

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DOS DESAFIOS DE APLICAÇÃO DE
MODELOS DE MATURIDADE PARA
IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO
DE CASOS MÚLTIPLOS**

Por,

Isaac Ambrosio da Silva

Brasília, 06 de outubro de 2020.

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DOS DESAFIOS DE APLICAÇÃO DE
MODELOS DE MATURIDADE PARA
IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO
DE CASOS MÚLTIPLOS**

Isaac Ambrosio da Silva

*Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de
Tecnologia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre Engenheiro em Sistemas Mecatrônicos.*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Sanderson César Macêdo Barbalho, EPR/UnB (Orientador)

Prof. Dra. Andrea Cristina dos Santos, EPR/UnB

Prof. Dra. Viviane Vasconcellos Ferreira Grubisic, EPR/UnB

Brasília, 06 de outubro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

DA SILVA, ISAAC AMBROSIO

Análise Dos Desafios De Aplicação De Modelos De Maturidade Para Implantação Da Indústria 4.0: Estudo De Casos Múltiplos,

[Distrito Federal] 2020.

xi, 92p., 297 mm (FT/UnB, Mestre Engenheiro, Sistemas Mecatrônicos, 2020). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Indústria 4.0

2. Tecnologias Habilitadoras

3. Modelos de Maturidade

I. Sistemas Mecatrônicos/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DA SILVA, I.A., (2020). Análise Dos Desafios De Aplicação De Modelos De Maturidade Para Implantação Da Indústria 4.0: Estudo De Casos Múltiplos. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação FT. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Isaac Ambrosio da Silva.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise dos desafios de aplicação de modelos de maturidade para implantação da Indústria 4.0: Estudo de casos múltiplos.

GRAU: Mestre Engenheiro

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Isaac Ambrosio da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e irmãos, que apesar da distância e das dificuldades de visitá-los durante o período letivo, sempre me apoiaram e incentivaram na carreira que escolhi.

Agradeço às grandes amizades que a vida acadêmica e profissional que a Universidade de Brasília puderam me proporcionar nesse período e em especial aos colegas da Faculdade de Tecnologia.

Agradeço aos professores da UnB por transmitir todo o conhecimento acadêmico e profissional, de grande importância para meu crescimento pessoal. Agradeço finalmente ao meu professor orientador Sanderson pelas indicações e conselhos fundamentais para a realização deste trabalho.

Isaac Ambrosio da Silva.

RESUMO

Diante da Quarta Revolução Industrial, conhecida também como Indústria 4.0, diversas tecnologias habilitadoras se tornam disponíveis, permitindo uma manufatura dinâmica, flexível, customizável e com alta qualidade. Alguns exemplos de tecnologias que estão revolucionando a manufatura são: Internet das Coisas (IoT) e Internet Industrial das Coisas (IIoT), Realidade Aumentada, Big Data e Data Analytics, Computação em Nuvem, Inteligência Artificial, Digital Twin, dentre outras. A implantação dessas tecnologias não é uma tarefa eminentemente técnica, pois cada empresa tem desafios próprios de caráter tecnológico, humano e organizacional. A literatura tem apontado os modelos de maturidade em Indústria 4.0 como formas de implementar melhorias. Nos últimos anos, várias pesquisas têm buscado o desenvolvimento de modelos que permitem avaliar o nível de maturidade de uma empresa considerando diversos fatores que influenciam se uma organização está preparada ou não para a Quarta Revolução Industrial. Nesse contexto, surge a necessidade de se avaliar o grau de desenvolvimento ou maturidade das organizações diante da Indústria 4.0. O presente trabalho apresenta um panorama da Indústria 4.0, suas tecnologias e os principais modelos de maturidade e capacidade desenvolvidos ao longo do tempo e suas similaridades e diferenças, além de apontar os desafios encontrados pelas empresas na adoção de tais modelos. Ao final é realizado um estudo de casos múltiplo com o objetivo de identificar a percepção de gestores de manufatura sobre a adoção dos modelos de maturidade em Indústria 4.0. Foi encontrado que existe um desequilíbrio em relação aos investimentos realizados nos setores das empresas, sendo privilegiado aqueles que atuam diretamente com a produção e que possuem mais ativos tecnológicos. Outro ponto é que as empresas avaliadas possuem preferência pela aplicação dos modelos de maturidade de forma presencial, com um tempo médio de entrevista entre 1h e 1h30.

Palavras Chave: Indústria 4.0; tecnologias habilitadoras; modelos de maturidade.

ABSTRACT

In the face of the Fourth Industrial Revolution, also known as Industry 4.0, technology enablers are becoming more accessible, making possible a dynamic, flexible, customized and high-quality manufacturing production. Some examples of technologies that are revolutionizing manufacturing: Internet of Things (IoT) and Industrial Internet of Things (IIoT), Augmented Reality, Big Data and Data Analytics, Cloud Computing, Artificial Intelligence, Digital Twin, among others. The implementation of these technologies is not an eminently technical task, because each company has its own technological, human and organizational challenges. The literature has pointed out the maturity models in Industry 4.0 as ways to implement improvements. In recent years, several researches have sought the development of models that allow assessing a company's maturity level considering several factors that influence whether an organization is prepared or not for the Fourth Industrial Revolution. In this context, there arises a need to evaluate the degree of development or maturity of institutions in the face of Industry 4.0. The current work presents an overview of the so-called Industry 4.0, its technologies and the main models of maturity and capability and their similarities and differences, in addition to pointing out the challenges encountered by companies in adopting that models. At the end, case studies are carried out in order to identify the perception of manufacturing managers about the adoption of maturity models in Industry 4.0. It was found that there is an imbalance of the investments activities made in the companies, being privileged those that act directly with the production and that have more technological assets. Ultimately, the companies evaluated have a preference for applying the maturity models in person, with an average interview time between 1h and 1h30.

Keywords: Industry 4.0; technology enablers; maturity models.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	12
1.1 REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS	12
1.1.1 1ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	12
1.1.2 2ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	13
1.1.3 3ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	15
1.1.4 4ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	16
1.2 OBJETIVO.....	17
1.3 METODOLOGIA	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
Capítulo 2 INDÚSTRIA 4.0 E TECNOLOGIAS HABILITADORAS	21
2.1 INDÚSTRIA 4.0	21
2.2 OS PILARES DA INDÚSTRIA 4.0	22
2.2.1 ROBÓTICA COLABORATIVA.....	22
2.2.2 BIG DATA.....	25
2.2.3 INTERNET DAS COISAS (IoT).....	26
2.2.3.1 RFID.....	28
2.2.3.2 WI-FI.....	29
2.2.3.3 BLUETOOTH.....	29
2.2.3.4 ZIGBEE.....	29
2.2.4 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS.....	30
2.2.5 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	30
2.2.6 DIGITAL TWIN	31
2.3 A INDÚSTRIA 4.0 EM DIFERENTES PAÍSES	32
2.3.1 CHINA	32

2.3.2	ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA.....	33
2.3.3	ALEMANHA	34
2.3.4	BRASIL.....	34
Capítulo 3	MODELOS DE MATURIDADE, CAPABILIDADE E PRONTIDÃO PARA INDÚSTRIA 4.0	36
3.1	MATURIDADE	36
3.2	CAPABILIDADE	37
3.3	PRONTIDÃO.....	40
3.4	MODELOS DE MATURIDADE PARA INDÚSTRIA 4.0 NA LITERATURA	41
Capítulo 4	DESENVOLVIMENTO	49
4.1	MODELO ACATECH.....	49
4.2	MODELO DREAMY	53
4.3	AN INDUSTRY 4 READINESS ASSESSMENT TOOL (WMG).....	55
4.4	INDUSTRY 4.0 READINESS (IMPULS):	61
4.5	MODELO DE SCHUMACHER et al (2016)	67
Capítulo 5	ESTUDO DE CASO –.....	71
	ENTREVISTA COM PROFISSIONAIS DA INDÚSTRIA.....	71
Capítulo 6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	Proposta de Modelo, desenvolvido em parceria UnB/WZL RWTH Aachen (2019)...	79
	Conclusões	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICE A – Questionário aplicado às empresas.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de máquinas utilizadas na Inglaterra no final do século XVIII (Baran, 1961).....	13
Figura 2. Linha de montagem do Ford modelo T, utilizando esteiras transportadoras.	15
Figura 3. Processo de soldagem utilizando manipuladores robóticos	16
Figura 4. Devol e Engelberger junto com seus colegas trabalhando no desenvolvimento do UNIMATE.....	23
Figura 5. Colaboração homem-robô na montagem de transmissão de eixos, em uma planta da BMW.	24
Figura 6. Relação entre população mundial e dispositivos conectados (em bilhões). (Cisco, 2011).	27
Figura 7. Evolução de publicações envolvendo o termo Industry 4.0 ao longo do tempo. Scopus e Web of Science.	42
Figura 8. Países com mais publicações com o termo Industry 4.0.	43
Figura 9. Publicações na Scopus e Web of Science com os termos Industry 4.0 e Maturity ao longo do tempo.	46
Figura 10. Representação dos 6 níveis de maturidade do modelo ACATECH.....	51
Figura 11. Representação das dimensões do modelo.	52
Figura 12. Modelo em forma de cubo do Industry 4.0 Readiness	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Palavras-chave e publicações (WoS e SCOPUS).....	44
Tabela 2. Modelos de Maturidade para Indústria 4.0.....	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Dimensões e Capabilidades - ACATECH.....	49
Quadro 2. Definição dos Níveis de Maturidade do DREAMY (DE CAROLIS, 2017)	54
Quadro 3. Dimensões e sub-áreas do modelo WMG.	56
Quadro 4. Descrição da Dimensão Produtos e Serviços do Modelo da WMG	59
Quadro 5. Estrutura do Modelo de Maturidade IMPULS	64
Quadro 6. Dimensões e sub-áreas do modelo de Schumacher	67
Quadro 7. Exemplo de questão presente no Modelo de Schumacher de 2016.....	69
Quadro 8. Dimensões Facilitadores e Tecnologias a partir dos modelos de maturidade	79
Quadro 9. Dimensões e respectivas variáveis do modelo <i>Industry 4.0 Readiness</i>	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

UnB	Universidade de Brasília
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPS	<i>Cyber Physical System</i> (Sistema ciber físico)
AI	<i>Artificial Intelligence</i> (Inteligência Artificial)
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> (Controlador Lógico Programável)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
ACATECH	<i>Deutsche Akademie der Technikwissenschaften</i> (Academia Alemã de Ciência e Engenharia)
CMMI	<i>Capability Maturity Model Integration</i> (Modelo Integrado de Capabilidade e Maturidade)
PME	Pequena e Média Empresa

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentadas as evoluções em tecnologias e processos de produção que proporcionaram as denominadas revoluções industriais até os desafios e oportunidades da chamada Indústria 4.0. São estabelecidos também os objetivos, a metodologia utilizada para a realização da pesquisa e a estrutura do trabalho.

1.1 REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

Ao longo dos últimos anos tem-se observado o avanço da utilização de novas tecnologias na cadeia produtiva em todo o mundo. Desde o início da industrialização, os processos produtivos sofrem influências e transformações através das tecnologias desenvolvidas, pelas demandas do mercado e também pelo surgimento de novos modelos de negócios.

No contexto das revoluções industriais, “Revolução” é definida como uma mudança abrupta na organização estrutural de uma sociedade que ocorre em um período relativamente curto de tempo (KUHN, 2011).

1.1.1 1ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

A Primeira Revolução Industrial, como destacado pelo historiador e economista Thomas Southcliffe Ashton (ASHTON, 1997), originou-se na Inglaterra entre os anos de 1760 a 1840 e teve como foco a substituição de métodos artesanais de produção por máquinas movidas a vapor, realizando uma transição da força muscular animal pela energia mecânica. Uma consequência foi uma maior mecanização de processos de produção de diversos itens, com destaque para a indústria têxtil, metalúrgica e química.

A invenção da máquina a vapor por James Watt em 1764, além de proporcionar grandes avanços no setor de metalurgia, mineração e transportes, permitiu que as fábricas não necessitassem se localizar às margens dos rios, aproximando, assim dos mercados.

A quantidade de teares do tipo mecânico na Inglaterra subiu de 2,4 mil em 1813 para aproximadamente 250 mil em 1950 (LANDES, 2003). Ao mesmo tempo o número de novas

patentes considerando a indústria ligada ao algodão subiu de 39, entre 1800 e 1820, para 156 na década de 1840 (BARAN, 1961).

Na Grã-Bretanha a energia instalada proveniente do vapor era de 10 mil CV em 1800, ultrapassando 200 mil em 1815 e de 1,29 milhão em 1850, contra 4 milhões do mundo todo (LANDES, 2003).

