviços, digitalização e integração de cadeias de valor, Data & Analytics, Arquitetura de TI ágil, Compliance, e Organização e cultura digital) 4 níveis (Iniciante digital, Integrador vertical, Colaborador horizontal e Campeão digital)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De maneira geral, os modelos mostrados no Quadro 7 são compostos de dimensões com critérios definidos e níveis para determinação do estágio de congruência

com a Indústria 4.0. Com base nesses modelos vislumbram-se os seguintes componentes para avaliação da maturidade:

- 1) Verificação de oportunidades de negócio;
- 2) Definição das tecnologias a serem adotadas;
- 3) Proposição de melhorias para as organizações; e
- 4) Determinação do nível de maturidade.

2.5 Modelos de Maturidade da Indústria 4.0 para a Construção Civil

A presente pesquisa utilizou as bases de dados do Portal de Periódicos CAPES para levantamento dos modelos existentes de maturidade Indústria 4.0 para a construção civil. Adotaram-se dois eixos de busca a partir do entendimento do pesquisador sobre o assunto. O primeiro eixo engloba o modelo de maturidade, e o outro representa a construção civil.

Cada um dos eixos foi associado a um conjunto de palavras-chave. Os termos “*maturity*”, “*model*”, “*assessment*” e “maturidade” compõem o primeiro eixo, e as palavras “*construction 4.0*”, “*digital construction*” e “construção 4.0” foram escolhidas para o segundo eixo. Para obtenção de uma amostragem mais representativa, uniu-se os eixos de pesquisa, resultando nas combinações mostradas no Quadro 8.

Quadro 8 - Combinações de palavras-chave

EIXO 1	OPERADOR BOOLEANO	EIXO 2
<i>Maturity model</i>	AND	<i>Construction 4.0</i>
<i>Maturity model</i>	AND	<i>Digital Construction</i>
<i>Assessment</i>	AND	<i>Construction 4.0</i>
<i>Assessment</i>	AND	<i>Digital Construction</i>
Maturidade	AND	Construção 4.0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A busca inicial, realizada na referida base no mês de abril de 2022, e utilizando as cinco combinações de palavras-chave não retomaram resultados, ficando demonstrada a ausência de modelos de maturidade voltados para a Construção 4.0. Assim, faz parte do objetivo do presente trabalho propor um modelo de maturidade novo, totalmente voltado para Indústria 4.0 aplicada à construção civil e preencher a lacuna hoje existente.

3 PERCURSO METODOLÓGICO

Neste capítulo expõem-se os procedimentos metodológicos que serviram de base para o desenvolvimento da pesquisa que se propôs a desenvolver um modelo de maturidade das tecnologias da indústria 4.0 voltadas para a construção civil.

Para listar os métodos adotados nesse estudo, são apresentadas as seguintes seções: natureza da pesquisa, objetivos da pesquisa, abordagem da pesquisa, procedimentos da pesquisa, método para a coleta de dados, análise dos resultados e operacionalização da pesquisa.

3.1 Natureza da Pesquisa

Quanto à sua natureza, a presente pesquisa é enquadrada como aplicada, uma vez que possui foco prático na obtenção de resultados específicos na indústria da construção civil. Para Bardin (2011), a pesquisa aplicada é motivada pela vontade de gerar conhecimento para utilização de seus resultados, assim, produzindo conhecimento para a aplicação prática e norteada à resolução de problemas com objetivos previamente determinados.

Esta categoria de pesquisa tem o intuito de criar conhecimento para sua aplicação prática e focada na solução de problemas específicos e de interesses locais. Nesse tipo de pesquisa utiliza-se conhecimentos teóricos para a solução de problemas específicos (DOMINGUES, 2017).

Corroborando com essa ideia, Gray (2012), Cooper e Schindler (2016) destacam que esse modo de pesquisa tem como objetivo a produção de conhecimento a ser utilizado na prática com intuito de resolver problemas imediatos e particulares. Similarmente, Salomon (2010) aponta que a pesquisa aplicada busca a resolução de problemas a partir do uso de teorias já existentes.

Destarte, a proposição de um modelo de maturidade das tecnologias da Indústria 4.0 na construção civil pode auxiliar empresas a medir seus níveis de desempenho no campo de novas tecnologias, além de possibilitar o estudo de novas práticas para melhora de processos internos e resultados.

3.2 Objetivos da Pesquisa

Quanto aos seus objetivos, a presente pesquisa tem caráter exploratório. Com intuito de possibilitar uma série de informações sobre o tema em investigação, a pesquisa com caráter exploratória ganha um formato de pesquisa bibliográfica, principalmente, por não se ter grande conhecimento a respeito. Logo, a pesquisa exploratória ajuda a definir e gerar um escopo do assunto estudado contendo: levantamento bibliográfico, entrevistas com atores testemunhas do problema, e a análise de casos que ajudem no entendimento da circunstância (GRAY, 2012; PRODANOV; FREITAS, 2013).

De maneira similar, Raupp e Beuren (2006) apontam que as pesquisas exploratórias são indicadas em situações onde não há grande conhecimento sobre o tema tratado, gerando necessidade de busca de maior conhecimento para com apreensão do assunto.

De acordo com Gil (2019), as pesquisas exploratórias objetivam uma maior proximidade do pesquisador com o tema, sendo formado baseado em hipóteses ou intuições.

Por definição, a pesquisa exploratória objetiva o preenchimento de lacunas observadas em um estudo, como é caso de modelos de maturidade da indústria 4.0 voltados para construção civil, onde há predominância de trabalhos fragmentados e artesanais que detonam os indicadores de crescimento e produtividade.

3.3 Abordagem da Pesquisa

Quanto à sua abordagem, a pesquisa se baseou em dados quantitativos. A pesquisa de caráter quantitativo mede seus resultados baseados em cálculos, analisando os dados de forma numérica para associá-las e possibilitar a investigação (PRODANOV; FREITAS, 2013; CHIZZOTTI, 2018).

Para Fonseca (2012), a partir de dados mensuráveis, esse método de pesquisa examina a frequência de ocorrência dos dados para mensurar a autenticidade, ou ausência, do tema observado.

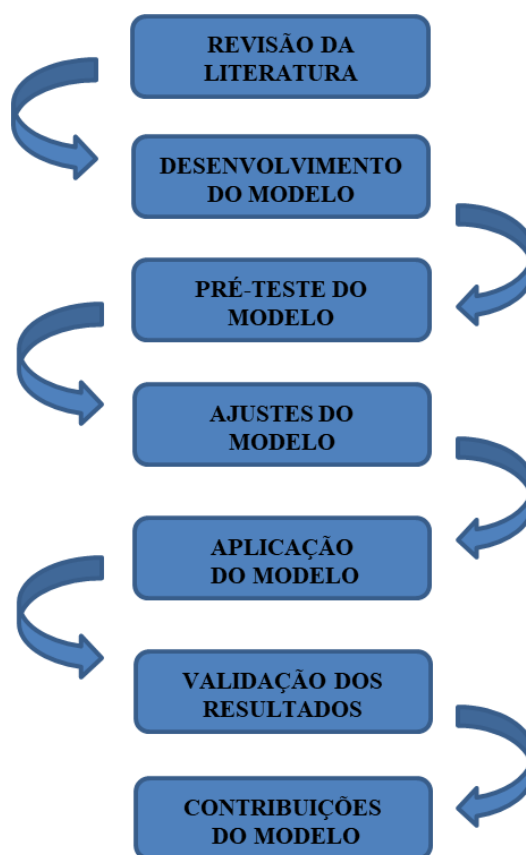
A abordagem quantitativa, segundo Richardson (1999), é caracterizada pelo uso da quantificação tanto na etapa de coleta de dados quanto na fase de tratamento de dados através de técnicas estatísticas.

Assim, a presente pesquisa é classificada com quantitativa por utilizar ferramentas para mensuração e estabelecer dados numéricos da adoção de tecnologias da indústria 4.0 na construção civil.

3.4 Proposição do Modelo

Dada a lacuna observada na revisão bibliográfica do tema, o presente estudo se propôs a apresentar um modelo de maturidade a ser aplicado em empresas da construção civil. O modelo de maturidade focou nas práticas e tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 e foi idealizado seguindo o roteiro mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Construção do Modelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.5 Procedimentos da Pesquisa

As técnicas empregadas em procedimentos de pesquisa precisam ter relação direta com a questão problema, a fim de obter a maior quantidade possível de dados para posterior análise (MARCONI; LAKATOS, 2010).

Assim, através de revisão da literatura, foram selecionados livros e artigos científicos atinentes ao tema do presente estudo. Devido ausência de trabalhos sobre modelo de maturidade da Indústria 4.0 voltados para o setor da construção, foram utilizados como referência modelos de maturidade da Indústria 4.0 aplicados a outros setores.

Para Yin (2015), o estudo de caso é uma investigação empírica que trata de um fenômeno dentro do seu contexto na vida real, principalmente quando não há clara definição entre os limites entre o fenômeno e o contexto. Ainda segundo o autor, o estudo de caso é um método abrangente desde o planejamento do projeto de pesquisa, com a determinação de seus componentes, até as técnicas empregadas para coleta de dados e as abordagens para análise desses dados.

Esses estudos dividem-se em estudo de caso único ou estudo de casos múltiplos, sendo o último tipo o que cobre mais do que um único caso e proporciona, como sua principal vantagem, um estudo mais robusto por meio dessas várias evidências dos casos (YIN, 2015; GIL, 2017).

Assim, para atingir o objetivo geral da presente pesquisa e envolver um maior número de atores com robustez, foi realizado um estudo de caso múltiplo com cinco empresas de construção civil localizadas na cidade de Manaus. O estudo de caso múltiplo também permitiu a verificação da viabilidade de replicação do modelo proposto e estabelecer linhas de divergência ou convergência entre as empresas.

3.6 Coleta de Dados

A fase de coleta de dados pretende obter informações acerca do caso em tela, cujas respostas permitem ao pesquisador obter as informações essenciais ao avanço do estudo (FONSECA, 2012).

Uma forma de se coletar dados é através da pesquisa *survey*. A pesquisa *survey* trata da obtenção de dados e informações a partir de características e opiniões de grupos

de indivíduos, por meio de um instrumento de pesquisa, normalmente um questionário. O resultado obtido, desde que o grupo possua representatividade da população, pode ser extrapolado para todo o universo em estudo (PINSONNEAULT; KRAEMER, 1993; DIAS, 2019).