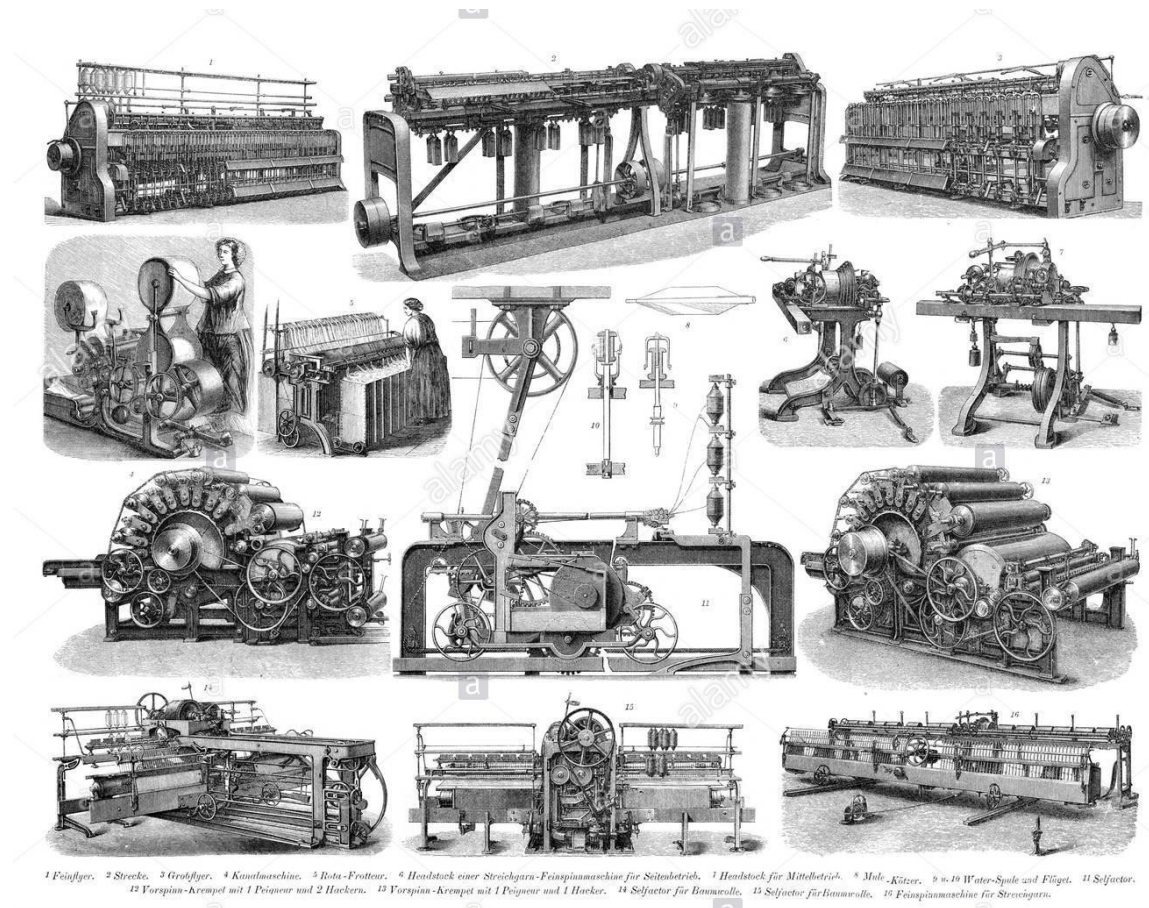


Figura 1. Exemplos de máquinas utilizadas na Inglaterra no final do século XVIII (BARAN, 1961).

1.1.2 2ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Enquanto a Primeira Revolução Industrial surgiu na Inglaterra e se espalhou pela Europa continental e EUA, a Segunda Revolução, também chamada de revolução tecnológica, se iniciou nos EUA e então em direção à Europa. O aprimoramento das

tecnologias e pesquisas científicas desenvolvidas durante a primeira revolução levaram à Segunda Revolução Industrial entre os anos de 1870 a 1914 (FRIEDLAENDER E OSER, 1953).

Grandes evoluções foram registradas nas áreas da química, eletricidade, biologia, transportes, engenharia de produção, dentre outras. Exemplo de inovação no período foi da lâmpada incandescente, patenteada por Thomas Edison, em 1879. A criação de máquinas industriais movidas por eletricidade gerou avanços econômicos e desenvolvimento de novos métodos produtivos principalmente no ocidente.

O aço assumiu um papel fundamental na indústria durante o período, levando a uma intensa substituição do ferro nas ferrovias, na construção naval e armamentos, além da inclusão de novos materiais como o tungstênio, manganês, cromo e níquel. Na Grã-Bretanha entre os anos de 1850 e 1880, a produção de aço passou de 49 mil toneladas para 1,44 milhão.

Porém, o grande destaque se dá para o desenvolvimento da eletricidade, pois enquanto a energia a vapor exigia que os geradores estivessem localizados na própria fábrica, durante a transmissão de movimento para os equipamentos, boa parte da energia era perdida. Já a eletricidade permitia o acoplamento de motores direto nos equipamentos, diminuindo o uso de meios de transmissão como eixos e correias.

Na sequência diversas invenções e descobertas foram feitas, como a bateria química de Volta, o eletromagnetismo, a indução magnética e o dínamo. A eletricidade permitiu o desenvolvimento de pequenas indústrias que poderiam utilizar a mesma fonte de geração de energia das grandes indústrias e pagar de acordo com seu consumo.

Outro destaque desse período foi a utilização de correias transportadoras, em Cincinnati, Ohio, em 1870, o que representaria um marco para a linha de produção em massa. Posteriormente Henry Ford levou esses princípios à produção automobilística e alterou-a drasticamente. Enquanto antes em uma estação era montado um automóvel inteiro, agora os veículos eram produzidos em etapas parciais em esteiras transportadoras, significativamente mais rápido e com menor custo.



Figura 2. Linha de montagem do Ford modelo T, utilizando esteiras transportadoras.

1.1.3 3ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

O desenvolvimento da microeletrônica e dos computadores, nas décadas de 60 e 70, possibilitaram uma revolução digital. A indústria de base eletromecânica, com processos repetitivos e não programáveis é substituída aos poucos por um crescente complexo eletrônico. Surge assim a Terceira Revolução Industrial através da possibilidade de processamento e armazenamento de informações por meio digital. Linhas de produção podem então ser robotizadas e automatizadas com a utilização de Controladores Lógicos Programáveis, sensores e atuadores (WANG, 2016).

Uma das referências de tecnologia utilizada no período foi o PLC (Controlador Lógico Programável), desenvolvido em 1969 e aplicado inicialmente na General Motors com o objetivo de gerenciar processos de forma automatizada, controlando diversos dispositivos mecânicos.

Pela necessidade de se monitorar informações dentro de um processo produtivo ou planta industrial, utilizando da crescente utilização de sistemas DOS em computadores, diversas empresas lançaram em meados da década de 80 Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA).



Figura 3. Processo de soldagem utilizando manipuladores robóticos

1.1.4 4ª REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Com a criação do conceito de Manufatura Integrada por Computador (CIM) em 1973 por Joseph Harrington (HARRINGTON, 1979), observou-se que um dos principais desafios para se alcançar a eficiência na organização, aumentando o nível de produção, reduzindo erros e desperdício, seria a falta de integração entre os setores, atividades e sistemas. O CIM buscava, portanto, a completa automatização da fábrica, com todos processos controlados por computador e as informações circulando de forma digital. A internet se tornaria, desta maneira, um habilitador para o processo de integração.

A principal diferença entre o conceito de CIM para a Indústria 4.0 é que na Manufatura Integrada por Computador, a manufatura é controlada basicamente por sistemas de computador, de forma totalmente automatizada, mas não necessariamente de forma flexível. Já a Indústria 4.0 envolve todo o ciclo de vida do produto e a produção é altamente flexível, com os dispositivos e produtos atuando de forma inteligente. Adicionalmente, quando se criou o conceito de CIM, devido aos avanços tecnológicos, os custos para integração de sistemas utilizando internet e computadores eram muito mais elevados ao que é necessário nos dias atuais, considerando também que, hoje, o cliente pode pagar pelo uso dos equipamentos, com softwares na nuvem por exemplo (HOZDIĆ, 2015).

Recentemente, devido ao desenvolvimento dos sistemas de comunicação, da Internet e ao crescente melhoramento da microeletrônica, tornando os componentes menores e com maior processamento, aumentaram as pesquisas que buscam a comunicação, integração e uma maior dinamicidade da manufatura através de habilitadores como Internet das Coisas (IoT) e Sistemas Cyber Físicos (CPS). Enquanto na Terceira Revolução a manufatura foi baseada na automação de processos, na Quarta Revolução tem-se uma manufatura baseada em dados e informação (SCHWAB, 2016).

1.2 OBJETIVO

Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é buscar obter, por meio de um estudo de casos múltiplos, uma visão de empresas nacionais sobre a Indústria 4.0, a aplicação de modelos de maturidade e seus principais desafios encontrados em sua implantação.

Objetivos específicos

Para atingir o objetivo dessa dissertação são listados abaixo os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar nas bases de periódicos os principais modelos de maturidade, capacidade e prontidão para Indústria 4.0 publicados;
- b) Apresentar as semelhanças e diferenças entre os diversos modelos de maturidade, capacidade e prontidão desenvolvidos por instituições acadêmicas e de consultoria;
- c) Compreender o ponto de vista de empresas que buscam implementar melhorias de indústria 4.0 com relação à aplicabilidade dos modelos de maturidade.
- d) Discutir os desafios encontrados pelas empresas em face da implantação de conceitos da Indústria 4.0 e aplicação de modelos de maturidade.

1.3 METODOLOGIA

Pesquisa, segundo Dane (1990), é um processo crítico de questionamento e busca por respostas. É a realização concreta de uma investigação planejada com base em um conjunto de procedimentos sistemáticos, baseados no raciocínio lógico que tem por objetivo encontrar soluções para os problemas propostos mediante o emprego de métodos científicos.

O método científico é o conjunto de processos ou operações mentais que criam uma linha de raciocínio, proporcionando as bases lógicas da investigação científica, buscando primordialmente, sistematizar o processo de criação do conhecimento humano, tendo surgido a partir desse questionamento filosófico (GIL, 2008).

Pritchard (1969) foi um dos primeiros pesquisadores a utilizar o termo bibliometria, sendo definido como uma metodologia de aplicação de modelos estatísticos e matemáticos na análise de obras literárias.

Atualmente são diversas as bases de dados que utilizam indicadores bibliométricos, disponibilizando análises de dados de produções científicas, sendo as mais utilizadas a *Web of Science*, a plataforma *Scopus* da *Elsevier* e o *Google Scholar*.

A plataforma Web of Science (WoS) da Thompson Reuters, anteriormente conhecida como ISI Web of Knowledge, tem sido largamente empregada em estudos bibliométricos por constituir uma das maiores e principais fontes interdisciplinares de material científico do mundo, incluindo mais de 12.000 periódicos indexados, além de possibilitar uma recuperação ágil das informações (ARCHAMBAULT, 2009).

Em 2004 foi lançada pela Elsevier a base de citações Scopus, multidisciplinar direcionada para todos os tipos de áreas do conhecimento, cobrindo aproximadamente 20.000 revistas.

Ao inserir os termos nos campos de busca da plataforma WoS, diferentes formas de pesquisa podem ser realizadas, como busca por autor, tópicos, resumos, palavras-chaves dentre outras. Com isso, diferentes resultados podem ser obtidos na plataforma ao se variar os termos inseridos.

Os dados presentes nesta pesquisa foram obtidos através de pesquisa bibliométrica na base de dados de artigos acadêmicos presentes na plataforma Web of Science (WoS) e Scopus.

Os modelos de maturidade para Indústria 4.0 analisados nesse trabalho são selecionados por meio de busca nas principais bases de periódicos acadêmicos utilizando palavras chaves. Uma filtragem na amostra de publicações é feita na sequência, eliminando

aquelas não relacionadas ao tema da pesquisa. Por fim, são selecionados os modelos de maturidade mais citados na literatura para que seja feita uma análise de cada um.

Ao final do trabalho, será apresentado um estudo de casos múltiplo, buscando uma visão da indústria acerca dos modelos de maturidade para Indústria 4.0, ou seja, se já conheciam ou haviam aplicado tais modelos em suas companhias e suas considerações e sugestões de melhorias. Conforme apontado por Eisenhardt (1989), o estudo de caso é um método de pesquisa que deve ser aplicado quando o pesquisador busca, por meio de dados coletados de eventos reais, uma compreensão extensiva e com validade conceitual sobre fenômenos atuais inseridos em seu próprio contexto. Ainda, o estudo de caso é utilizado quando se necessita investigar novos conceitos, bem como para verificar como elementos de uma teoria são aplicados e utilizados no mundo real (YIN, 2009).

Com relação ao tipo de pesquisa, em função da sua natureza e objetivo, conforme destaca Ruiz (1996), esta pode ser classificada como não experimental, do tipo documental, utilizando-se de uma bibliometria, além de ter como finalidade uma pesquisa exploratória, ou seja, uma caracterização inicial de um problema, visando determinar a existência, ou não, de determinado fenômeno, além de proporcionar maior familiaridade com o problema.