Para Mineiro (2020), a pesquisa *survey* pode ser caracterizada como uma investigação cuja descoberta só é possível por meio da averiguação direta junto aos sujeitos da pesquisa, sendo assim aplicável a diversas situações em que características sobre comportamentos só podem ser colhidas por perguntas direcionadas a organizações sobre elas mesmas.

Segundo Dias (2019), um dos principais instrumentos utilizados na condução da pesquisa *survey* é o questionário, através da aplicação de entrevista pessoal ou envio por outros meios, como pelo correio. É preciso atentar para o custo, o tempo, e principalmente, para a forma a garantir um número aceitável de respostas para o estudo (OPPENHEIM, 1992).

Considerando as características dos principais meios de coleta de dados, optou-se pelo uso de um questionário para ser o instrumento de coleta dos dados e informações, pois ele permite ampla replicação e maior exatidão das respostas, além de proporcionar liberdade de tempo para as respostas dos participantes.

Assim, a partir da revisão da literatura, onde foram listados modelos de maturidade da Indústria 4.0 voltados para outros setores, foi possível a elaboração do questionário proposto a avaliar o *status quo* do setor construtivo em relação a tecnologias 4.0.

O questionário, composto por perguntas fechadas e nos moldes de uma entrevista estruturada, requer para cada pergunta o preenchimento de apenas uma resposta baseada em uma escala adaptada do tipo Likert, onde o nível 0 corresponde a inexistente nível de implementação, e o último nível 5 representa total aderência na aplicação dos conceitos da Indústria 4.0. O Quadro 9 apresenta uma síntese de como foi elaborado o questionário.

Quadro 9 - Exemplo de pergunta do questionário

Pergunta	0	1	2	3	4	5
Há exposição dos funcionários a novas tecnologias e inovações?						

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A escala de Likert, criada por Rensis Likert, é um tipo de escala com respostas psicométricas de grande uso em questionários, a exemplo de pesquisas de opinião, onde os participantes apontam seu nível de concordância com uma afirmação baseado em níveis previamente estabelecidos (BERMUDES *et al.*, 2016).

Ressalta-se que os questionários foram direcionados aos responsáveis de cada empresa, e as respostas colhidas formam uma entrada de dados para os gráficos de radar que representam o nível de maturidade dos participantes em questão.

O questionário aplicado no presente trabalho encontra-se integralmente disponível no Apêndice A, contendo vinte e três perguntas fechadas, com possibilidade de respostas de acordo com a adaptação da escala de Likert. Essas questões foram agrupadas nas quatro dimensões estabelecidas neste estudo: Tecnologia, Organização, Pessoas e Sustentabilidade.

As empresas selecionadas para participar deste estudo estão localizadas na cidade de Manaus, todas atuantes no setor da construção civil e com algum nível de familiaridade com as tecnologias da Indústria 4.0. As empresas foram escolhidas pelo critério de acessibilidade, configurando assim um grupo de amostra por conveniência.

Para Freitag (2018) em uma amostra por conveniência acontece a seleção de uma amostra populacional que se mostra acessível, ou seja, os indivíduos participantes da pesquisa são selecionados porque são prontamente disponíveis e não porque foram escolhidos por meio de critérios estatísticos.

Antes da aplicação dos questionários, o pesquisador contatou as empresas participantes por telefone para verificar o grau de conhecimento do tema em tela e se havia interesse em participar da pesquisa. As empresas forneceram *e-mail* e contato de seus funcionários que foram responsáveis pelo preenchimento do questionário. Aos participantes foi facultada a validação das questões presentes no questionário, não havendo qualquer ajuste reportado a ser feito.

3.7 Análise de Dados

Gil (2017) afirma que a fase da análise dos dados contém uma série de procedimentos como interpretação das respostas, tabulação de dados e mensuração de valores estatísticos, para esclarecer os fatos e estabelecer uma conexão entre os resultados obtidos e outros estudos já conhecidos.

Nesse contexto, foram utilizadas técnicas da estatística descritiva como ferramentas para a análise de dados do estudo.

A estatística descritiva trata do manejo de dados para resumi-los ou descrevê-los sem intenção de deduzir qualquer coisa que ultrapasse o próprio conjunto de dados (FREUND;SIMON, 2000). Da mesma forma, Collis e Hussey (2005) apontam que a estatística descritiva objetiva apenas em resumir, descrever ou apresentar dados.

Após a obtenção dos dados e sua classificação, é realizado um agrupamento em tabelas ou gráficos, para que se possa fazer uma análise de maneira mais clara. Dá-se o nome de apresentação tabular ou gráfica a esses tipos de apresentação (DIEHL; SOUZA; DOMINGOS, 2007).

A tabela é um dos meios mais simples para se resumir um conjunto de informações, sendo sua interpretação dependente do leitor. A apresentação gráfica se dá através de um gráfico apresentado com título e escala. Em resumo, a tabela é um quadro que sintetiza um grupo de dados, enquanto os gráficos são uma maneira de mostrar os dados, dando uma aparência mais dinâmica do fenômeno em estudo (CALVO, 2004; DIEHL. SOUZA; DOMINGOS, 2007).

Visando a análise das respostas do questionário, à escala Likert adaptada foi atribuída um sistema de pontuação que começa no nível 0 e termina no nível 5. Ao nível 0 é imposto um *status* de inexistência de adoção de práticas e tecnologias 4.0, enquanto o nível 5 corresponde a plena utilização e integração dessas práticas e tecnologias 4.0, conforme demonstrado no Quadro 11 desta Dissertação. Esses *status* foram propostos a partir dos modelos já listados no Quadro 7 desse estudo, onde cada nível está relacionado a um estágio de maturidade na Indústria 4.0.

Para a representação gráfica e de maneira bidimensional, optou-se por utilizar o método geométrico conhecido como gráfico de radar criado por Masaaki Miyamoto e publicado por Albach e Moerke (1987). De acordo com Ornstein (1989), o gráfico de radar é um procedimento de forma original e se mostra um importante melhoramento

para o controle gerencial, sendo a forma mais indicada para a demonstração e comparação de avaliações de desempenho em indústrias e organizações.

3.8 Operacionalização da Pesquisa

Sendo o objetivo principal desse estudo a proposição de um modelo de maturidade de tecnologias da indústria 4.0 voltadas para a construção civil, os procedimentos operacionais que deram embasamento à proposta de modelo foram:

- Identificar as tecnologias da Indústria 4.0 utilizadas na construção civil, a partir da revisão da literatura;
- Identificar as dificuldades para adoção dessas tecnologias e seus benefícios em relação às tecnologias tradicionais;
- Propor um modelo de maturidade específico, com as devidas dimensões, variáveis e escalas.

Assim, o Quadro 10 resume todos os procedimentos metodológicos aplicados na pesquisa:

Quadro 10 - Procedimentos metodológicos

Natureza da Pesquisa	Aplicada
Objetivo da Pesquisa	Exploratória
Abordagem da Pesquisa	Quantitativa
Proposição do modelo	Dimensões: Revisão da literatura, Desenvolvimento do modelo, Ajustes do modelo, Aplicação do modelo, Validação dos resultados, Contribuições do modelo.
Procedimentos da Pesquisa	Estudo de casos múltiplos
Métodos para coleta de dados	Pesquisa <i>survey</i>
Análise de resultados	Estatística descritiva
Operacionalização da Pesquisa	Identificação das Tecnologias, Dificuldades e benefícios da adoção dessas tecnologias e proposição de modelo de maturidade.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta o fruto da realização deste trabalho, expondo a metodologia de construção do modelo e os resultados de sua aplicação. Inicialmente, apresenta-se a base referencial e os aspectos utilizados para o desenvolvimento do modelo de maturidade proposto, além de apontar as dimensões e níveis de maturidade considerados. Posteriormente, discorre-se sobre a aplicação do modelo e a partir dos dados coletados os resultados finais são apresentados e discutidos.

4.1 Apresentação do Modelo de Maturidade

A proposta de modelo de maturidade deste trabalho foi baseada na estrutura da Pesquisa Abrangente para Modelo de Maturidade, elaborada por Wendler (2012). O autor afirma que para o desenvolvimento de modelos de maturidade faz-se necessário um método interativo composto por três etapas (Desenvolvimento do Modelo, Aplicação do Modelo e Validação do Modelo).

Visando a operacionalização dessas etapas, tomou-se como guia o processo proposto por De Bruin *et al.* (2005) e ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Etapas para desenvolvimento de modelo de maturidade



Fonte: Adaptado de De Bruin *et al.* (2005).

O processo é genérico e possibilita a elaboração e evolução de um modelo descritivo para prescritivo, e também para o modelo comparativo. De acordo com De Bruin *et al.* (2005) é essencial a estrita obediência às etapas mostradas anteriormente na Figura 7, a saber:

Etapa 1 – Escopo: O passo inicial é a definição do escopo do modelo, determinando o âmbito e limite de aplicação, podendo ser de cunho geral ou específico. Modelos de cunho geral possibilitam sua aplicação em diferentes domínios (diferentes tipos de indústria, por exemplo), já os modelos específicos são destinados a uma determinada área de aplicação

(desenvolvimento de *softwares*, por exemplo). As partes beneficiadas pelo modelo devem ser identificadas (academia, indústria, governo, etc.) e elas podem, inclusive, colaborar para o desenvolvimento do modelo, além de poder ser feita uma revisão da literatura.

Etapa 2 – *Design*: Nesta fase é feito o enquadramento pretendido, ou seja, é determinada a arquitetura (*design*) que serve de base para o desenvolvimento do modelo e sua aplicação. Deve-se definir as contribuições do modelo para as organizações, quais recursos necessários para sua aplicação, além do modo a ser aplicado em diferentes estruturas organizacionais. Há necessidade de se primar pelo equilíbrio, evitando que o modelo seja muito simplista ou complexo demais.

Etapa 3 – Preenchimento: Essa fase trata do conteúdo específico do modelo com seus componentes e subcomponentes definidos, identificando o que será medido e como será feito. Esses componentes podem ser elaborados a partir de uma revisão da literatura ou até por abordagens de forma empírica (por exemplo, entrevistas com especialistas, grupos focais e estudos de casos). A escolha dos componentes a partir de múltiplas fontes aumenta o alcance dos resultados do modelo final.