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em cinco etapas, sendo elas: planejar, pesquisar, coletar dados, analisar dados e formalizar resultados. Nesse contexto, a pesquisa bibliométrica é concorrente às três etapas iniciais.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente capítulo apresenta o histórico das revoluções industriais que culminaram na quarta revolução industrial, os objetivos do trabalho e a metodologia. O capítulo seguinte discorre sobre as principais tecnologias habilitadoras presentes na Indústria 4.0 e como cada uma delas representa um papel importante no desenvolvimento de uma manufatura integrada, além de apresentar as principais ações na Indústria 4.0 da China, Alemanha, EUA e Brasil

O Capítulo 3 apresenta uma revisão teórica sobre os conceitos de Maturidade, Capabilidade e Prontidão, com o enfoque em sua aplicação em modelos para as organizações. Apresenta ainda como os temas Indústria 4.0 e seus modelos de maturidade vem crescendo nos últimos 5 anos, destacando os principais modelos presentes na literatura científica

O Capítulo 4 exibe a estrutura e as características dos principais modelos de maturidade e prontidão obtidos no Capítulo 3.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de casos múltiplos realizado por meio de entrevista realizada com profissionais da indústria que estão lidando com o desafio de implantar novas tecnologias e utilizar os conceitos da Indústria 4.0. Nesse contexto, é verificado o grau de conhecimento de profissionais sobre a utilização de modelos de maturidade para Indústria 4.0 em suas organizações e de que maneira as avaliações de maturidade poderiam ser melhor aplicadas.

Ao final do texto tem-se as conclusões obtidas da pesquisa, além das propostas de trabalhos futuros relacionados ao tema.

CAPÍTULO 2 INDÚSTRIA 4.0 E TECNOLOGIAS HABILITADORAS

Neste capítulo são apresentados os chamados pilares da Quarta Revolução Industrial, tecnologias habilitadoras que estão presentes na atualidade e que desempenham um papel chave no desenvolvimento de uma fábrica inteligente e em seu grau de maturidade.

2.1 INDÚSTRIA 4.0

A Quarta Revolução, também denominada como Indústria 4.0 ou transformação digital, estabelece um novo paradigma para os sistemas de produção, compreendendo uma fábrica inteligente que opera de forma mais autônoma e com menor intervenção humana. Novos conceitos surgem diante desse cenário: Big Data, Cloud Computing, Inteligência Artificial, Internet Industrial das Coisas (IIoT), Segurança Cibernética (LEE 2015).

O termo Indústria 4.0, referente à Quarta Revolução Industrial, derivado do termo alemão *Industrie 4.0*, foi apresentado em 2011 na Feira de Hannover e surgiu como um projeto de alta tecnologia do ministério federal de educação e pesquisa do governo alemão, com o objetivo de aumentar a automatização dos sistemas produtivos locais (JAZDI, 2014).

Segundo Leyh (2016), a Indústria 4.0 representa a transição de um sistema de produção centralizado para uma produção mais flexível e autocontrolável. Nesse contexto, os produtos e todos os sistemas afetados, bem como todas as etapas do processo da engenharia, são digitalizados e integrados, visando compartilhar e transmitir informações pelas cadeias de valor verticais e horizontais.

A velocidade das mudanças ocasionadas pela tecnologia obrigou tanto os governos como o setor produtivo a discutirem projetos para se prepararem para a evolução digital. Além da Alemanha e a *Industrie 4.0*, programas similares surgiram como *Usine du Futur* na França, *Fabbrica del Futuro* na Itália e *High Value Manufacturing Catapult* no Reino Unido na última década (GALLI, 2018).

A transformação da economia provocada pela Indústria 4.0 está levando ao surgimento de redes de valor altamente flexíveis. As empresas agora precisam conectar suas atividades de produção internamente e com os sistemas de parceiros externos. Por sua vez, isso requer novas formas de cooperação, tanto nacional quanto globalmente. Diante deste contexto, empresas em todo o mundo estão vivendo grandes desafios devido aos recentes

desenvolvimentos econômicos, sociais e tecnológicos e grande parte ainda não está pronta para utilizar as ideias e conceitos da Indústria 4.0 (VERMULUM, 2018).

2.2 OS PILARES DA INDÚSTRIA 4.0

2.2.1 ROBÓTICA COLABORATIVA

Segundo a *Robotic Institute of America* (RIA): *Robô é um manipulador reprogramável e multifuncional projetado para mover materiais, partes, ferramentas ou dispositivos* especializados através de movimentos variáveis programados para desempenhar uma variedade de tarefas (RIA, 1982).

Já a Norma ISO 8373:2012, define Robô Industrial como sendo: um manipulador programável em três ou mais eixos, controlado automaticamente, reprogramável e funcional, podendo estar fixo no solo ou móvel para aplicações de automação industrial

O dramaturgo tcheco Karel Capek, introduziu o termo que conhecemos hoje como robô em sua peça R.U.R ou Rossum's Universal Robots em 1920, no qual é apresentada uma nova categoria de trabalhadores autômatos, chamados "Robots", palavra derivada do termo tcheco robota, que, no contexto da peça, foi definido como máquinas, ou seres mecanizados, criadas para substituir o trabalho forçado do homem (REILLY, 2011).

Posteriormente o escritor Isaac Asimov popularizou o termo robótica através de suas obras *Runaround* (1942) e *I Robot* (1950), no qual são apresentadas as três Leis da Robótica.

Com a necessidade de se aumentar a produtividade e qualidade dos produtos, a invenção da microeletrônica e computação começaram a ganhar espaço nas indústrias já nos anos 60. Nesse contexto, Joseph Engelberger e George Devol desenvolvem em 1961 o primeiro robô industrial, chamado de UNIMATE, apresentado na Figura 4. O robô era um braço robótico com 6 graus de liberdade (DoF) desenvolvido com o objetivo de acelerar o processo de produção, sendo utilizado inicialmente para levantar peças de uma máquina de fundição e embalá-las, tarefa essa altamente perigosa e que era executada por trabalhadores (BALLARD ET AL, 2012).

Posteriormente o Unimate foi utilizado nas linhas de produção da General Motors, tornando-se naquela época a fábrica mais automatizada do mundo, com uma produção de 110 veículos por hora (GASPARETTO, 2019).

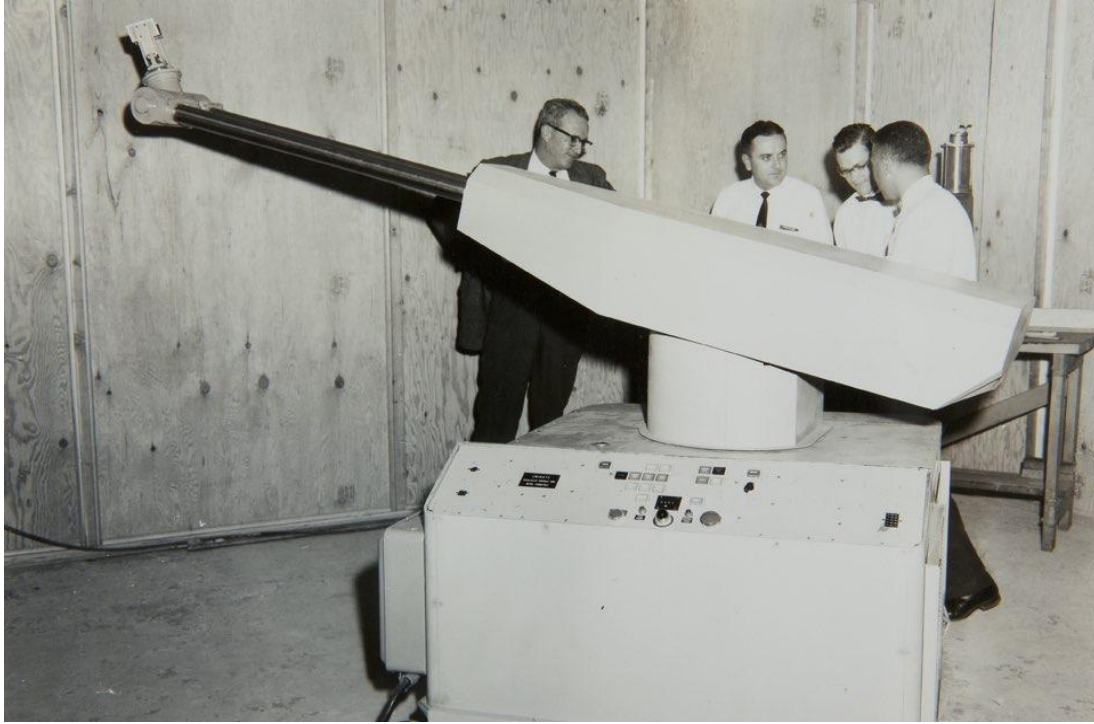


Figura 4. Devol e Engelberger junto com seus colegas trabalhando no desenvolvimento do UNIMATE (BALLARD ET AL, 2012).

Bajd (2010) descreve a história da robótica em 3 gerações:

1ª Geração: São definidos como máquinas programáveis e repetitivas sem a possibilidade de controle de seus modos de execução, sem comunicação com o ambiente externo. São dotados somente de sensores internos e requerem um ambiente bem estruturado, com objetos bem posicionados, para sua operação.

2ª Geração: São dotados de malhas de controle fechadas, realimentadas por sensores externos. São utilizadas câmeras que capturam imagens as quais são comparadas com um banco de imagens, sensores de luz, toque e peso.

3ª Geração: São instrumentos adaptativos, capazes de interagir com o ambiente externo e o operador, podem ser programados para se mover de ponto a ponto ou de forma contínua, sendo capaz de executar tarefas complexas. Por meio de Inteligência Artificial, possuem capacidade de autonomia decisória e operacional

Robôs Industriais geralmente são grandes, pesados e movem-se em alta velocidade. Essas variáveis fazem com que seja necessário que esses equipamentos estejam em ambientes restritos do contato com os operadores em uma linha de produção, evitando possíveis acidentes e lesões. Essas barreiras, definidas como gaiolas, possuem sensores que previnem

que pessoas não autorizadas entrem nos espaços de trabalho dos braços robóticos quando em funcionamento em modo automático.

Porém, com a necessidade de robôs mais eficientes e capazes de lidar com as condições dinâmicas da produção e os avanços das tecnologias de informação e comunicação (TIC), as tarefas desenvolvidas por robôs industriais não estão mais restritas a somente movimentar objetos ou outras ações repetitivas, mas a atividades colaborativas entre máquina e operador, unindo, de forma segura, a potência e precisão dos robôs com a inteligência e experiência do operador.

Nesse contexto, a norma ISO 15.066:2016 apresenta as seguintes definições:

Espaço de trabalho colaborativo: espaço de operação onde o sistema robótico e humanos podem desempenhar simultaneamente tarefas durante a produção.

Operação colaborativa: estado no qual um sistema robótico propositalmente projetado e um operador trabalham dentro de um espaço de trabalho colaborativo.

Portanto, considera-se um robô colaborativo, ou COBOT, um sistema robótico projetado para desempenhar uma operação colaborativa em um espaço de trabalho colaborativo. Além disso possuem outras características externas como superfícies arredondadas, ausência de pontos de esmagamentos, motores e cabos expostos, além de diversos sensores de presença e força em ambientes de alta interação homem-máquina (Robla, 2017), como exemplificado na Figura 5.



Figura 5. Colaboração homem-robô na montagem de transmissão de eixos, em uma planta da BMW (SCHILLMOELLER, 2017).

Porém, um robô colaborativo não é definido somente pela retirada das barreiras físicas e que pode trabalhar junto com o homem. De acordo com a norma ISO 10.218:2011, existem quatro características colaborativas para os robôs:

Parada monitorada de segurança: quando o robô detecta uma entrada em seu espaço restrito de operação (zona de segurança) e então entra em modo de suspensão.

Monitoramento de velocidade e separação: Com o auxílio de sensores, o ambiente de trabalho é monitorado e o robô responde de acordo com a proximidade do operador, diminuindo sua velocidade.

Limitação de Potência e Força: possui uma programação para parar quando perceber uma sobrecarga em suas articulações, além de terem valores reduzidos de potência e força comparados aos robôs industriais tradicionais.

Respondendo a esforços: Presença de sensores capazes de detecção de esforços anormais e possibilidade de aprendizado supervisionado, ensinando manualmente posições e trajetórias.

2.2.2 BIG DATA

O processo de digitalização (conversão de sinais analógicos em sinais digitais), iniciado na década de 1960, ganhou muita popularidade na década de 1990. Na mesma época, era lançado o sistema de reconhecimento óptico de caracteres (OCR), possibilitando um processo de digitalização em massa, tendo como exemplo o Google Books Library Project, iniciado em 2004 cujo objetivo era digitalizar mais de 15 milhões de livros localizados em diversas bibliotecas como Harvard, Stanford e Oxford (COYLE, 2006).

A rápida e caótica evolução da literatura relacionada a Big Data, impediu uma definição universalmente e formalmente aceita para o tema (DE MAURO, 2016).