Etapa 4 – Teste: Após o preenchimento do conteúdo do modelo na etapa anterior, é necessário garantir a relevância e rigor do modelo. O conteúdo e os constructos devem ser testados para garantir a confiabilidade do modelo. Esse teste pode ser realizado por meio de extensa revisão da literatura e também se pode fazer um teste piloto com avaliadores. O objetivo da etapa é garantir que o modelo meça exatamente o que se pretende medir, certificando que os resultados sejam repetíveis e exatos.

Etapa 5 – Implantação: Nesta etapa ocorre a disponibilização do modelo para uso e verificação da dimensão de sua generalização. Busca-se a aceitação do modelo aplicando-o em instituições que não se envolveram em seu desenvolvimento e testes.

Etapa 6 – Manutenção: O último passo compreende a manutenção do modelo, que é influenciado pelas ferramentas necessárias para seu uso e atualização ao longo do tempo. Por exemplo, caso o modelo fique disponível *online* são necessários vários recursos tecnológicos para permitir sua utilização e comportar maior número de usuários simultaneamente.

Assim, a presente dissertação apresenta um modelo de maturidade aderente aos modelos apresentados no Quadro 7, com as devidas adaptações necessárias para ser plenamente utilizado por organizações voltadas para o setor da construção civil. O *framework* proposto por De Bruin *et al.* (2005) foi utilizado como base e suas seis etapas são expostas e abordadas a seguir:

I – Escopo do Modelo

O Modelo é idealizado para empresas do setor da construção civil, sendo assim, específico para esse domínio. Trata-se de empresas de pequeno e médio porte, e especializadas em obras residenciais e comerciais.

II – Arquitetura do Modelo

O modelo foi elaborado para ser submetido aos executivos das empresas e profissionais de nível de gerência, pois são eles os responsáveis pelo desenvolvimento de estratégias e manutenção de recursos. Também caberia a aplicação a consultores e auditores externos que usualmente se envolvem em mudanças organizacionais de empresas. Os participantes recebem os esclarecimentos necessários sobre o modelo, sua justificativa e objetivo, além da forma de aplicação. O instrumento de pesquisa é desenhado para ser disponibilizado de forma online e se baseia em uma autoavaliação.

III – Preenchimento do Modelo

A Revisão da Literatura mostrou que embora haja vários modelos de maturidade para Indústria 4.0, nenhum deles tem como alvo específico o setor da construção civil. Os modelos disponíveis apresentam estágios com os respectivos níveis de maturidade, variando o detalhamento de suas características. Assim, o modelo proposto nesta dissertação deve seguir parcialmente os estágios de maturidade de modelos

apresentados com bom nível de detalhamento na Revisão da Literatura. As dimensões, por sua vez, incrementam o conteúdo atinente a cada estágio de maturidade definido, sendo os principais elementos para o entendimento detalhado do fenômeno em estudo. Cada dimensão possui definição geral e características apropriadas.

IV – Teste

Visando a validade e pertinência do modelo, baseia-se nos princípios de Becker *et al.* (2009) para garantir a qualidade do modelo proposto. Seus critérios incluem abrangência, relevância, compreensibilidade, consistência, detalhamento, estrutura sistemática, aplicabilidade e confiabilidade conceitual.

V – Implantação

O Modelo proposto foi idealizado para ter sua aplicação imediata em grupo de empresas selecionadas, sendo possível, futuramente e mediante avaliação dos resultados, sua ampla distribuição e aplicação.

VI – Manutenção

Devido à intenção inicial de se aplicar o modelo a um seleto grupo de empresas locais, não há no momento necessidade de se dispor recursos visando à manutenção do modelo.

4.1.1 Apresentação das Dimensões

Com base na síntese dos modelos de maturidade já apresentados e a fim de aferir a homogeneidade entre membros do setor construtivo, o modelo proposto neste estudo é composto por quatro dimensões: Organização, Pessoas, Tecnologia e Sustentabilidade. Essas dimensões são resumidas a seguir:

- Dimensão de Organização – Alinhamento das estratégias da organização com as práticas da Indústria 4.0. Ações e investimentos direcionados ao desenvolvimento tecnológico e qualificação de trabalhadores;
- Dimensão de Pessoas – Relações humanas no ambiente 4.0. Habilidades e condições de trabalho necessárias para adoção de tecnologias;

- Dimensão de Tecnologia – Questões relacionadas à digitalização de informações e utilização de novas tecnologias no processo construtivo;
- Dimensão de Sustentabilidade – Ações que contribuam para práticas operacionais sustentáveis.

Essas dimensões foram escolhidas a partir de cotejo detalhado dos modelos existentes voltados para a Indústria 4.0, definindo-se também as subdimensões apresentadas no Quadro 11. Essas informações servem de base para o instrumento de pesquisa aplicado neste trabalho.

Quadro 11 - Dimensões do Modelo

Dimensão	Características	Subdimensões
1. Organização	O desenvolvimento para a Indústria 4.0 requer melhoria contínua, disseminação de cultura inovadora e recursos para novas tecnologias.	1.1 I 4.0 na Estratégia 1.2 Investimentos em inovação 1.3 Análise de dados 1.4 Customização 1.5 Adaptação a mudanças
2. Pessoas	A qualificação contínua e adequada da mão de obra é fundamental para a transformação digital propiciada pelo uso intensivo de tecnologias.	2.1 Capacitação 2.2 Multidisciplinariedade 2.3 Pensamento crítico 2.4 Flexibilidade para mudanças 2.5 Interação homem-máquina
3. Tecnologia	Desenvolvimento de novas tecnologias disruptivas e interconectadas em todas as fases do processo construtivo.	3.1 BIM 3.2 <i>Cybersecurity</i> 3.3 Pré-fabricação 3.4 Gestão de dados
4. Sustentabilidade	Não basta apenas adotar novas tecnologias, é preciso se basear em práticas sustentáveis nas dimensões econômica, social e ambiental.	4.1 Gestão de resíduos 4.2 Governança 4.3 Ética e direitos humanos

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

4.1.2 Apresentação dos Níveis de Maturidade

Os níveis de maturidade representam o estágio de maturidade de uma organização, sendo que cada nível possui denotação e descrição próprias. A Revisão da Literatura identificou vários modelos de maturidade voltados para a Indústria 4.0, conforme detalhado na seção 2.4.3, com informações sobre seus critérios de maturidade.

Para a elaboração dos níveis de maturidade do modelo proposto optou-se por fazer uma adaptação dos níveis de maturidade do modelo ACATECH criado por Schuh *et al.* (2020). Os níveis adotados nesta pesquisa estão descritos no Quadro 12.

Quadro 12 - Níveis de Maturidade

Nível	Descrição
0 - Inexistente	Não há implementação de tecnologias da I 4.0. A organização tem foco apenas em suas operações básicas.
1 - Informatização	Alguma prática já foi adotada e existe uma visão I 4.0. Diferentes tecnologias usadas de forma isolada. Predominância de processos sem interface digital.
2 - Conectividade	O uso de tecnologias isoladas dá lugar à interconectividade. Projetos criados digitalmente e dados acompanhados até a produção.
3 - Visibilidade	Processos acompanhados do início ao fim com geração de dados em todas as etapas, não apenas em áreas individuais como anteriormente. Primeiros benefícios da I 4.0.
4 - Transparência	Os processos são gerenciados quantitativamente e seus desempenhos estatisticamente monitorados. Este nível geralmente ocorre simultaneamente ao uso de sistemas ERP.
5 - Adaptabilidade	Integração plena entre as tecnologias. A organização possui adaptação contínua e práticas totalmente aderentes à I 4.0.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

4.2 Aplicação do Modelo de Maturidade

A aplicação do Modelo ocorreu de forma *online* e valeu-se de um questionário conforme indicado no item 3.6. Inicialmente, houve contato telefônico prévio do pesquisador a fim de aferir o interesse e a disponibilidade de participação das empresas. Nesta etapa, um total de sete empresas do ramo de construção civil (construtoras) se mostraram interessadas em participar da pesquisa e forneceram endereços eletrônicos para posterior contato e envio do formulário.

O questionário (Apêndice A) proposto foi aplicado através da ferramenta *Google Forms* devido a sua facilidade de manuseio, além de ser de uso gratuito e ser compatível com diversos sistemas operacionais. Obteve-se um retorno de 100% de questionários devidamente preenchidos e as respostas foram tabuladas seguindo procedimento descrito a seguir:

1. Para identificação na presente pesquisa, as empresas foram nomeadas de 1 a 7, seguindo a ordem cronológica de preenchimento dos questionários.
2. As duas primeiras perguntas são parâmetros da empresa participante, logo foram excluídas da tabulação por serem únicas de cada empresa;
3. As respostas foram agrupadas por dimensão (QT= Questão Tecnologia, QO= Questão Organização, QP= Questão Pessoas e QS= Questão Sustentabilidade);

Os dados obtidos a partir da consolidação das respostas obtidas da aplicação do questionário *online* por cada uma das empresas de construção civil participantes, em que foi adotada escala adaptada do tipo Likert, agrupados por dimensão e de acordo com os critérios estabelecidos e descritos anteriormente estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Espelho das respostas das empresas participantes da pesquisa.

Critério	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Empresa 6	Empresa 7
QT.1	4	1	0	0	5	1	1
QT.2	4	0	0	0	0	0	0
QT.3	2	1	3	0	5	1	1
QT.4	3	0	0	0	0	0	0
QT.5	2	0	0	0	1	0	0
QT.6	3	1	4	0	3	1	2
QT.7	4	1	3	0	3	3	3
QT.8	4	5	3	3	5	4	4
QO.1	4	2	1	3	2	1	2
QO.2	3	4	2	3	1	2	2
QO.3	4	1	0	3	2	2	1
QO.4	3	1	0	0	0	0	0
QO.5	2	0	5	0	2	0	0
QP.1	3	4	3	3	1	3	3
QP.2	2	0	2	2	2	2	2
QP.3	5	0	4	0	3	0	0
QP.4	3	0	0	0	2	0	1
QP.5	1	0	0	0	3	0	0
QS.1	5	4	3	0	5	4	4
QS.2	5	4	3	0	2	1	1
QS.3	4	3	0	2	1	2	2
QS.4	5	1	2	2	5	5	4
QS.5	3	3	0	2	5	3	3
QS.6	5	2	3	2	2	2	2

Legenda: QT= Questão Tecnologia, QO= Questão Organização, QP= Questão Pessoas e QS= Questão Sustentabilidade. Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

O resumo das respostas das empresas participantes pode ser observado na Tabela 2, onde consta a média simples de suas respostas em cada dimensão.

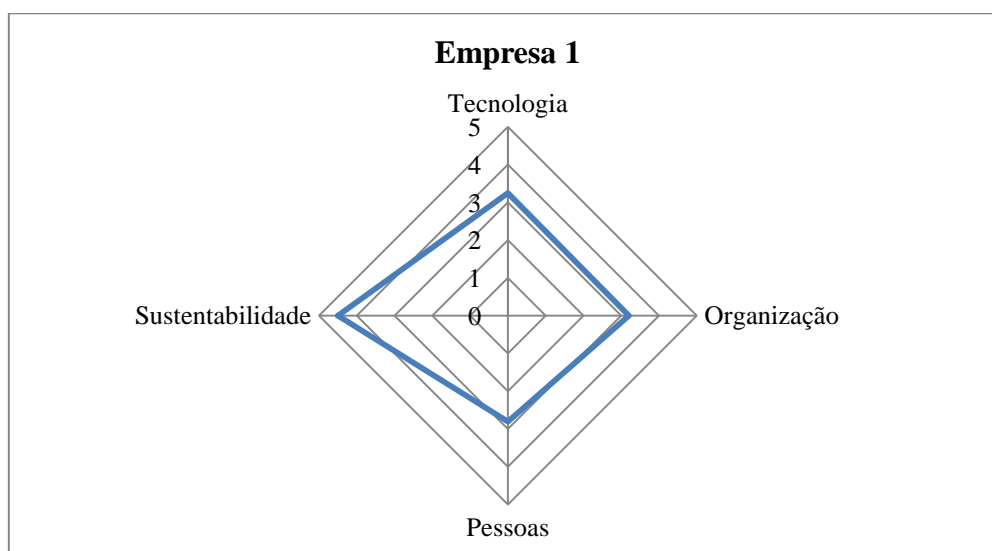
Tabela 2 – Média simples das respostas das empresas participantes da pesquisa.

	Dimensão Tecnologia	Dimensão Organização	Dimensão Pessoas	Dimensão Sustentabilidade
Empresa 1	3,25	3,20	2,80	4,50
Empresa 2	1,13	1,60	0,80	2,83
Empresa 3	1,63	1,60	1,80	1,83
Empresa 4	0,38	1,80	1,00	1,33
Empresa 5	2,75	1,40	2,20	3,33
Empresa 6	1,25	1,00	1,00	2,83
Empresa 7	1,38	1,00	1,20	2,67

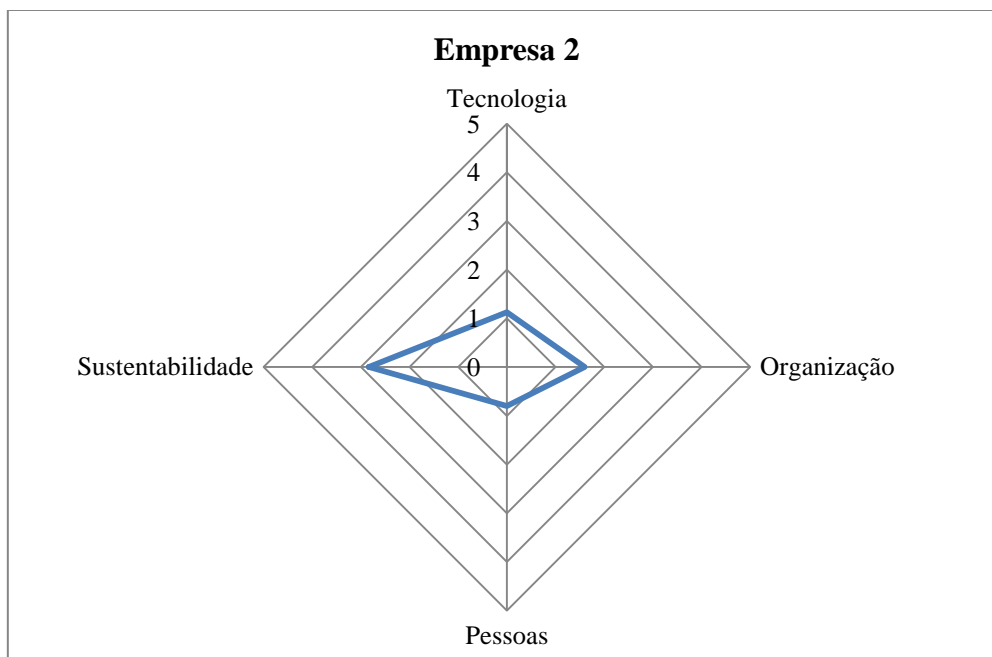
Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Para melhor interpretação dos resultados obtidos, valeu-se de representação gráfica, para apresentar de forma visual os níveis identificados por dimensão de cada empresa utilizando a média das respostas de cada dimensão. São apresentados a seguir os gráficos de radar 1 a 7, relativos a cada empresa.

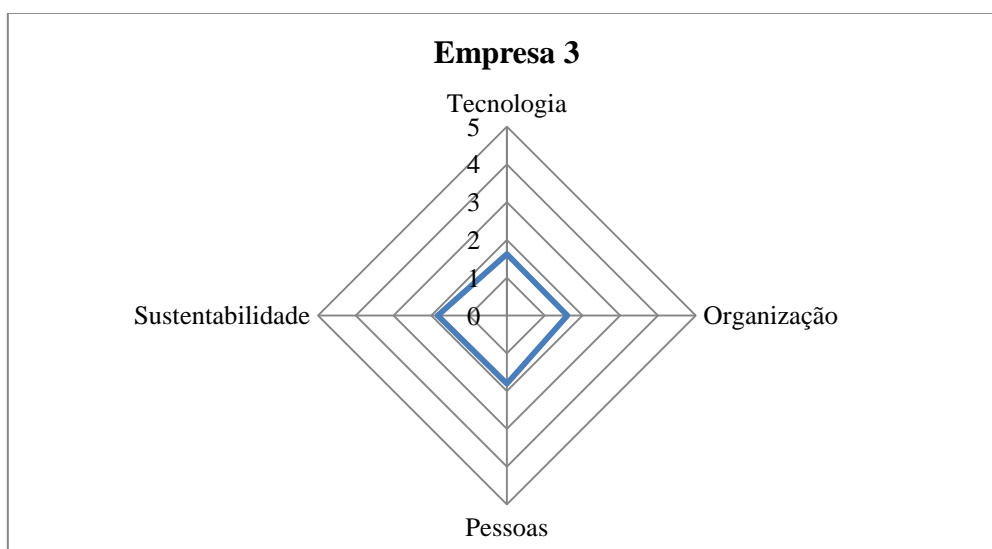
Gráfico 1 - Resultados da empresa 1 por dimensão



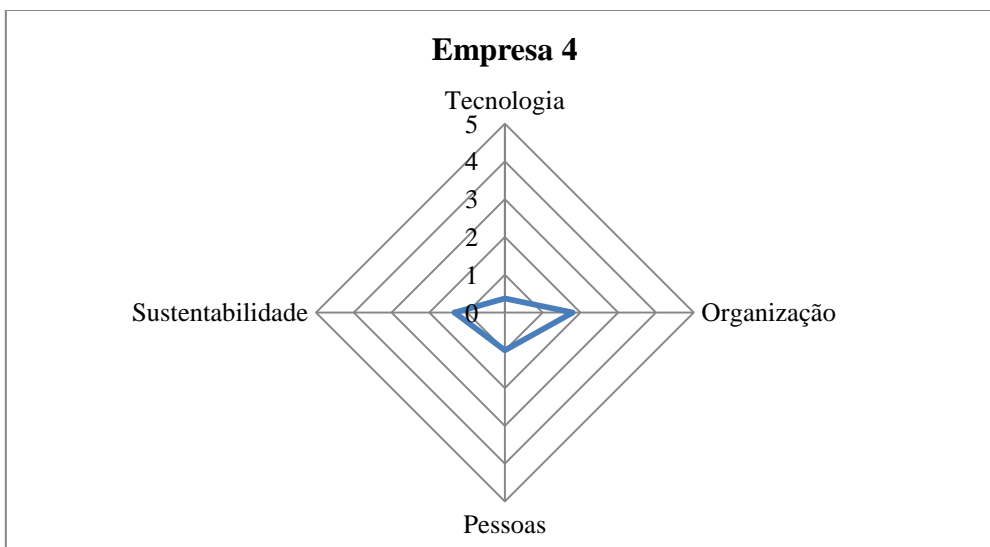
Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Gráfico 2 - Resultados da empresa 2 por dimensão

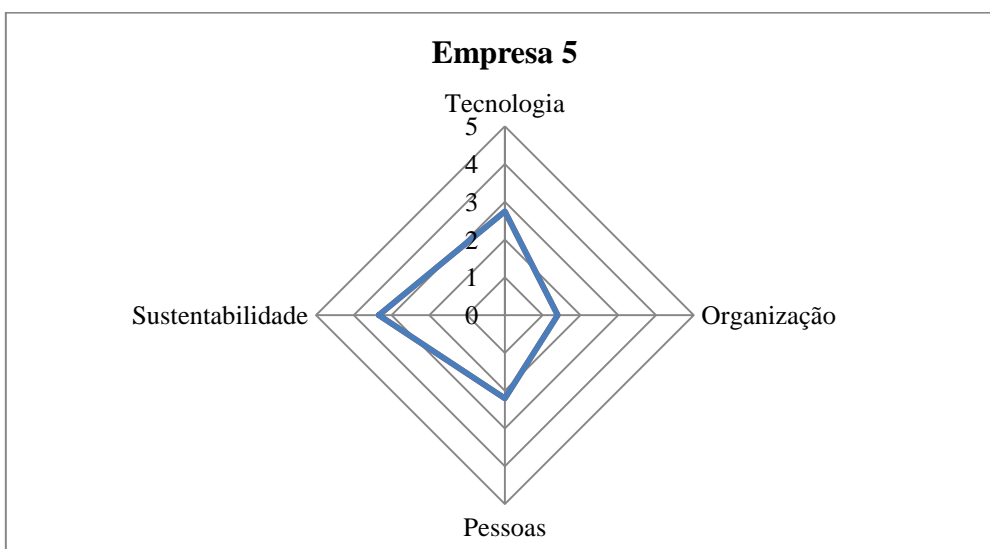
Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Gráfico 3 - Resultados da empresa 3 por dimensão