De Mauro (2016) apresenta, após uma análise bibliométrica, uma definição para Big Data através de quatro características fundamentais (Informação, Tecnologia, Impacto e Métodos): *“Big Data é o ativo de informação caracterizado por volume, velocidade e variedade tão alto que requer tecnologia e métodos analíticos específicos para sua transformação em Valor”*

As características podem ser reunidas em 6 V's (TERZI, 2017):

Volume: Provavelmente a característica mais conhecida quando se diz respeito a Big Data. Atualmente vemos um aumento expressivo na quantidade de dados. O que antes era criado somente por meio manual, hoje os dados são gerados por máquinas, redes e interações humanas em redes sociais. Mais de 90% dos dados atuais foram criados recentemente.

Variedade: Os dados por ser gerados por diferentes fontes e de diferentes tipos, de forma estruturada e não estruturada. Antes os dados eram armazenados em planilhas e banco de dados, porém, atualmente, os dados não se apresentam estruturados, podendo vir de diversos meios como e-mail, fotos, vídeos, dispositivos de monitoramento, dentre outros. Essa diversidade cria barreiras para armazenar, minerar e analisar os dados.

Velocidade: Refere-se à velocidade que os dados estão sendo gerados e processados.

Valor: Refere-se ao objetivo, resultado comercial que a solução analítica deve abordar. As características das grandes massas de dados se tornam sem sentido se não se atribui valor comercial aos dados.

Veracidade: Mostra a qualidade e origem dos dados, sua confiabilidade e se é viável realizar ou não análises baseadas neles.

Visibilidade: Os dados podem estar disponíveis ou não, visíveis ou invisíveis para análise e processamento. Os dados disponíveis, mas invisíveis para o processo, por motivo de segurança, são um dos gargalos do paradigma de Big Data.

2.2.3 INTERNET DAS COISAS (IoT)

A Internet das Coisas (*Internet of Things/IoT*), Nuvem de Coisas (*Cloud of Things*), Internet de Todas as Coisas (*Internet of Everything*) são termos utilizados para representar que qualquer dispositivo pode ser conectado à Internet oferecendo algum tipo de serviço (SARAVANAN, 2019). É uma nova visão para a internet, em que a internet passa a abarcar não só computadores, como, também, objetos do dia a dia (MATTERN E FLOERKEMEIER, 2010).

Desde a criação da Internet, através do conceito da Arpanet em 1969, a utilização de dispositivos e aplicações conectados à rede aumentam rapidamente, conforme relatório da Cisco de 2011 (EVANS, 2011).

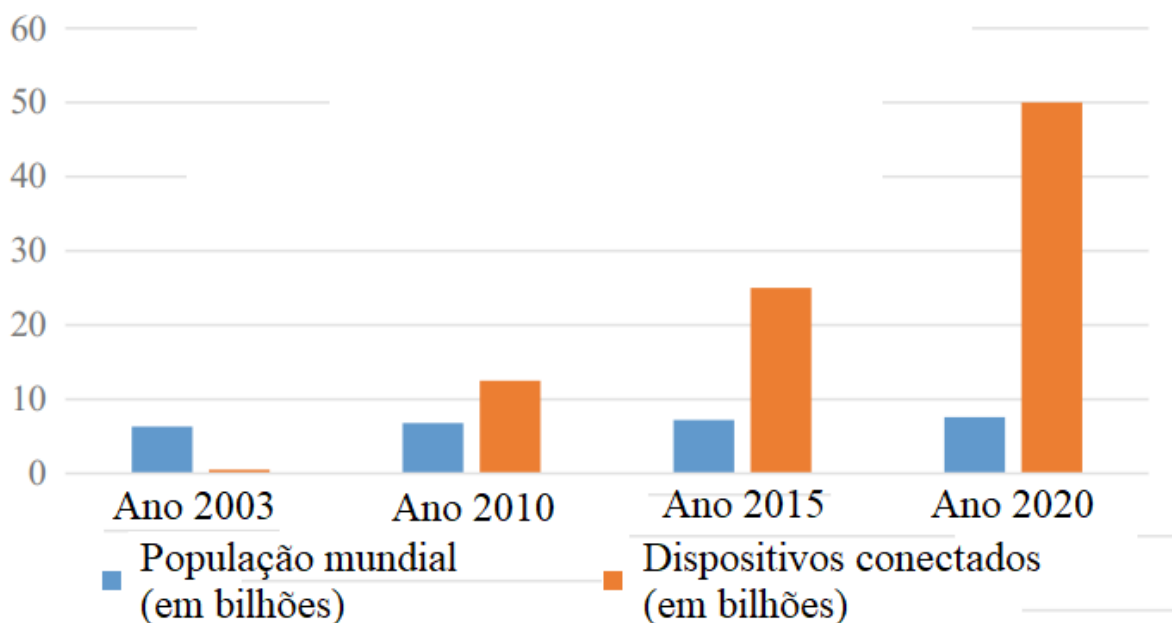


Figura 6. Relação entre população mundial e dispositivos conectados (em bilhões). (CISCO, 2011).

Considerado como o primeiro dispositivo IoT, John Romkey e Simon Hackett apresentaram durante a Conferência INTEROP em 1989, uma torradeira que possibilitaria ser ligada e desligada via internet. A torradeira era conectada via TCP/IP e controlada através *Simple Networking Management Protocol Management Information Base* (SNMP MIB).

No ano de 1999, o cientista da computação Kevin Ashton da Procter & Gamble utilizou pela primeira vez o termo Internet das Coisas ao preparar uma apresentação de um projeto de *tags* identificação e sensoriamento de produtos em armazém para a P&G. Até aquele momento a revolução chamada internet era utilizada somente para identificação de *sites* em computadores pessoais (ASHTON, 2009).

Como alternativa ao termo produtos inteligentes e a cadeia de suprimento ser uma “rede das coisas”, foi criado então o conceito “Internet das Coisas”. De 1999 a 2005 o termo mal aparecia no cotidiano, pois outros conceitos ainda não estavam maduros como o armazenamento de dados em nuvem, por exemplo. Com as tecnologias tornando mais acessíveis, o conceito IoT então se disseminou de forma rápida nos últimos anos.

A possibilidade da internet das coisas ocorre com um avanço específico do protocolo da internet, em que cada equipamento pode ter seu “endereço IP”, ou seja, um identificador que permite ser encontrado por qualquer outro equipamento conectado à internet. O protocolo

vigente até há pouco, conhecido por IPv4 (*Internet Protocol version 4*), permitia um máximo de 4,3 bilhões de endereços ($4,3 \times 10^9$). Esse limite se esgotou, o que quer dizer que novos computadores e equipamentos já não poderiam mais ser conectados à rede simplesmente por não terem um “endereço” na internet. Devido a tal indisponibilidade, a Internet Engineering Task Force (IETF) desenvolveu uma nova versão, denominado Internet Protocol version 6 (IPv6). Essa é a mais recente versão do Protocolo IP, para a identificação e localização de computadores e quaisquer outros objetos ou dispositivos em rede, permitindo o roteamento na internet. Esse protocolo IPv6 utiliza endereço de 128 bits, que permite cerca de $3,4 \times 10^{38}$ endereços IP (FACCIONI, 2016).

Entre diversas aplicações da Internet das Coisas, destaca-se na criação de Cidades Inteligentes (*Smart Cities*), que podem ser descritas como métodos de planejamento e desenvolvimento urbano que, por meio de ferramentas de tecnologia da informação, reúnem informações necessárias e tomam as melhores decisões de engenharia e planejamento. *Smart Cities* utilizam IoT com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das pessoas, gerenciando ativos e recursos de forma eficiente, do ponto de vista de sustentabilidade econômica, social e ambiental (DUSTDAR, 2017).

Alguns padrões de tecnologia sem fio utilizadas para IoT são importantes elementos da Indústria 4.0 e são apresentados a seguir.

2.2.3.1 RFID

RFID é uma tecnologia de identificação baseado em frequência de rádio (RF), a qual permite coleta de dados utilizando os mesmos sinais de rádio, tendo sido patenteado, entre os anos de 1972 e 1975, como um sistema “Transmissor-Receptor indutivamente acoplado” pelos pesquisadores Thomas Kriofsky e Leon Kaplan (GARFINKEL, 2006).

Estes sistemas são formados basicamente por 4 componentes: uma etiqueta na qual informações estão armazenadas, um leitor ou decodificador incorporado, uma antena e uma aplicação responsável por processar os dados contidos nas etiquetas. O alcance médio de utilização desse sistema pode variar entre 10 cm e 200 m, ou seja, entre as etiquetas e a antena ou leitor (WANG, 2014).

2.2.3.2 WI-FI

Wi-Fi pode ser definido como o conjunto de especificações para redes locais sem fio (WLAN - Wireless Local Area Network) baseadas no padrão IEEE 802.11.

No ano de 1990, o engenheiro e pesquisador Vic Hayes foi um dos responsáveis por estabelecer o Grupo de Trabalho da IEEE responsável por estabelecer um padrão de comunicação de redes sem fio, resultando em 1997 no protocolo de comunicação IEEE 802.11. A primeira versão do protocolo permitia uma taxa de transferência de dados de até 2 Mbit/s operando em uma frequência de banda de 2,4 GHz, sendo atualizado em 1999 para os protocolos 802.11.b e 802.11.a, permitindo uma taxa de transmissão respectivamente de até 11 Mbit/s em uma frequência de 2,4 GHz e 54 Mbit/s em uma frequência de 5 GHz. Dez anos após, entrava em vigor o padrão 802.11n, capaz de atingir até 150 Mbit/s ou 17.88 MB/s (LEMSTRA, 2008).

2.2.3.3 BLUETOOTH

O Engenheiro de Computação Jim Kardach, em 1999, diante da necessidade de se criar um padrão de comunicação sem fio para celulares, decidiu criar uma associação privada sem fins lucrativos, a Bluetooth Special Interest Group (SIG), reunindo várias empresas de telefonia e computação como Ericsson, Nokia, IBM, Intel e Toshiba.

Em 2004 o Bluetooth foi padronizado como uma tecnologia de troca de dados sem fio através do padrão IEEE 802.15.1, com uma frequência de comunicação de 2.4GHz, largura de banda de 720kbps e alcance de até 100m. (BAKER, 2005).

2.2.3.4 ZIGBEE

A rede conhecida como ZigBee, criada pelo IEEE 802.15.4 em conjunto com a ZigBee Alliance em 2002, foi criada com o intuito de disponibilizar uma rede com extrema baixa potência de operação, ocasionando um baixo consumo de energia nos dispositivos, estendendo a vida útil de suas baterias, podendo as mesmas durarem anos. Dessa forma a rede tem como principais casos de uso dispositivos que não necessitem de taxas de

transmissão de dados tão altas quanto as permitidas pelo Bluetooth, e querem se aproveitar das características de baixo consumo (FARAHANI, 2011).

O padrão Zigbee é considerado mais adequado para as aplicações de Controle, redes com pequenos pacotes de dados, rede de Sensores, redes com muitos dispositivos e onde o consumo de bateria pode ser crítico. Vale ressaltar que o número de dispositivos numa rede Bluetooth está na casa de unidades ou dezenas, enquanto que numa rede com o protocolo Zigbee esse número pode chegar a 65535 dispositivos (GILL, 2009).

2.2.4 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS

O termo Sistema Cíber-Físico (CPS) é definido como a profunda integração entre sistemas físicos e computação, comunicação e sistemas de controle ou sistemas virtuais. Os CPS foram definidos como áreas de pesquisa prioritárias nos EUA e Europa, atuando em setores como automotivo, aeroespacial, civil, transportes, saúde e de manufatura por meio do Programa Horizon 2020, criado em 2014 pela União Europeia como um instrumento de financiamento de pesquisas em inovação e do Industrial Internet Consortium (IIC), uma organização fundada também em 2014 pelas maiores empresas americanas de tecnologia como IBM, AT&T, Cisco e Intel (KAGERMANN, 2016).

O nível físico e o digital se fundem, abrangendo tanto o nível de produção quanto o dos produtos, surgem sistemas cuja representação física e digital não pode mais ser diferenciada de maneira razoável. Um exemplo pode ser observado na área de manutenção preditiva: parâmetros do processo (fadiga, tempo produtivo etc.) de componentes mecânicos subjacentes a um desgaste (físico) são registrados digitalmente. A condição real do sistema resulta do objeto físico e de seus parâmetros de processo digital (LEE, 2015).

2.2.5 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Inteligência pode ser definido como a capacidade de um sistema processar uma informação e se adaptar ao seu ambiente, enquanto opera com conhecimento e recursos insuficientes (WANG, 2019).

O termo Inteligência Artificial foi utilizado oficialmente pela primeira vez em 1956 por John McCarthy e Marvin Minsky quando organizaram uma conferência com o objetivo

de reunir pesquisadores de diferentes áreas afim de discutirem sobre o tema. Entretanto seis anos antes, em 1950, Alan Turing apresenta seu artigo no qual já abordava as possibilidades de máquinas simularem ações humanas e a habilidade de fazer coisas inteligentes (TURING, 1950).

Com o aumento crescente de informações disponíveis, ou seja, Big Data, a capacidade humana de coletar e processar essa quantidade de dados é inviável. A utilização de algoritmos e técnicas de processamento de dados, utilizando a inteligência artificial e possibilitando apresentar resultados confiáveis se torna uma necessidade, sendo aplicada em diversas áreas como engenharia, agricultura, economia e saúde (ACEMOGLU, 2018).