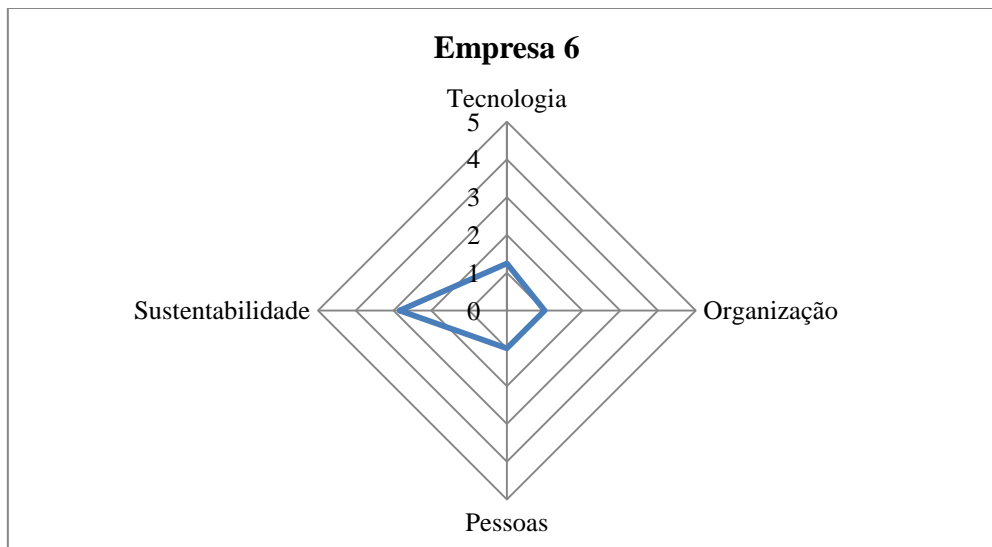
Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Gráfico 4 - Resultados da empresa 4 por dimensão

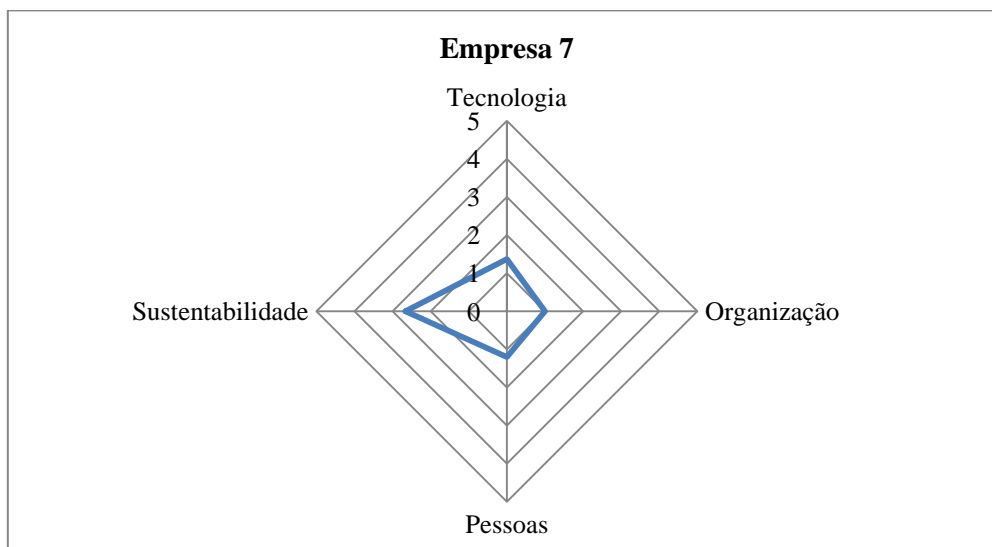
Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Gráfico 5 - Resultados da empresa 5 por dimensão

Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Gráfico 6 - Resultados da empresa 6 por dimensão

Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Gráfico 7 - Resultados da empresa 7 por dimensão

Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

A partir desses dados é possível verificar que a Empresa 1 obteve no geral, os melhores resultados em todas as dimensões avaliadas. Além disso, foi a única participante que obteve nota maior que 4 na média de alguma das dimensões avaliadas. Já a Empresa 4 apresentou, no geral, as menores avaliações, além de não obter média superior a 2 em nenhuma das dimensões do modelo devido à inexistência de implantação de várias dimensões (nota zero).

A partir dos dados consolidados da Tabela 2, foi calculada a média simples das avaliações de cada empresa, aplicando arredondamento a esses valores, sendo assim possível estabelecer o nível de maturidade de cada um dos participantes, conforme proposta da presente pesquisa. O Quadro 13 apresenta o nível de maturidade de cada empresa, de acordo com os estágios já apresentados no item 4.1.2 (Inexistente, Informatização, Conectividade, Visibilidade, Transparência e Adaptabilidade).

Quadro 13 - Nível de maturidade das empresas participantes da pesquisa.

Empresa	Nível de maturidade
Empresa 1	3 – Visibilidade
Empresa 2	2 – Conectividade
Empresa 3	2 – Conectividade
Empresa 4	1 – Informatização
Empresa 5	3 - Visibilidade
Empresa 6	2 – Conectividade
Empresa 7	2 – Conectividade

Fonte: Dados da Pesquisa (2022)

Foi observado que quatro das empresas participantes (Empresas 2, 3, 6 e 7) obteve avaliação correspondente ao nível de maturidade 2 – Conectividade, que é caracterizado pela predominância de projetos criados em meio digital, além da integração das tecnologias existentes.

A empresa 4 teve a menor avaliação e está inserida no nível de maturidade 1- Informatização, ou seja, não há uso disseminado de processos com interface digital e as tecnologias são utilizadas de modo isolado.

As participantes com melhor avaliação (Empresas 1 e 5) estão inseridas no nível 3 – Visibilidade, portanto seus processos são bem mapeados e acompanhados, com geração de dados em todas as etapas construtivas, além de se observar os primeiros benefícios da adoção de tecnologias relacionadas à I4.0.

Desse modo, de acordo com o modelo proposto, a maioria das empresas participantes obtiveram notas que as colocam em níveis baixos de maturidade, e apenas duas empresas foram capazes de alcançar um estágio intermediário, sendo as participantes com o maior nível de maturidade aferido.

4.3 Diagnóstico das tecnologias utilizadas

Em relação às tecnologias utilizadas pelas empresas participantes, a pesquisa mostrou que há uma grande disparidade na adoção de tecnologias. Apenas uma entrevistada (Empresa 1) utiliza o BIM na maior parte dos seus projetos, se valendo principalmente do *software Autodesk Revit*. O substancial uso do BIM pela empresa 1 foi justificado pela sua precisão na extração de quantitativos, geração de modelos arquitetônicos 3D e facilidade de geração de documentação gráfica para os clientes.

As outras participantes relataram não fazer uso de qualquer ferramenta BIM, apesar de terem ciência de seus benefícios, e todos seus projetos são baseados nos *softwares* 2D tradicionais, sendo o *software Autodesk AutoCAD* o mais utilizado. Essa ausência de ferramentas BIM foi atribuída aos altos custos iniciais de aquisição de licenças de uso e necessidade de treinamento de pessoal. Outra dificuldade apontada foi a carência na formação profissional de engenheiros, arquitetos e técnicos, uma vez que a tecnologia BIM ainda não está totalmente inserida nas grades curriculares das universidades locais.

A maior parte das participantes alegou fazer uso da computação em nuvem em algum grau, sendo o armazenamento de arquivos o principal uso e justificando-se pela facilidade de edição e compartilhamento de documentos em tempo real. O único item tecnológico unânime refere-se aos elementos estruturais pré-fabricados, uma vez que todas as empresas relataram fazer seu uso em seus processos construtivos devido à maior uniformidade das peças e aumento de velocidade de execução. As outras tecnologias apontadas na Revisão Bibliográfica do presente estudo (robôs, IoT, RFID e dfab) não foram detectadas nas empresas participantes e seus usos e benefícios não são de amplo conhecimento das empresas de construção da região.

A dimensão Organização do modelo, ao se basear em estratégias e gerenciamento de organizações, buscou identificar as práticas diretamente relacionadas

à I4.0, a exemplo da coleta, análise e uso de dados para tomada de decisões, além do tratamento dado à segurança de dados próprios e de terceiros. No geral, foram observadas respostas com baixa pontuação em grande parte dos itens, o que mostra que ainda há grande espaço para melhorias nessa área.

Práticas inerentes à Indústria 4.0 (tais como *big data* e *cybersecurity*) ainda não são observadas nas empresas locais e tampouco há um entendimento profundo de seus valores para a otimização de processos e obtenção de vantagens competitivas sobre a concorrência. Assim, considerando a dimensão Organização, pode-se afirmar que a I4.0 não é considerada no planejamento estratégico das entrevistadas, ou seja, seus princípios ainda não fazem parte do cotidiano das empresas locais.

A dimensão Pessoas do modelo, baseada em práticas de valorização da força de trabalho necessária para as atividades relacionadas à Indústria 4.0, tais como a compreensão de recursos tecnológicos e a rápida capacidade de adaptação frente a inovações, apresentou as menores médias computadas no questionário aplicado.

As entrevistadas informaram haver cultura interna de aperfeiçoamento pessoal, através de cursos de qualificação, entretanto, tais cursos são voltados para tópicos como o da segurança do trabalho e normas reguladoras. Essas ações são de grande valia, considerando a baixa capacitação profissional disponível hoje no mercado, mas não estão diretamente ligadas às exigências da I4.0.

Ainda é baixa a exposição de funcionários a novas tecnologias, e quando ela ocorre é de maneira limitada a um pequeno contingente no nível gerencial das empresas, e muitas vezes as deficiências de formação dificultam a abertura dos profissionais a essas tecnologias e inovações.

Na dimensão Sustentabilidade do modelo as empresas apresentaram seus melhores desempenhos no questionário aplicado, evidenciando que esse aspecto possui as ações mais robustas em relações a práticas exigidas pela I4.0. Há o consenso de que uso de tecnologias é capaz de melhorar as condições de trabalho, ao aumentar ganhos de produtividade e diminuir os riscos de segurança para os trabalhadores.

Em relação aos resíduos gerados, a maior parte das entrevistadas adota práticas de reuso e reciclagem. Os restos de alvenaria, concreto e argamassas são reutilizados em aterros e no preenchimento de vãos na execução de vedações. As madeiras são reutilizadas exaustivamente, e quando não têm mais possibilidade de uso elas são enviadas para trituração e posterior uso como combustível. Materiais de papel e

papelão, como as embalagens de insumos, muitas vezes podem ser encaminhadas para cooperativas de reciclagem e objetos metálicos (aparas de vergalhão, pedaços de tubos, arames, dentre outros) são comercializados como sucatas metálicas e acabam tendo como destino final a indústria siderúrgica.

4.4 DIFICULDADES PARA ADOÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

A pesquisa mostrou que não há emprego maciço de tecnologias nas empresas participantes. Ficou evidenciada a falta de cultura voltada à inovação e os entrevistados apontaram como obstáculos os altos custos para pequenas empresas, que são a maior parte do setor da construção, além da necessidade de treinamento de mão de obra.

Foi apontada também a deficiência na formação acadêmica em relação à metodologia BIM, uma vez que os principais profissionais envolvidos no planejamento de obras (engenheiros, arquitetos, técnicos de edificação, desenhistas, etc.) nas empresas participantes não tiveram contato com a tecnologia durante seus cursos de graduação.

As empresas locais ainda operam e se baseiam em ferramentas tradicionais que se baseiam em modelos bidimensionais, como o *Autodesk AutoCAD*, sendo essa a evolução dos antigos desenhos técnicos feitos à mão.

Quanto às outras tecnologias associadas, a revisão da literatura também mostrou que se trata de um setor altamente fragmentado e formado em sua maior parte por empresas de pequeno e médio porte, logo, existe uma grande limitação de aplicação de recursos no desenvolvimento e utilização de tecnologias. Atualmente, apesar dos benefícios relatados, apenas uma pequena parte do setor da construção civil adota e se beneficia das mais recentes ferramentas tecnológicas.

4.5 COMPARAÇÃO TECNOLOGIAS NOVAS X TRADICIONAIS

A maior parte dos participantes ainda tem seus projetos baseados em *softwares* 2D e utilizam programas computacionais que geram ganhos de eficiência em relação aos antigos desenhos técnicos feitos a mão. No entanto, essa prática não pode ser relacionada à I4.0 pois apenas proporciona um aprimoramento da representação visual de projetos. Nesse contexto, o BIM e seus conceitos e práticas relacionados se mostram como autênticos e totalmente inseridos no rol de tecnologias emergentes da I4.0.

Por ser a principal ferramenta tecnológica relacionada à I4.0, o BIM possui muitos estudos que relatam seus benefícios. Dentre as empresas participantes da presente pesquisa, apenas uma de fato utiliza a tecnologia e apontou algumas vantagens no seu uso. Primeiramente, o uso do BIM possibilita representações de modelos 3D em alta qualidade, quantitativos de materiais e mão de obra mais precisos, além de diminuir os retrabalhos nas execuções devido à detecção de interferências nos diversos sistemas que compõem uma edificação. A empresa também cita as recentes legislações que exigem o BIM em projetos de engenharia no âmbito do poder executivo federal, o que deve aumentar a inserção do BIM no país. Porém, a participante não soube fornecer dados quantitativos que corroborem essas vantagens do BIM.

Na literatura existente encontram-se exemplos de uso de *dfab*, desde elementos construtivos isolados até um edifício completo valendo-se do uso de robôs e técnicas de manufatura aditiva, além de exigir alto grau de colaboração entre homem e máquina nos diversos processos construtivos necessários. Os estudos relacionados a esse tema descrevem o processo de *dfab* e descrevem seus principais benefícios (tais como a racionalidade no uso de materiais e maior segurança para trabalhadores), entretanto, não há registro de dados quantitativos que possam comparar objetivamente o uso dessa tecnologia às técnicas tradicionais hoje utilizadas. Nesse sentido, o *dfab*, assim como outras tecnologias, carece de pesquisa para determinação de seu custo-benefício.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver um instrumento capaz de medir os estágios de implantação da I4.0 no setor da construção civil. O modelo proposto foi baseado a partir de outros modelos de maturidade da I4.0 existentes para outros setores, e é constituído de recursos técnicos, recursos de gestão e cultura organizacional, além de abordar as dimensões de sustentabilidade e força de trabalho. O questionário correspondente, constituído de vinte e quatro questões fechadas, foi aplicado em sete empresas localizadas na cidade de Manaus, todas da área da construção civil, inseridas no mercado de construções residenciais e comerciais da cidade. Através dele foi possível identificar que as participantes possuem baixo nível de maturidade, sendo o nível 3 (Visibilidade) o maior estágio observado.

Apesar de existir um grande potencial para que empresas da construção civil obtenham aumento de produtividade com o uso das tecnologias da I4.0, tecnologias emergentes como IoT, RFID e *dfab* ainda não foram incorporadas em projetos de construção apesar dos benefícios identificados na literatura.

Este estudo aplicado e seu modelo de maturidade elaborado tiveram intuito de contribuir com o setor da construção para a disseminação e compreensão dos principais pilares da I4.0 e suas tecnologias correspondentes, tendo colaborado, conseqüentemente, com o meio acadêmico também ao adensar um maior entendimento do fenômeno pesquisado.

Espera-se que a ferramenta possa ser replicada em outras localidades, haja vista que a base teórica do modelo não o restringe a localização geográfica. Destaca-se novamente o caráter exploratório deste trabalho, uma vez que não se pretende determinar o presente modelo proposto como instrumento exclusivo para a avaliação da maturidade de construtoras na adoção de tecnologias I4.0.

É válido apontar que a principal limitação desta pesquisa é a pequena quantidade de empresas participantes, além de todas terem atuação apenas na cidade de Manaus. Assim, como sugestão para futuros estudos do tema, pode-se aplicar o questionário em um número maior de empresas e em outras localidades, além de considerar outros aspectos e variáveis (subsetor de atuação, faturamento das participantes, número de funcionários, etc.), visto o dinamismo da I4.0 e qualquer exame sobre o tema deve ser visto sob uma ótica evolutiva, passando por atualizações e revisões.

6 CONTRIBUIÇÕES

A presente Dissertação, ao realizar a identificação e análise das tecnologias e práticas da Indústria 4.0 inseridas no setor construtivo, além da proposição de um modelo de maturidade, gerou contribuições acadêmicas, sociais e econômicas.

6.1 Contribuições Acadêmicas

Através da revisão de literatura apresentada pôde-se expor as características mais relevantes da Construção 4.0, termo esse que se refere às tecnologias e práticas da I4.0 que já estão em uso em processos construtivos.

Outra contribuição acadêmica é a possibilidade de utilização, por outros pesquisadores, do modelo proposto para avaliação da maturidade de empresas da construção civil, considerando a escassez de material científico que relaciona a maturidade de empresas de construção à I4.0.

6.2 Contribuições Sociais

Em relação ao cenário social, esta Dissertação apresentou uma melhor forma de entendimento para a sociedade sobre os fundamentos da I4.0 e da Construção 4.0, expondo suas principais características e componentes, além dos benefícios possíveis com a adoção de novas tecnologias.

Ademais, a pesquisa mostrou os desafios relacionados à formação e treinamento da força de trabalho necessária para a I4.0, uma vez que os resultados da pesquisa apontam que há grande deficiência nesse quesito.

6.3 Contribuições Econômicas

No campo econômico, esta pesquisa aplicada proporciona uma maior exposição de empresas construtoras à I4.0, incentivando a assimilação de seus conceitos e benefícios. O conhecimento dos níveis de maturidade apresentados no modelo proposto pode proporcionar melhorias de processos e serviços, resultando em maiores ganhos financeiros.

O questionário proposto nesta pesquisa tem importância relevante, já que pode servir de instrumento para mapeamento do estágio de maturidade de organizações no contexto da I4.0 e identificação das necessidades de investimentos e desenvolvimento de novas tecnologias e práticas gerenciais.

REFERÊNCIAS

ACATECH National Academy of Science and Engineering. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. Working Group, Germanz, 2013.

ACETO, G. *et al.* Industry 4.0 and Health: Internet of Things, Big Data, and Cloud Computing for Healthcare 4.0. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 18, 2020.

ADDO-TENKORANG; HELO. Big Data applications in operations/supply-chain management: A Literature Review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 101, 528-543, 2016.

ALBACH, H. e MOERKE, A. Die Überlegenheit der japanischen Unternehmen im globalen Wettbewerb. Berlin, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Discussion Paper FS IV 96-4, Mai 1996.

ALEXOPOULOS, K. *et al.* Collaborative maintenance in flow-line manufacturing environments: na Industry 4.0 approach. **5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production**, v. 55, p. 236-241, 2016.

ARAYICI, Y. e COATES, P. A system engineering perspective to knowledge transfer: a case study approach of BIM adoption. **Virtual Reality-Human Computer Interaction**, v. 2006, p. 179-206, 2012.

AXELSSON, J.; FROBERG, J.; ERIKSSON, P. Towards a system-ofsystems for improved road construction efficiency using lean and Industry 4.0. **13th Annual Conference on System of Systems Engineering**, IEE, p. 576-582, 2018.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.

BAHRIN, M.; OTHMAN, F.; AZLI, N.; TALIB, M. Industry 4.0: A review on Industrial automation and robotic. **Journal Teknologi**, v.78, 2016.

BECKER, J.; KNACKSTEDT, R.; PÖPPELBUSS, J. Developing maturity models for IT management. **Business & Information Systems Engineering**, p. 213-222, 2009.

BEM-DAYA, M.; HASSINI, E.; BAHROUN, Z. Internet of Things and supply chain management: A Literature Review. **International Journal of Production Research**, 1-24, 2017.

BERMUDES, W. *et al.* Tipos de escalas utilizadas em pesquisas e suas aplicações. **Vértices**. Campos dos Goytacazes: v. 18, n.2, p. 7-20, 2016.

BLONDIAU, A. *et al.* Designing and Implementing Maturity Models in Hospitals: An experience Report from 5 Years of Research. **Health Informatics Journal**, v. 22, p. 758-767, 2016.

BRUNO, F. S. **A Quarta Revolução Industrial do setor têxtil e de confecção: a visão de futuro para 2030**. São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2016.

BUER, S. V. *et al.* The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 56, n.8, 2924-2940, 2018.

CALVO, M. C. M. **Estatística descritiva**. Florianópolis: UFSC, 2004.

Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **PIB Brasil e Construção Civil**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>.

CAMPOS, F. R. **A gestão da inovação em serviços intensivos em conhecimento: oportunidades e desafios do Big Data**. 2015. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Universidade Estadual de Campinas, 2016.