A Inteligência Artificial possui diversas técnicas e subcampos ligadas à ciência da computação como *Machine Learning*, *Deep Learning*, Redes Neurais Artificiais e Redes Neurais Convolucionais.

A técnica de *Machine Learning* ou Aprendizagem de Máquina, evoluiu a partir de estudos de reconhecimento de padrões nos anos 80, utilizando algoritmos que podem aprender e realizar alguma predição sobre algum assunto por meio de coleta de dados, sendo relacionado a estatística computacional. É empregada em uma variedade de tarefas de computação no qual o projeto e desenvolvimento de algoritmos com um bom desempenho seria inviável (SIAU, 2018).

Um algoritmo dentro do campo da Aprendizagem de Máquina é o *Deep Learning*, que é um estudo baseado em Redes Neurais Artificiais, porém com suporte a *Big Data* e permite funcionar através da sobreposição de camadas não lineares de processamento de dados. Se desenvolveu a partir do surgimento de computadores com grande capacidade de processamento no início dos anos 2000, tornando possível os avanços na aprendizagem de máquina (ONGSULEE, 2017).

2.2.6 DIGITAL TWIN

Digital Twin pode ser definido como a criação de modelos virtuais de objetos físicos de forma a simular seus comportamentos utilizando, para isso, dados captados de sensores, e possibilitando realizar predições e analisar mudanças de forma dinâmica.

Grievés (2014) apresentou o conceito de Digital Twin como a composição de três componentes que são as entidades físicas do mundo real, os modelos virtuais no mundo virtual e o fluxo de informação que conecta os dois mundos. Após a simulação e otimização

de um processo de desenvolvimento de produto, de manufatura e de manutenção, o Digital Twin guia os processos físicos para realizar soluções otimizadas.

Os dados do mundo real são transmitidos para os modelos virtuais por meio de sensores para que sejam realizadas as simulações, validações e ajustes. Então os dados obtidos da simulação retornam ao mundo físico que responde com ajustes, melhorando as operações e eficiência (QI, 2018).

2.3 A INDÚSTRIA 4.0 EM DIFERENTES PAÍSES

Apesar do termo Indústria 4.0 ter se iniciado na Alemanha, outros países, aproximadamente na mesma época, já organizavam iniciativas visando tornar suas produções industriais mais competitivas e eficientes por meio da utilização de tecnologias modernas.

2.3.1 CHINA

Desde os anos de 1980, a China segue investindo na criação e no desenvolvimento de instituições de pesquisa. Mas foi na década de 1990, e sobretudo nos anos 2000, que o governo passou a se dedicar com mais vigor à tecnologia e à inovação como meios de impulsionar o crescimento econômico, definindo diretrizes, priorizando segmentos estratégicos e estabelecendo metas para transformar a China na maior potência tecnológica global na segunda metade do século XXI (LI, 2018).

Com uma população de aproximadamente 1.4 bilhão de habitantes, o país possui uma indústria de manufatura extremamente heterogênea. Por um lado, existem grandes corporações presentes em quase todo o mundo (por exemplo, Huawei, Xiaomi, ZTE e Haier) com fábricas avançadas e, em alguns casos, altamente automatizadas. No outro extremo, existem diversas PME (pequenas e médias empresas) nas quais quase nenhuma automação ou digitalização ocorreu. Com o objetivo de modernizar totalmente o parque industrial chinês, o governo lançou em 2015 o programa Made in China 2025 (KAGERMANN, 2016).

Do ponto de vista interno, o MiC 2025 procura combater a ineficiência das empresas industriais chinesas e os efeitos da elevação dos salários e da apreciação da moeda no país, que corroem parte da competitividade da economia. Já internacionalmente, o plano colocou

como foco de suas preocupações a digitalização e a automação, que prometem profundas mudanças na manufatura.

Para realizar esses objetivos foram definidas cinco diretrizes:

- Promover a inovação, motor do desenvolvimento.
- Melhorar a qualidade dos produtos e serviços disponíveis no mercado.
- Tornar a economia mais sustentável.
- Otimizar a estrutura industrial.
- Incentivar a formação e a qualificação dos recursos humanos e a retenção de talentos.

2.3.2 ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

Nos Estados Unidos, a Indústria 4.0 é amplamente impulsionada por iniciativas do setor privado quando comparado com Alemanha e países da Ásia, onde as agências governamentais desempenham um papel relativamente maior. Embora a Alemanha discuta e promova a Indústria 4.0 desde 2011, somente em 2014 que uma iniciativa de larga escala semelhante ocorreu nos EUA com a criação do Industrial Internet Consortium (IIC), fundada pela General Electric (GE) em conjunto com a AT&T, Cisco e IBM.

Em 2013, o governo lançou a iniciativa National Network for Manufacturing Innovation (NNMI), criando vários centros de inovação em todo o país, com destaque para o Digital Manufacturing and Design Innovation Institute (DMDII), voltado exclusivamente para pesquisas em Manufatura Avançada, contribuindo para a criação de mão de obra capacitada, baseado na experiência e modelo alemão dos Institutos Fraunhofer (BNDES, 2016).

A estratégia dos EUA para a Indústria 4.0 tem como foco a reestruturação da sua indústria nacional, recuperando parte da manufatura perdida deslocada sobretudo para países asiáticos, até então pelos seus menores custos de mão de obra e incentivos fiscais. A motivação disso se dá principalmente pela relação que a manufatura tem com a criação de postos de trabalho.

2.3.3 ALEMANHA

Segundo Andreoni (2016), a política industrial alemã é apoiada por dois pilares, a rede de institutos Fraunhofer, criada no pós-guerra como medida aos desafios tecnológicos para o sistema industrial; e uma infraestrutura financeira composta por bancos públicos voltados ao financiamento industrial.

A partir dos anos 2000, o governo alemão lança a High-Tech Strategy, uma iniciativa em conjunto com empresas como Siemens, Volkswagen, Bosch, Kuka, ABB e Festo, com o objetivo de aumentar a produtividade da indústria por meio da inovação e elevar a competitividade em relação ao mercado asiático.

Em 2011, na Feira de tecnologia de Hannover, é lançado o termo “Industrie 4.0” pelo governo alemão, definido como a transformação completa de toda a esfera da produção industrial por meio da fusão da tecnologia digital e da internet com a indústria convencional (DAVIES, 2015).

Posteriormente na mesma Feira de Hannover, porém no ano de 2015, é apresentada a Arquitetura de Referência para Indústria 4.0 (RAMI 4.0), desenvolvido pela Plattform Industrie 4.0, iniciativa alemã voltada para o desenvolvimento de soluções de manufatura avançada no país, também responsável pelo Industrie 4.0. O RAMI 4.0 é uma arquitetura que visa criar um modelo para aplicações de soluções de conectividade para projetos aderentes à Indústria 4.0, permitindo um ecossistema cibernético de toda cadeia produtiva, além de padronizar processos e tecnologias (LI, 2018).

2.3.4 BRASIL

Alemanha, Estados Unidos e China se destacam como os países que mais investem em soluções para modernizar seus parques, seja ações organizadas pelo Estado como na China, seja pelo setor privado, como nos Estados Unidos ou por ambos como na Alemanha.

Nesse contexto, nações classificadas como emergentes precisam investir no setor industrial, possibilitando uma transformação em sua estrutura produtiva e modernizando seus processos produtivos e modelos de negócios.

O Brasil ocupa atualmente a 66ª colocação entre 129 países avaliados no Índice Global de Inovação no ano de 2019, atrás de outros países da América como Chile (51º), Costa Rica (55º) e México (56º). O estudo avalia quesitos como crescimento da

produtividade, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, educação e exportações de produtos de alta tecnologia (DUTTA, 2019).

Considerando o Índice Global de Competitividade 4.0, do Fórum Econômico Mundial, que avaliou 141 países sobre o nível de produtividade e das condições oferecidas para gerar oportunidades e para que as empresas possam se tornar competitivas, o Brasil ocupa a 71ª posição em 2019. O índice é baseado em doze pilares: instituições, infraestrutura, adoção de ciência e tecnologia, estabilidade macroeconômica, saúde, habilidades, mercado de produtos, mercado de trabalho, sistema financeiro, tamanho do mercado, dinamismo de negócios e capacidade de inovar (SCHWAB, 2019).

A Confederação Nacional da Indústria (CNI), órgão que representa os interesses da indústria no país, por meio de uma pesquisa em mais de 2200 empresas no ano de 2016 constatou que 52% não utilizavam nenhuma tecnologia digital que poderia impulsionar sua competitividade na indústria, demonstrando um certo distanciamento da indústria nacional com a indústria 4.0. O alto custo necessário para implantação dessas tecnologias foi apontado como a principal barreira para a sua utilização (CNI, 2016).

No ano de 2018 foi elaborado pelo então Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) e pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) uma Agenda Brasileira para a Indústria 4.0, composta por dez medidas com foco nas pequenas e médias empresas, visando criar estruturas de suporte ao empresário que pretende seguir o caminho da transformação digital.

Apesar das ações realizadas pontualmente por instituições como CNI e ABDI e do considerável número de publicações sobre a Indústria 4.0 no país, conforme Figura 8, e das preocupações cada vez maiores da indústria em adotar conceitos e ações relacionadas à Quarta Revolução Industrial, fica evidente a necessidade de um Plano Nacional elaborado pelo Estado, além de uma coordenação mais clara e difundida entre instituições e entre elas e o setor privado.

CAPÍTULO 3 MODELOS DE MATURIDADE, CAPABILIDADE E PRONTIDÃO PARA INDÚSTRIA 4.0

Neste capítulo serão apresentadas as definições e as principais aplicações dos conceitos de maturidade, capacidade e prontidão dentro das organizações. Além disso, uma pesquisa bibliométrica é realizada buscando os principais modelos da literatura.

3.1 MATURIDADE

Um modelo de maturidade representa fases de melhorias quantitativas ou mudanças qualitativas de capacidade de um elemento com o objetivo de monitorar e avaliar seus avanços, de acordo com áreas ou dimensões predeterminadas (KOHLEGGER 2009).

Em geral, modelos de maturidade visam descrever o desenvolvimento de diversas entidades, por exemplo: ser humano, uma função organizacional, tecnologia, produtos e processos (JIANKANG, 2011). Além disso, possuem algumas características como:

- O desenvolvimento de alguma entidade é representado como um número, chamado nível de maturidade (geralmente de 4 a 6);
- Os níveis são caracterizados por certos requisitos, que a entidade deve atingir neste nível;
- Os níveis são ordenados sequencialmente, de um nível inicial até um nível final (este último sendo o nível de perfeição);
- Durante o desenvolvimento, a entidade avança de um nível para o outro;
- Não pode haver passagem direta para mais de um nível acima.

Atribui-se a Crosby (1979) que no final da década de 70 desenvolveu um instrumento para avaliar a institucionalização da gestão da qualidade nas empresas, a origem do conceito de maturidade. A proposta foi aplicada a outros setores funcionais, originando modelos de maturidade para avaliação da evolução das empresas em relação à gestão de outras áreas de negócio, como o PDP (Processo de Desenvolvimento de Produto), e para orientar melhorias nestas áreas.

Na literatura, existem diversos modelos de maturidade, padrões, metodologias e diretrizes que podem auxiliar uma organização a se tornar mais competitiva. Inspirado pelo movimento de garantia de qualidade do século XX, o SEI (Software Engineering Institute -

Centro de Pesquisa da Carnegie Mellon University que opera com financiamento do Departamento de Defesa dos Estados Unidos), por solicitação do governo americano, começou em 1986 a desenvolver um modelo de maturidade de processo e um questionário que ajudaria organizações a melhorar a qualidade dos seus processos de software: *Capability Maturity Model for Software (CMM)*.

O crescente número de ferramentas de avaliação de processos de desenvolvimento de software disponíveis no final da década de 80 e início da década de 90, como consequência das pesquisas e modelos que surgiram após do CMM, levaram a um consenso no desenvolvimento e implantação de um padrão internacional para avaliação de processos de software (ISO/IEC JTC1/SC7, 1992).

Em 1993 a ISO (International Organization for Standardization) criou as normas ISO/IEC 15504 e 12207, com foco na melhoria dos processos de desenvolvimento de software e a determinação da capacidade de processos de uma organização.

3.2 CAPABILIDADE

A norma ISO 15504 possui níveis de capacidade e maturidade, assim como o CMM, cujo objetivo é avaliar cada processo de desenvolvimento do software classificando em níveis que podem ser considerados métricas, podendo assim identificar pontos fortes e fracos no desenvolvimento, fazendo com que haja diretrizes para melhorias nos processos.

A partir de 1991 foram criados CMMs voltados para: Engenharia de Sistemas, Engenharia de Software, Aquisição de Software, Gestão e Desenvolvimento de Força de Trabalho, e Desenvolvimento Integrado de Processo e Produto (IPPD). Observou-se que, apesar dos modelos se mostrarem úteis para diversas organizações, estes não eram integráveis e quando da utilização de vários modelos, tornara-se inviável do ponto de vista de treinamento, avaliações e atividades de melhoria.