CASTELO, A. M. *et al.* **A construção digital parte 2**. Disponível em <https://blogdoibre.fgv.br/posts/construcao-digital-parte-2>.

CHENG, J.; MA, L. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. **Waste management**, v. 33, p. 1539-1551, 2013.

COELHO, P. M. **Rumo a Indústria 4.0**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

COLLIS, J.; HUSSEY, R. **Pesquisa em administração: um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

CHEN, Q. *et al.* Construction Automation: research areas, industry concerns and suggestions for advancement. **Automation in Construction**, v. 94, p. 22-38, 2018.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. São Paulo: Cortez, 2018.

CHO, H. S.; WOO, T. H. Cyber security in nuclear industry – Analytic study from the terror incident in nuclear power plants (NPPs). **Annals of Nuclear Energy**, v. 99, p. 47-53, 2017.

COLLABO. **Transformações na Indústria 4.0 na realidade das empresas. Joinville**, 2016. Disponível em: <https://blog.collabo.com.br/transformacoes-industria-4-0>

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Sondagem Especial da Indústria 4.0**. Indicadores CNI, ano 17, n.02, 2016.

CONNER, B. P. *et al.* Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, v. 1-4, p. 64-76, 2014.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. **Métodos de pesquisa em Administração**. 12. ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2016.

CUOGO, F. C. **O reflexo da terceira revolução industrial na sociedade informacional e sua relação com a educação a distância**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DALLASEGA, P.; RAUCH, E.; LINDER, C. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: a systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 99, p. 205-225, 2018.

DAYAN, R.; EVANS, S. KM your way to CMMI. **Journal of Knowledge Management**, v. 10, p. 69-80, 2006.

DE BRUIN, T. *et al.* Understanding the main phases of developing a maturity assessment model. Artigo apresentado em 16th Australasian Conference on Information Systems, Sydney, Australia, novembro de 2005.

DE PACE, F. *et al.* Augmented Reality in Industry 4.0. **American Journal of Computer Science and Information Technology**, v. 6, n. 1:17, 2018.

DIAS, M. A. **O que é uma Pesquisa Survey**. 2019 Disponível em: <https://www.opuspesquisa.com/blog/tecnicas/pesquisa-survey/>

DIEHL, C. A.; SOUZA, M. A.; DOMINGOS, L. E. C. O uso da estatística descritiva na pesquisa em custos: análise do XIV congresso brasileiro de custos. **ConTexto**, v. 7, n. 12, 2007.

DJURIC, A. M. *et al.* “A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems. SAE **International Journal of Materials and Manufacturing**, v. 9, n. 2, 2016.

DUTRA, D. S.; SILVA, J.R. Product-Service Architecture (PSA): toward a Service Engineering perspective in Industry 4.0. **IFAC Conference**, v. 49, n. 31, p. 91-96, 2016.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook – A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. 2nd edition, Wiley, 2011.

ELIA, V. *et al.* Evaluating the application of augmented reality devices in manufacturing from a process point of view: an AHP based model. **Expert Systems with Applications**, v. 63, p. 187-197, 2016.

FABRICIO, M. M. **Industrialização das construções: uma abordagem contemporânea**. Tese (Livre Docência em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Construção Civil: Desafios 2020**, 2014. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/construcao-civil/desafios.htm>

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Panorama da Inovação Indústria 4.0**. Publicações FIRJAN, Cadernos Senai de Inovação, abr., 2016.

FORGUES, D.; RIVEST, L.; DANJOU, C.; MEYER, J. De l’Industrie 4.0 à la Construction 4.0: Des exemples concrets!. **Congrès 2019: influencez l’avenir**, 2019.

FRAZIER, W. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, p. 1917-1928, 2014.

FREUND, J. E.; SIMON, G. A. **Estatística aplicada**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2000.

FRIGIERI, V.; ZILBOVICIUS, M. Proposta de um modelo de análise da integração operacional em empresas de construção civil. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, 2002.

GAO, H.; KOCH, C.; WU, Y. Building information modelling based building energy modelling: A review. **Applied Energy**, v.238, p.320-343, 2019.

GHINIS, C. P.; FOCHEZATTO, A. Crescimento pró-pobre nos estados brasileiros: análise da contribuição da construção civil usando um modelo de dados em painel dinâmico, 1985-2008. **Economia Aplicada**, v. 17, n. 3, p. 243-266, 2013.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas; 2017.

GIORDANO, C. M. *et al.* Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Revista Produção Online**, v. 16, n. 2, p. 499-523, 2016.

GONZALEZ, A. G. C. *et al.* Supervisory Control-Based Navigation Architecture: A New Framework for Autonomous Robots in Industry 4.0 Environments. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, n. 4, 2018.

GRAY, D. E. **Pesquisa no mundo real**. 2. ed. Porto Alegre: Penso, 2012.

GEISSBAUER, R. *et al.* Industry 4.0: Building the digital enterprise - 2016 Global Industry 4.0 Survey. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>

HAMPSON, K.; KRAATZ, J. A.; SANCHEZ, A. X. **The global construction industry and R&D**, Routledge: Oxon, 2015.

HAUG, K. C. *et al.* Cloud adaptiveness within industry sectors- Measurement and observations. **Telecommunications Policy**, v. 40, n. 4, p.291-306, 2016.

HE, Z. *et al.* Research on Human-Computer Interaction Technology of Wearable Devices Such as Augmented Reality Supporting Grid Work. **Procedia Computer Science**, v. 107, p. 170-175, 2017.

HELGESSION, Y. Y. L. *et al.* A Review for Evaluation of Maturity Models for Process Improvement. **Journal of Software-Evolution and Process**, v. 24, p. 436-454, 2012.

HERMANN, M. *et al.* Design Principles for Industrie 4.0 scenarios. **49th Hawaii International Conference on System Sciences**, v. 1, p. 3928-3937, 2016.

Hossain, M.; Nadeem, A. Towards digitizing the construction industry: state of the art of Construction 4.0. **Interdependence between Structural Engineering and Construction Management**, v. 6, 2019.

HOZDIC, E. **Smart Factory for Industry 4.0: A Review**. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, v. II, n. 1, 2015.

INHABITAT. Disponível em: <https://inhabitat.com/the-in-situ-fabricator-is-an-autonomous-construction-worker-that-can-learn-on-the-job/>

IREVIEW. Disponível em: <https://www.ireviews.com/news/2017/04/05/sam100-semi-automated-mason>

LABONNOTE, N. *et al.* Additive construction: state of the art, challenges and opportunities, **Automation in Construction**, v. 72, p. 347-366, 2016.

LA RIVERA, F. M. *et al.* Methodological-Technological Framework for Construction 4.0. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 28, p. 689-711, 2020.

LANDES, D. S. **The Unbound Prometheus. Technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present**. 2 ed, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

LANDHERR, M. *et al.* **The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development**. *Procedia CIRP*, v. 57, p. 26-31, 2016.

LAPLUME, A. O. *et al.* Global value chains from a 3D printing perspective. **Journal of International Business Studies**, v. 47, n. 5, p. 595-609, 2016.

LEUSIN, S. R. **Gerenciamento e coordenação BIM – Um guia de ferramentas e boas práticas para o sucesso de empreendimentos**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2018.

LI, H. *et al.* Cooperative benchmarking: a tool for partnering excellence in construction. **International Journal of Project Management**, v. 19, p. 171-179, 2001.

LI, J.; YANG, H. A Research on Development of Construction Industrialization Based on BIM Technology under the background of Industry 4.0. **Matec Web of Conferences**, v. 100, p. 2046-2053, 2017.

LIN, H. F. A stage model of knowledge management: na empirical investigation of process and effectiveness. **Journal of Information Science**, v. 33, p. 643-569, 2007.

LIU, J. *et al.* Correlation and agrément: overview and clarification of competing concepts and measures. **Shanghai Arch Psychiatry**, v. 28, p. 115-120, 2016.

LOOSEMORE, M. **Innovation strategy and risk in construction**. 1 ed. New York: Routledge, 2014.

LU, W. *et al.* Computational Building Information Modelling for construction waste management: Moving from rhetoric to reality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 587-595, 2017.

MACHADO, L. A. **REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS: DO VAPOR À INTERNET DAS COISAS.** Disponível em: <http://www.cofecon.gov.br/2016/10/13/revolucoesindustriais-do-vapor-a-internet-das-coisas/>.

MHASKE, M. *et al.* Construction waste minimization. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 4, 2017.

MAHMUD, S. H.; ASSAN, L.; ISLAM, R. Potentials of Internet of Things (IoT) in Malaysian Construction Industry. **Annals of Emerging Technologies in Computing**, V. 2, N. 4, 2018.

MAIER, A. M. *et al.* Assessing Organizational Capabilities: Reviewing and Guiding the Development of Maturity Grids. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 59, p. 138-159, 2012.

MARRA, M. *et al.* A gap analysis methodology for product lifecycle management assessment. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 65, p. 155-167, 2018.

MARX, F. *et al.* Amaturity model for management control systems: five evolutionary steps to guide development. **Business and Information Systems Engineering**, v. 4, p. 193-207, 2012.

MASKURITY, R. *et al.* Industry 4.0 for the construction industry: How ready is the industry? **Applied Sciences**, v. 9, 2019.

MASOOD, T.; EGGER, J. Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 58, p. 181-195, 2019.

MEDEIROS, S. M.; ROCHA, S. M. M. Considerações sobre a Terceira Revolução Industrial e a força de trabalho em saúde em Natal. **Ciência & Saúde Coletiva**, vol. 9, 2004.

MELLO, L. C. B. B. **Modernização das pequenas e médias empresas de construção civil: impactos dos programas de melhoria da gestão da qualidade.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2007.

MENDES, C. R. *et al.* Estudos de caso da Indústria 4.0 aplicados em uma empresa automobilística. **POSGERE**, v. 1, n. 4, 2017.

MINEIRO, M. Pesquisa Survey e Amostragem: Aportes Teóricos Elementares. **Revista de Estudos em Educação e Diversidade**, v. 1, n. 2, p. 284-306, 2020.

MONOSTORI, L. *et al.* Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals**, v. 65, 621-641, 2016.

MOHAJAN, H. K. The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. **Journal of Social Sciences and Humanities**, v. 5, n. 4, p. 377-387, 2019.

MULLER, R. *et al.* Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction. **Procedia CIRP**, v. 44, p. 210-215, 2016.

NAYYAR, A.; KUMAR, A. A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development. **Advances in Science, Technology & Innovation**, 2020.