Visando resolver o problema gerado da utilização de vários CMMs, iniciou-se o desenvolvimento de um framework único, o CMMI, combinando três modelos:

- *Capability Maturity Model for Software (SW-CMM)*;
- *Systems Engineering Capability Model (SECM)*;
- *Integrated Product Development Capability Maturity Model (IPD-CMM)*.

Os níveis de capacidade, associados à representação contínua, aplicam-se à melhoria de processo da organização em áreas de processo individuais. Esses níveis são um meio para melhorar, de forma incremental, os processos correspondentes a uma determinada área de processo. Há seis níveis de capacidade, numerados de 0 a 5 (TEAM, 2010).

- Nível 0: Incompleto;
- Nível 1: Executado;
- Nível 2: Gerenciado;
- Nível 3: Definido;
- Nível 4: Gerenciado Quantitativamente;
- Nível 5: Em Otimização.

Níveis de maturidade, associados à representação por estágios, aplicam-se à melhoria de processo da organização em um conjunto de áreas de processo. Esses níveis auxiliam na previsão dos resultados de futuros projetos. Há cinco níveis de maturidade, numerados de 1 a 5.

- Nível 1: Inicial;
- Nível 2: Gerenciado;
- Nível 3: Definido;
- Nível 4: Gerenciado Quantitativamente;
- Nível 5: Em Otimização.

Inicial: representa processos caóticos, sem uma sequência pré-definida (ad-hoc), sendo que o sucesso depende exclusivamente da competência das pessoas.

Gerenciado: Os processos são planejados e executados de acordo com uma política. Em momentos de crise, a disciplina de processo contribui para que as práticas existentes sejam mantidas.

Definido: Os processos são bem caracterizados e entendidos, e são descritos em padrões, procedimentos, ferramentas e métodos, de forma mais rigorosa do que no nível anterior. Os processos geralmente são previsíveis apenas de forma qualitativamente.

Gerenciado quantitativamente: A organização e os projetos estabelecem objetivos quantitativos para qualidade e para desempenho de processo, utilizando-os como critérios na gestão de processos. O desempenho dos processos é controlado por meio de técnicas estatísticas e outras técnicas quantitativas.

Em Otimização: Foco na melhoria contínua do desempenho de processo por meio de melhorias incrementais e inovadoras de processo e de tecnologia.

No modelo CMMI, utilizam-se níveis para descrever um caminho evolutivo recomendado para uma organização que deseja melhorar os processos utilizados para desenvolver e manter seus produtos e serviços. Os níveis também podem resultar de classificações obtidas por meio de avaliações realizadas em organizações compreendendo a empresa toda (normalmente pequenas), ou grupos menores, tais como um grupo de projetos ou uma divisão de uma empresa. (TEAM, 2010).

O CMMI apresenta dois caminhos para melhoria. Um caminho permite que as organizações melhorem de forma incremental os processos correspondentes a uma ou mais áreas de processo individualmente selecionadas pela organização. O outro caminho permite que as organizações melhorem um conjunto de processos inter-relacionados e, de forma incremental, tratem sucessivos conjuntos de áreas de processo. Para a representação contínua ou em áreas individuais, emprega-se a expressão “nível de capacidade” e para a representação por estágios, emprega-se a expressão “nível de maturidade” (CHRISSIS, 2011).

A capacidade está relacionada a uma evolução da condição de atingir, cada vez mais, melhores resultados dos processos, sendo que esses são mantidos sob controle em quaisquer condições. O termo capacidade se difere em seu contexto da palavra capacidade. Enquanto capacidade é relacionada com a quantidade a ser produzida, capacidade é ter essa capacidade claramente definida e controlada, respeitando-se limites claros de qualidade.

Van Looy, De Backer e Poels, (2011) analisam os conceitos que diferenciam maturidade e níveis de maturidade, bem como capacidade e níveis de capacidade, do ponto de vista do CMMI e outros modelos. A maturidade indica até que ponto uma organização coloca em prática, de forma explícita e consistente, seu processo de negócio. Já capacidade compreende as competências para se alcançar os objetivos estabelecidos.

Abideen Tetlay (2011) realizou uma análise sobre *Maturity, Capability e Readiness* no Ciclo de Vida de Desenvolvimento de Sistemas. Após um estudo da utilização das nomenclaturas, o autor define Maturidade de um Sistema quando são realizadas verificações de forma iterativa do Ciclo de Vida do Desenvolvimento de Sistemas. Já a Prontidão de um Sistema é definida quando se verifica se o sistema pode satisfazer ou não os requisitos pré-determinados, ou seja, se o sistema está pronto ou não. Com isso, a Maturidade de um Sistema ocorreria antes da Prontidão de um Sistema, ou seja, um produto ou sistema precisa antes estar totalmente “maduro” antes de estar “pronto” para utilização.

O conceito de maturidade tecnológica está inserido dentro de uma noção de prontidão tecnológica, não sendo, portanto, definições exclusivas e independentes. Já Capacidade

seria, segundo Tetlay (2011), a habilidade duradoura de gerar uma saída ou efeito operacional desejável, podendo ser afetada pelo ambiente no qual está inserido.

3.3 PRONTIDÃO

Segundo Tetlay (2011), as questões relacionadas a Maturidade (Maturity) e Prontidão (Readiness) tornaram-se relevantes através do interesse crescente no últimos anos com o desenvolvimento de modelos como o “*Technology Readiness Levels*” (TRLs), “*System Readiness Levels*” (SRLs), “*Integration Readiness Levels*” (IRLs) e “*Manufacturing Readiness Levels*” (MRLs).

O termo “Níveis de Prontidão”, ou do inglês Readiness Level, foi inicialmente apresentado em 1989 por Stanley R. Sadin, Frederick P. Povinelly e Robert Rosen em um artigo da NASA no qual se buscava novas estruturas para se avaliar os níveis de desenvolvimento de novas tecnologias para uma efetiva transferência de tecnologia (Sadin, et al., 1989). Um dos modelos de prontidão mais conhecidos e utilizados para se avaliar o desenvolvimento de algum trabalho ou sistema foi desenvolvido pela NASA (Agência Espacial Americana) em 1989, denominado TRL (Nível de Prontidão Tecnológica).

A Norma ISO 16290:2013 define os Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL):

Nível 1: Princípios básicos observados e reportados;

Nível 2: Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada;

Nível 3: Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental;

Nível 4: Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório;

Nível 5: Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações físicas finais;

Nível 6: Modelo do sistema/subsistema protótipo de demonstrador em ambiente relevante;

Nível 7: Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional;

Nível 8: Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado;

Nível 9: O sistema já foi operado em todas as condições, extensão e alcance.

Com o advento da quarta revolução industrial, novos modelos de maturidade surgem, com o objetivo de avaliar as organizações em diversas áreas para o ingresso na chamada Indústria 4.0 e auxiliar nas melhorias necessárias

De acordo com Schumacher (2016), apesar dos termos maturidade e prontidão serem utilizados frequentemente como sinônimos, enquanto modelos de maturidade são desenvolvidos como ferramentas que visam identificar, em termos de maturidade, em qual nível está posicionado uma organização ou processo e comparar com um nível desejado, modelos de prontidão buscam deixar claro se uma organização está pronta ou não para iniciar um processo de desenvolvimento.

Smith (2005) estabelece que prontidão, considerando o setor de software, é a medida da capacidade de um produto em ser utilizado em um sistema maior, de acordo com requisitos específicos. A depender da aplicação, um produto considerado maduro pode ter diferentes níveis de prontidão, ou seja, a prontidão de uma tecnologia reflete algumas medidas de risco da sua utilização em grandes sistemas, quanto maior a prontidão, menor o risco envolvido.

Smith (2005) ainda destaca que apesar do uso frequente como sinônimo dos termos maturidade e prontidão, eles não representam a mesma coisa. Tecnologias ou produtos considerados maduros podem possuir maior ou menor prontidão para uso em determinado sistema que outro com menor maturidade.

3.4 MODELOS DE MATURIDADE PARA INDÚSTRIA 4.0 NA LITERATURA

Conforme apresentado na Figura 7, ao verificar na plataforma Scopus o quantitativo de publicações que utilizaram o termo Industry 4.0 entre 2001 e 2019, percebe-se, que este tema vem tomando uma grande dimensão nos últimos 5 anos, saindo de 216 publicações no ano de 2014 para um total de 4628 em 2019, resultando um salto de aproximadamente 21 vezes no período.

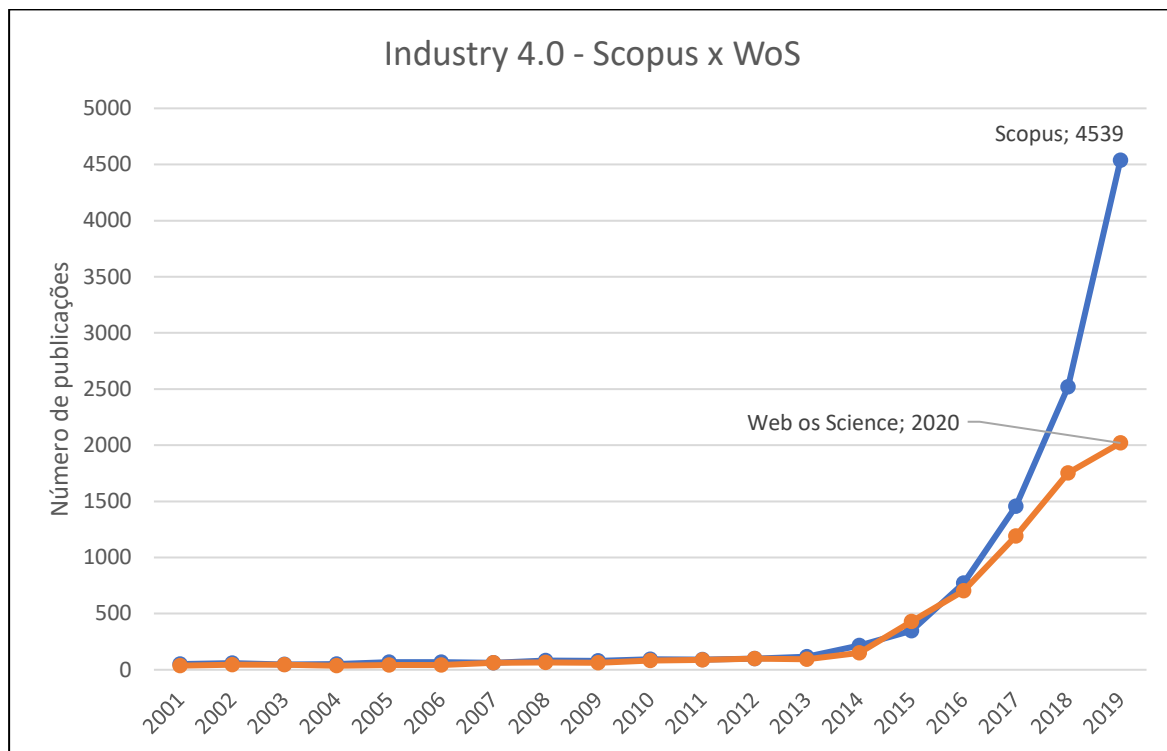


Figura 7. Evolução de publicações envolvendo o termo Industry 4.0 ao longo do tempo. Scopus e Web of Science.

Com relação aos países que mais publicam sobre o tema, a Figura 8 apresenta os 6 países/territórios com mais publicações com o termo “Industry 4.0” nas bases Scopus e Web of Science. Em primeiro lugar aparece a Alemanha, impulsionado pelas iniciativas de seu governo com o foco de aumentar a produtividade da indústria por meio da inovação e elevar a competitividade em relação ao mercado asiático, como a High-Tech Strategy, iniciativa lançada em 2006 pelo governo alemão como uma iniciativa em conjunto com empresas nacionais que constantemente investem em novas tecnologias e inovação como Siemens, Volkswagen, Bosch, Kuka e Festo, além da sueca ABB.

A iniciativa recebeu várias atualizações ao longo do tempo, sendo a atual a High-Tech Strategy 2025, com foco em Saúde, Sustentabilidade, Energia e proteção do clima, Mobilidade e Economia e Trabalho 4.0 (BMBF, 2018).

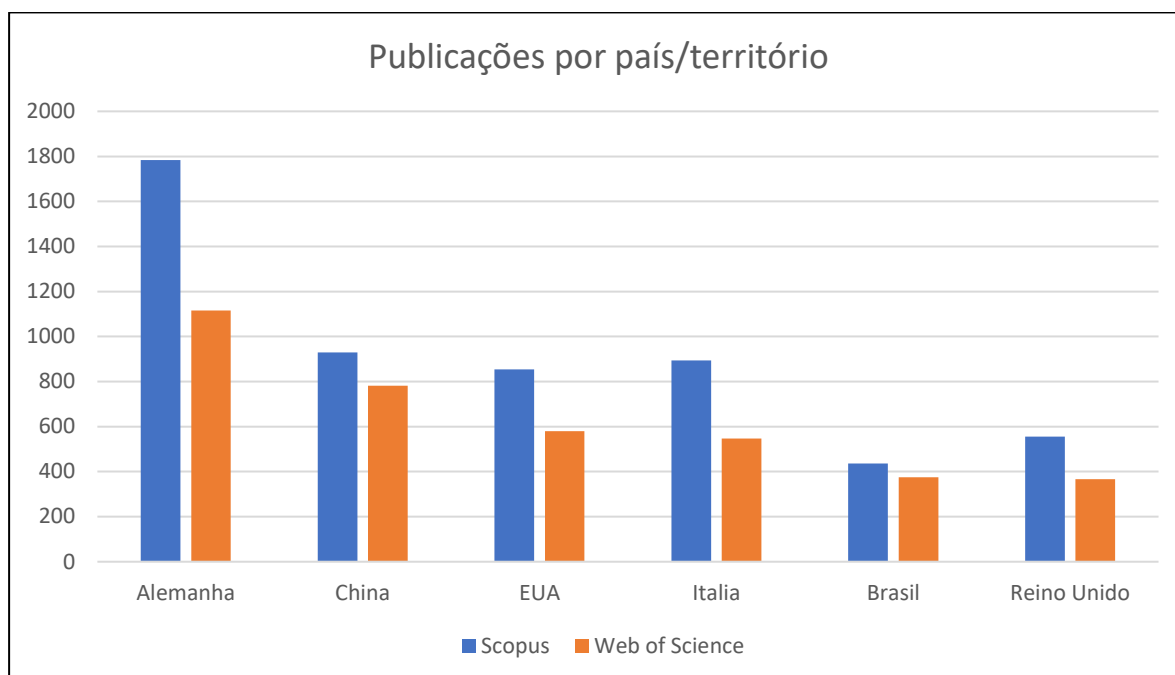


Figura 8. Países com mais publicações com o termo Industry 4.0.

Na sequência surge a China, país no qual o governo passou a se dedicar com mais vigor à tecnologia e à inovação, sobretudo a partir dos anos 2000, como meios de impulsionar o crescimento econômico, definindo diretrizes e priorizando segmentos estratégicos. Com o objetivo de modernizar totalmente o parque industrial chinês, o governo lançou em 2015 o programa Made in China 2025 (KAGERMANN, 2016).

O terceiro país em publicações é os EUA, país no qual a Indústria 4.0 é amplamente impulsionada por iniciativas do setor privado quando comparado com Alemanha e países da Ásia, onde as agências governamentais desempenham um papel relativamente maior. Embora a Alemanha discuta e promova a Indústria 4.0 desde 2011, somente em 2014 que uma iniciativa de larga escala semelhante ocorreu nos EUA com a criação do Industrial Internet Consortium (IIC), fundada pela General Electric (GE) em conjunto com a AT&T, Cisco e IBM (KAGERMANN, 2016).

O Brasil surge como quinto país com mais publicações relacionadas à Indústria 4.0, logo à frente do Reino Unido. Várias pesquisas e estudos vem sendo realizados no país nos últimos anos com o objetivo de se avaliar a matriz produtiva local e de buscar formas de torná-la mais eficiente com a inclusão de tecnologias da Indústria 4.0, como a ferramenta de avaliação de maturidade desenvolvida pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI/CNI (LIMA, 2019).

Com o intuito de verificar como o conceito de modelos de maturidade e Indústria 4.0 atuam juntos, foram realizadas buscas nas bases de periódicos Web of Science e Scopus utilizando alguns sinônimos que descrevem a 4ª Revolução Industrial como *Advanced Manufacturing*, *Industry 4.0* e *Digital Transformation*, combinados ao termo *Maturity*.

Diante do fato de que estes termos são recentes na produção científica, definiu-se a pesquisa somente dentro do Século XXI, compreendendo o período do ano 2001 até os dias atuais, ano 2019.

Ao realizar a busca nas bases pelos termos chave, as plataformas irão selecionar as publicações que possuem o termo no título, resumo ou nas palavras-chave definidas pelo autor, dentro de um período de tempo determinado.

Após a seleção realizada pelas bases de periódicos, é necessário analisar os dados gerados, verificando o conteúdo de cada publicação, pois ainda que os materiais possuam as palavras-chave descritas, estas podem não ter relação direta com os temas da pesquisa.

A Tabela 1 apresentam os resultados das diferentes buscas realizadas nas bases Web of Science e Scopus e o comparativo do total de publicações encontradas e das publicações relacionadas de fato aos temas de interesse.

Tabela 1. Palavras-chave e publicações (WoS e SCOPUS).

Termos	Web of Science		SCOPUS	
	Nº de publicações totais	Nº de publicações relacionadas	Nº de publicações totais	Nº de publicações relacionadas
<i>Industry 4.0 and Maturity</i>	37	20	43	26
<i>Advanced Manufacturing and Maturity</i>	83	12	85	19
<i>Digital Transformation and Maturity</i>	41	19	77	24

Como pode-se notar pelos valores na Tabela 1, apesar dos termos estarem relacionados a um mesmo conceito, ou seja, a 4ª Revolução Industrial, diferentes resultados foram encontrados.

Após ser realizada uma análise inicial de cada publicação, procedendo uma filtragem das publicações que realmente estão relacionadas com os termos pesquisados, foi verificado que, conforme mostrado na Tabela 1, o termo *Industry 4.0*, juntamente com *Maturity*, levou a uma taxa de 54% a 60% de publicações de fato relacionadas às palavras-chave inseridas, respectivamente nas plataformas Web of Science e Scopus. Já os termos *Digital Transformation* e *Maturity* alcançaram um valor de 33% a 46% de publicações de fato relacionadas e por fim os termos *Advanced Manufacturing* e *Maturity* corresponderam a somente 15% a 22% das publicações de fato. Observa-se que apesar do termo *Advanced Manufacturing* proporcionar um número inicial maior de publicações para o período de busca, a maior parte delas dizem respeito a outros temas que, de uma forma ou de outra, possuem relação entre suas palavras-chave como *advanced* e também *manufacturing*, mas não à Indústria 4.0.

Ao verificar o quantitativo de publicações que utilizaram o termo *Industry 4.0* a *Maturity* entre 2000 e 2018, considerando as plataformas Scopus e Web of Science, percebe-se, como visualizado no Figura 9, que este tema vem tomando uma grande dimensão nos últimos 4 anos, saindo de 1 publicações no ano de 2014 para 82 em 2019, na Scopus, e saindo de 1 publicação em 2015 para 52 em 2019 na Web of Science.

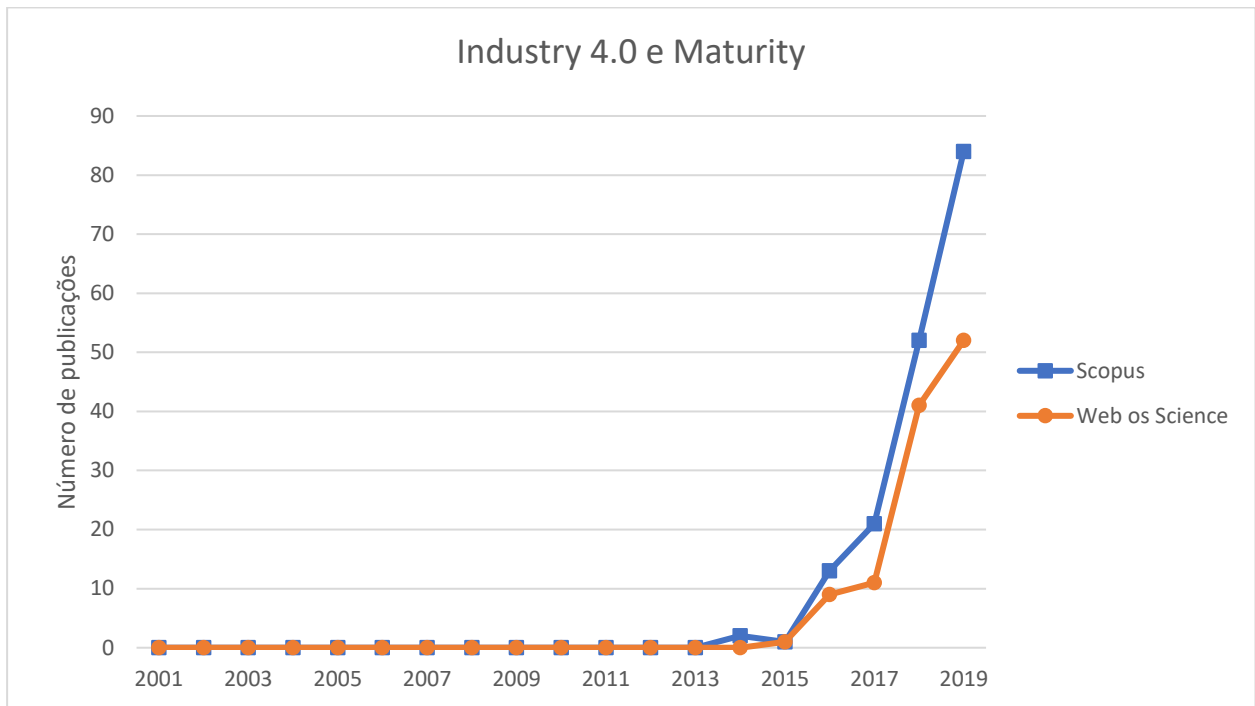


Figura 9. Publicações na Scopus e Web of Science com os termos Industry 4.0 e Maturity ao longo do tempo.

Considerando os modelos de maturidade mais citados obtidos da bibliometria realizada, foi possível destacar 7 modelos para Indústria 4.0, além de outros três modelos relevantes presentes na literatura, classificados como consultoria (WMG, PwC, Acatech), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos de Maturidade para Indústria 4.0

Autor	Ano	Nome	Dimensões organizacionais	Níveis de Maturidade
Schumacher, A., Erol, S., Sihh, W	2016		9: Estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura, pessoas, governança e tecnologia	5 níveis (1=não implementado a 5=totalmente implementado)
Agca, O., Gibson, J., Godsell, J., Ignatius, J., Wyn Davies, C., & Xu, O	2017	Readiness Assessment Tool - Warwick Manufacturing Group (WMG)	6: Produtos e serviços; Fabricação e operações; Estratégia e organização; Cadeia de suprimentos; Modelo de negócios e Considerações legais	4 níveis (1=iniciante a 4 = especialista)
Jaione Ganzarain , Nekane Errasti	2016		3 estágios: Envision 4.0; enable 4.0; enact 4.0	5 níveis: Inicial, gerenciado, definido, transformação e Modelo de Negócio detalhado.
Anna De Carolis, Marco Macchi, Elisa Negri, e Sergio Terzi	2017	DREAMY	4 dimensões: Processos, Controle e monitoramento, Tecnologia e Organização.	5 níveis: Inicial, gerenciado, definido, integrado e interoperado, orientado digitalmente.
Christian Leyh, Thomas Schäffer, Katja Bley, Sven Forstehäusler	2016	SIMMI 4.0	4: Integração vertical, horizontal, desenvolvimento digital, cruzamento de tecnologias.	5 estágios de digitalização: Básica, cruzada, horizontal e vertical, total.
Ebru Gökalp, Umut Şener, P. Erhan Eren	2017		5: Gestão de ativos, Governança de dados, Gestão de aplicações, transformação de processos, alinhamento organizacional	6: incompleto, realizado, gerenciado, estabilizado, preditivo, otimizado.

Canetta, L; Barni, A; Montini, E	2018		5: Estratégia, Processos, Produtos e Serviços, Tecnologias, Recursos Humanos.	4: Ausência, Iniciante, Intermediário, Experiente.
Sjodin, DR; Parida, V; Leksell, M; Petrovic, A	2018		3: Pessoas, Processos, Tecnologias	4: Tecnologias conectadas, Coleta e compartilhamento de dados estruturados, Análise e otimização de processos em tempo real; Manufatura inteligente e preditiva.
Geissbauer, R., Vedso, J., Schrauf, S	2016	PwC	7: negócios, produtos e serviços, integração da cadeia de valor, análise de dados, arquitetura de TI ágil, conformidade e segurança, organização e cultura.	4: iniciante, integrador vertical, colaboração horizontal, especialista digital.
Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Hompel, M., Wahlster, W	2017	ACATECH	4: Recursos, Sistemas de Informação, Cultura, Estrutura Organizacional.	6: Informatização, Conectividade, Visibilidade, Transparência, Capacidade preditiva, Adaptabilidade.

CAPÍTULO 4 DESENVOLVIMENTO

Com o intuito de apresentar a estrutura dos principais modelos de maturidade e prontidão para Indústria 4.0 existentes na literatura, a seguir são descritos 5 modelos com suas características.

4.1 MODELO ACATECH

Segundo a ACATECH (Academia Alemã de Ciência e Engenharia), ser 4.0 significa gerar conhecimento de dados para transformar a empresa em uma organização ágil, que aprende, e permita uma tomada de decisão rápida e uma flexível adaptação dos processos em todas as áreas de negócio. Através de um consórcio formado por instituições de pesquisa em diferentes áreas, juntamente com parceiros industriais, o grupo ligado à ACATECH trabalhou para desenvolver uma metodologia para estabelecer o atual estágio de maturidade na Indústria 4.0 das empresas de manufatura e identificar as áreas em que uma ação adicional seria necessária. (SHUH, 2017)

A entidade alemã desenvolveu em 2017 um modelo de maturidade, denominado *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies* (SCHUH, 2017), no qual apresenta quatro perspectivas-chave de uma organização:

- Recursos;
- Sistemas de Informação;
- Estrutura Organizacional e
- Cultura Organizacional.