AFFONSO NETO, A. O Capability Maturity Model, CMM, na melhoria de processos. **Professorannibal**, 2018. Disponível em: <https://professorannibal.com.br/2018/08/21/1247/>. Acesso em: 14 de abr. de 2022.

OECD. **Oslo Manual: guidelines for collecting and interpreting innovation data**. 3 ed. Paris: OECD/European Communities, 2005.

OLATUNJI, O. A. A Preliminary Review on the Legal Implications of BIM and Model Ownership. **ITcon**, v. 16, p.687-696, 2011.

OLUGBENGA, A. *et al.* Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholder's expectations for industry deployment. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 375-385, 2018.

OPPENHEIM, A. N. **Questionnaire design, interviewing and attitude measurement**. Londres: Pinter, 1992.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v. 83, p. 121-139, 2016.

PASETTI, G. M. *et al.* Parametric and generative design techniques in mass production environment as effective enablers of Industry 4.0 approaches in the building industry. **Automation in Construction**, v. 92, p. 270-285, 2018.

PEREIRA, A. C.; ROMERO, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1206-1214, 2017.

PINSONNEAULT, A.; KRAEMER, K. L. Survey research in management information systems: an assessment. **Journal of Management Information System**, 1993.

POEPELBUSS, J.; ROEGLINGER, M. What makes a useful maturity model? A framework of general design principles for maturity models and its demonstration in business process management. **19th European Conference on Information Systems**, v. 9, 2011, Helsinque.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How Does Augmented Reality Work?. **Harvard Business Review**, p.58, 2017.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PULLEN, W. A public sector HPT maturity model. **Performance Improvement**, v. 46, p. 9-15, 2007.

RAHMAN, H.; RAHMANI, R. Enabling distributed intelligence assisted future internet of things controller (FITC). **Applied Computing and Informatics**, v. 14, n. 1, p. 73-87, 2018.

RASTOGI, D. S. Construction 4.0: The 4th Generation Revolution. In: The Indian Lean Construction Conference, 2017, Chennai.

RIBEIRO, J. M. **O conceito da Indústria 4.0 na confecção: análise e implementação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Têxtil – Universidade do Minho, 2017.

RODRIGUES, E. W. **Análise da Maturidade de empresas que desenvolvem projetos do setor da construção civil com o foco em gestão de desenvolvimento de produtos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

ROGLINGER, M. J. *et al.* Maturity Models in Business Process Management. **Business Process Management Journal**, v. 18, 2012.

RÜSSMANN, M. *et al.* Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **The Boston Consulting Group**, v. 9, 2015.

SANCHEZ, M. *et al.* Industry 4.0: survey from a system integration perspective. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 2020.

SANTOS, J. B. S.; COSTA, A. P. C. S. Enterprise maturity models: a systematic literature review. **Enterprise Information Systems**, v. 13, p. 1-51, 2019.

SANTOS, M. A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy. **International Journal of Information Management**, v. 37, n. 6, 2017.

SASSON, A.; JOHNSON, J. C. The 3D printing order: variability, supercenters and supply chain configurations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 46, n. 1, p. 82-94, 2016.

SCHMIDT, M. *et al.* **Robot-assisted automation increases flexibility**. 100 Pioneers in Efficient Resource Management, 426-429, 2018.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SCHUH, G. *et al.* Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 19, p. 51-56, 2014.

SCHUH, G. *et al.* **Industrie 4.0 Maturity Index**. Managing the Digital Transformation of Companies (acatech STUDY) Herbert Utz Verlag, Munich, 2020.

SIMONI, D. L.; CECCONELLO, I. Modelo de maturidade aplicado à células de soldagem robotizada: uma proposta baseada no modelo CMMI. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, v. 8, n. 2, pp. 218-229, 2020.

SILVA, I. A.; BARBALHO, S. C. M. Modelos de maturidade do CMM aos modelos da Indústria 4.0. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO, 12., 2019, Brasília.

SILVA, R. A. *et al.* Aplicando Internet das Coisas na Educação: Tecnologia, Cenários e Projeções. **Congresso Brasileiro de Informática na Educação**, 6, 2018.

SONG, G.; WANG, C.; WANG, B. Structural Health Monitoring (SHM) of Civil Structures. **Applied Sciences**, v. 7, n. 8, 2017.

SOTO, B. G. *et al.* Implications of Construction 4.0 to the workforce and organizational structures. **The International Journal of Construction Management**, p. 1-13, 2019.

SOTO, B. G. *et al.* Productivity of digital fabrication in construction: cost and time analysis of a robotically built wall. **Automation in Construction**, v. 92, p. 297-311, 2018.

SOUZA, B. A. *et al.* Análise dos indicadores PIB nacional e PIB da indústria da construção civil. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 17, n. 31, 2015.

SOUZA, R. **Diálogos com a construção**. 1. Ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2012.

SOUTO, R. G. **Gestão do processo de planejamento da produção em empresas construtoras de edifícios: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0 **Procedia CIRP**, v. 40, p. 536-541, 2016.

TEIXEIRA, L. P.; CARVALHO, F. M. A. A Construção Civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira. **Revista Paranaense de desenvolvimento**, n. 109, p. 9-26, 2005.

THOMAS, A. V.; SUDHAKUMAR, J. Factors influencing construction labour productivity: an indian case study. **Journal of Construction in Developing Countries**, v. 19, p. 53-68, 2014.

TIAN, X. Big Data and knowledge management: a case of déjà vu or back to the future? **Journal of Knowledge Management**, v. 21, n. 1, p. 113-131, 2017.

TIKU, S.; AZARIAN, M.; PECHT, M. Using a reliability capability maturity model to benchmark electronics companies. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 24, p. 547-563, 2007.

TUPTUK, N.; HAILES, S. Security of Smart Manufacturing Systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 47, p. 93-106, 2018.

VENANCIO, A. L. A. C.; BREZINSKI, G. L. **Sistema de avaliação de maturidade Industrial baseando-se nos conceitos da indústria 4.0**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

VIEIRA, B. A.; NOGUEIRA, L. CONSTRUÇÃO CIVIL: CRESCIMENTO VERSUS CUSTOS DE PRODUÇÃO CIVIL. **Sistemas & Gestão**, v.13, p. 366-377, 2018.

WANG, J.; FU, Y.; YANG, X. An integrated system for building structural health monitoring and early warning based on an Internet of Things approach. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 13, n. 1, p. 1-14, 2017.

WANG, S. *et al.* Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, jan., 2016.

WELLER, J. The complete guide to gap analysis. **Smartsheet**, 2018. Disponível em: <https://www.smartsheet.com/gap-analysis-method-examples>. Acesso em 25, jun. 2021.

WENDLER, R. The maturity of maturity model research: A systematic mapping study, *Information and Software Technology*, Volume 54, Issue 12, 2012, Pages 1317-1339,

WEYER, S. *et al.* Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. **IFAC**, v.49, n. 31, p. 97-102, 2016.

WILSON, D. C. S. Arnold Toynbee and the Industrial Revolution: The Science of History, Political Economy and the Machine Past. **History & Memory**, v. 26, n. 2, p.133-161, 2014.

WITKOWSKI, K. Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 763-769, 2017.

WORLD BANK. **The construction industry: issues and strategies in developing countries**. The World Bank, Washington, DC., 1984.

YEGANEH, A. A. *et al.* Root causes of design-construction interface problems in Iranian design-build projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 145, p. 1-14, 2019.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman; 2015.

ZANETTI, A. C. **Sistemática de avaliação de desempenho de uma unidade de negócios da indústria da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ZAPAROLLI, D. Canteiros de obra high tech. **Engenharia Inovação Tecnologia**, edição 278, 2019.

ZOU, K. H. *et al.* Correlation and simple linear regression. **Radiology**, v. 227, n. 3, 2003.

APÊNDICE A

Questionário

Favor responder as perguntas de acordo com o escopo e extensão dos conceitos da Indústria 4.0 na sua empresa, escolhendo apenas uma das respostas indicadas na escala de pontuação abaixo:

Nível 0 – Baixo ou inexistente nível de implementação;

Nível 1 – Ações planejadas ou em desenvolvimento;

Nível 2 – Implementação iniciada, alguns benefícios notados;

Nível 3 – Implementação intermediária, melhora de competitividade;

Nível 4 – Implementação avançada, benefícios evidentes;

Nível 5 – Empresa referência na aplicação dos conceitos da Indústria 4.0.

Dimensão 1 – Tecnologia

1.1 Há o uso de ferramentas informatizadas nos projetos e processos construtivos?

1.2 Há o uso de ferramentas de modelagem BIM (Building Information Modeling)?

1.3 Há o uso de recursos de computação em nuvem – cloud computing (armazenamento de arquivos, ambientes virtualizados, sistemas em nuvem, etc.) para armazenar e processar dados?

1.4 Há o uso de sensores no processo produtivo?

1.5 Há o uso de automação no processo produtivo?

1.6 Há integração e interconectividade entre os diversos sistemas computacionais?

1.7 Há uso de procedimentos e ferramentas para proteção de dados contra uso indevido?

1.8 Há uso de elementos pré-fabricados no processo construtivo?

Dimensão 2 – Organização

2.1 Há a cultura de aprendizado baseado em dados?

2.2 Há cultura orientada à inovação e à incorporação de novas tecnologias?

2.3 Há investimento em inovação tecnológica?

2.4 A Indústria 4.0 é considerada no planejamento estratégico?

2.5 Há estrutura de TI necessária para atender aos requisitos de digitalização da Indústria 4.0?

Dimensão 3 – Pessoas

3.1 Há a cultura de aperfeiçoamento pessoal?

3.2 Há exposição dos funcionários a novas tecnologias e inovações?

3.3 Os funcionários se mostram abertos a novas tecnologias e inovações?

3.4 Os funcionários possuem competência para as inovações relacionadas à Indústria 4.0?

3.5 Há colaboração de agentes externos (Universidades, consultorias, outras empresas, etc.) acerca da adoção de novas tecnologias?

Dimensão 4 – Sustentabilidade

- 4.1 Há destinação correta de resíduos da construção?
- 4.2 Há reaproveitamento ou reciclagem de materiais?
- 4.3 As tecnologias adotadas permitem aumento de produtividade de trabalhadores?
- 4.4 O uso de tecnologias permite melhores condições de trabalho?
- 4.5 O uso de tecnologias pode ocasionar redução ou substituição de trabalhadores?
- 4.6 Há preocupação com a segurança de dados de terceiros?