Analisando o modelo como um todo, tem-se as dimensões e capacidades apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Dimensões e Capacidades - ACATECH

Área estrutural	Princípios	Capabilidades
Recursos	Capabilidade Digital	Fornecer competências digitais
		Aquisições de dados por meio de sensores e atuadores

		Processamento descentralizado de dados	
	Comunicação Estruturada	Comunicação eficiente	
		Design de interação baseado em tarefas	
Sistemas de Informação	Processamento de Informações por Auto-aprendizagem	Análise de dados automatizada	
		Entrega de informações contextualizadas	
		Interface com usuário específica por tarefas	
		Infraestrutura de TI resiliente e armazenamento de dados baseado em situação	
	Integração de Sistemas de Informação	Sistemas de Informação integrados horizontalmente e verticalmente	
		Padronização de interface de dados	
		Implantação de uma governança de dados	
Atualização da segurança de TI			
Estrutura Organizacional	Disposição para mudanças	Reconhecer o valor dos erros	
		Abertura para inovação	
		Aprendizagem e tomada de decisões baseada em dados	
		Desenvolvimento profissional contínuo	
		Moldando as mudanças	
	Colaboração Social	Estilo de liderança democrática	
		Comunicação aberta	
Confiança em processos e sistemas de informação			
Cultura	Organização interna orgânica	Comunicação Flexível	
		Gestão da decisão correta	
		Sistemas de metas motivacionais	

		Gestão ágil
	Colaboração dinâmica na rede de valor	Foco nos benefícios do cliente
		Cooperação dentro da rede

Os recursos descritos no modelo foram alinhados com os desafios e atividades atuais das empresas de manufatura e a aplicabilidade do modelo foi então validada em cenários aplicados. Em cada uma dessas perspectivas, são avaliadas por meio de seis níveis de maturidade.

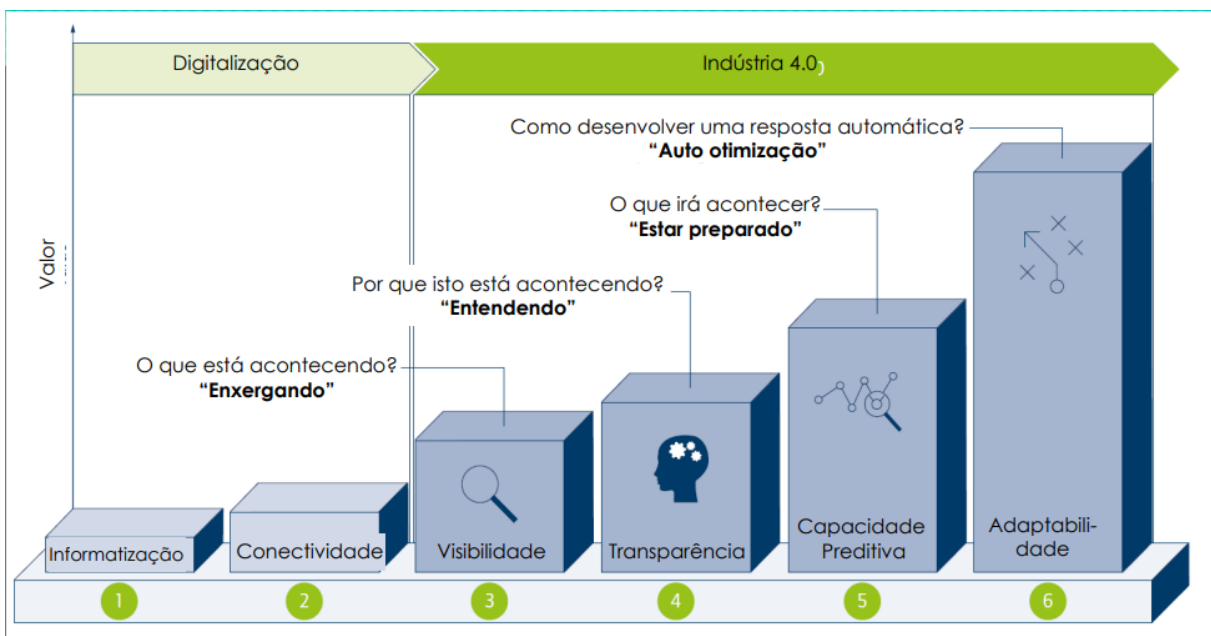


Figura 10. Representação dos 6 níveis de maturidade do modelo ACATECH (Adaptado de SHUH, 2017).

Cada uma das dimensões pode ser descrita como sendo:

Recursos: Inclui os recursos operacionais, físicos e imateriais que são utilizados nos processos produtivos.

Sistemas de Informação: inclui todos os processos para a coleta, organização, armazenamento e comunicação de informações para uma implementação eficaz e eficiente da indústria 4.0.

Estrutura Organizacional: descreve qualquer estrutura corporativa, alinhamentos e normas para explicar como as atividades da Indústria 4.0 para alocação de tarefas, comunicação, coordenação e supervisão são dirigidas em direção à conquista de objetivos organizacionais. Uma organização pode ser estruturada de diferentes formas, dependendo de seus objetivos.

Cultura: Explica a cultura organizacional para a implantação da Indústria 4.0 como uma oportunidade para criar um novo ambiente industrial e local de trabalho. É fundamental a utilização de conceitos que permitam responsabilidade, autonomia, flexibilidade e uma cultura de inovação.

Observa-se que cada área do modelo possui dois princípios fundamentais atribuídos e seus respectivos 27 itens abordados, conforme ilustrado na Figura 11.

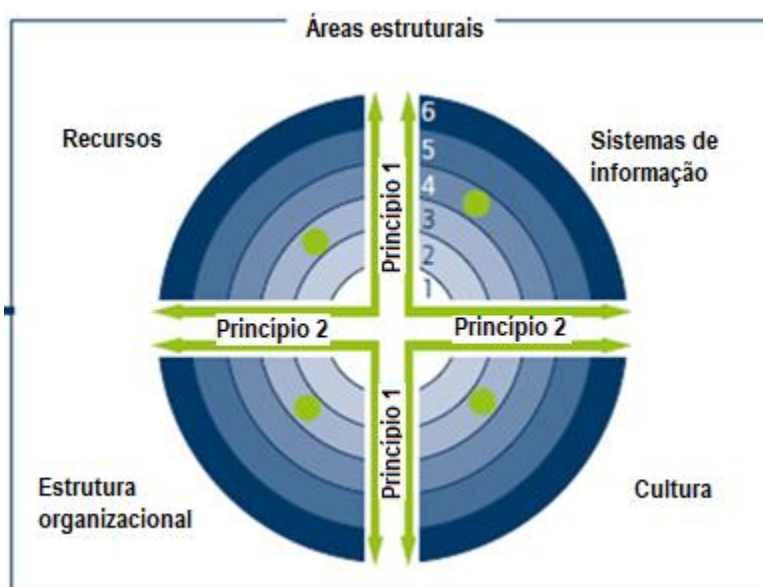


Figura 11. Representação das dimensões do modelo (Adaptado de SHUH, 2017).

A estrutura do modelo ACATECH merece ser destacada pela sua qualidade, sendo utilizada como base para outros modelos de maturidade como a plataforma de avaliação de maturidade para a Indústria 4.0 do SENAI: maturidade.senai40.com.br. É proposto um processo de desenvolvimento corporativo em três etapas, onde inicialmente a estrutura corporativa e os processos corporativos são avaliados. O segundo passo é uma análise de acordo com a estratégia corporativa, e por último são identificadas as medidas adequadas para a melhoria da maturidade da organização. Apesar disso, o modelo proposto carece de

clareza em como avaliar essas áreas. Apenas um exemplo da ferramenta de avaliação é fornecida. Além disso, apesar de indicar que é um modelo de avaliação da maturidade, as melhorias sugeridas são específicas por área, conseqüentemente, em termos concretos, o modelo sugere melhorias na capacidade (CHRISIS ET AL., 2011) e não melhorias da maturidade.

Por fim, a falta de base tecnológica para análise de processos pode dificultar em compreender as diferenças entre a análise de maturidade para Indústria 4.0 e uma análise geral de melhorias para aumentar o desempenho da empresa.

4.2 MODELO DREAMY

O estudo denominado DREAMY ou *Digital Readiness Assessment Maturity Model*, apresentado em De Carolis et al. (2017), desenvolvido no Politecnico de Milão, é baseado nos princípios do CMMI (Capability Maturity Model Integration), sendo focado em avaliar empresas de manufatura em o quão prontas elas se encontram para a transformação digital.

Inicialmente 4 dimensões são consideradas:

- Controle e Monitoramento;
- Tecnologia;
- Processos;
- Organização.

Cada área contém 5 grandes processos macro, estruturados como a base do modelo:

- Projeto e Engenharia,
- Gestão da Produção,
- Gestão da Qualidade,
- Gestão da Manutenção e
- Gestão da Logística.

Com isso cinco níveis de maturidade são definidos: Inicial, gerenciado, definido, integrado e interoperado e orientado digitalmente, conforme Quadro 2. Para se avaliar a capacidade digital de uma organização não são consideradas apenas as tecnologias utilizadas. Com isso, é avaliada a prontidão digital de uma companhia através de quatro dimensões: Processos, Controle e Monitoramento, Tecnologia e Organização.

Quadro 2. Definição dos Níveis de Maturidade do DREAMY (DE CAROLIS, 2017)

ML 1 Inicial	Os processos são pouco controlados ou não controlados, a gestão dos processos é reativo e não possui as "ferramentas" organizacionais e tecnológicas adequadas para a construção de uma infraestrutura que permita a repetibilidade / usabilidade / extensibilidade das soluções utilizadas.
ML2 Gerenciado	Os processos são parcialmente planejados e implementados. A gestão de processos é fraca devido à falta de organização e/ou tecnologias habilitadoras. As escolhas são orientadas por objetivos específicos de projetos únicos de integração e/ou pela experiência do planejador, que demonstra uma maturidade parcial na gestão do desenvolvimento da infraestrutura.
ML3 Definido	Os processos são definidos com o planejamento e a implementação de boas práticas e procedimentos de gerenciamento. O gerenciamento do processo é limitado por algumas restrições nas responsabilidades organizacionais e/ou nas tecnologias facilitadoras. Portanto, o planejamento e a implementação do processo realçam algumas lacunas / falta de integração, troca de informações e, finalmente, interoperabilidade entre aplicativos.
ML4 Integrado e Interoperável	Os processos são construídos pela troca de informações, integração, e interoperabilidade entre aplicações. São totalmente planejados e implementados. A integração e a interoperabilidade são baseadas em padrões comuns e compartilhados dentro da organização.
ML5 Digitalmente orientado	Os processos são orientados digitalmente e são baseados em uma infraestrutura sólida tecnologicamente e em uma organização de alto potencial de crescimento, que suporta - por meio de integração e interoperabilidade generalizada - velocidade, robustez e segurança na troca de informações, na colaboração entre as funções da empresa e nas tomadas de decisão.

Os autores apresentam exemplos de utilização do modelo para algumas das questões apresentadas, segundo De Carolis et al. (2017):

Como os planos de manutenção são definidos em sua organização?

- Nenhum plano de manutenção é definido – ML1;
- Baseado na experiência dos operadores responsáveis pela gestão da manutenção – ML2;
- Baseado na experiência dos operadores responsáveis pela gestão da manutenção e se inicia pela recomendação dos fabricantes – ML3;
- Inicia-se por recomendação dos fabricantes e utiliza instrumentos de análise quantitativa para definir/redefinir as maiores frequências para executar manutenções preventivas – ML4;
- Avaliação dos resultados são obtidos com planos anteriores e utilizando instrumentos de análise quantitativa para (I) definir/redefinir as maiores frequências para executar manutenções preventivas e (II) para garantir melhorias contínuas – ML5.

A segunda etapa do modelo é identificar as fraquezas e forças da empresa por meio da análise dos níveis de maturidade e por entrevistas. Esta análise permite entender quais processos a empresa possui potencial para concentrar esforços e quais as oportunidades para melhorar a maturidade dos processos.

O modelo DREAMY é explicitamente direcionado para empresas do tipo industriais e, além da avaliação de maturidade, também com o objetivo de identificar a prontidão, sugere uma metodologia de digitalização na qual o modelo de maturidade é usado primeiramente como ferramenta descritiva e depois como base prescritiva para a melhoria do processo. A metodologia também sugere uma discussão de viabilidade antes de iniciar projetos de digitalização. O modelo possui um total de 200 questões para o diagnóstico das empresas e foi aplicado e explicitado em três casos, uma indústria alimentícia, uma indústria de engenharia mecânica e uma indústria de energia elétrica.

4.3 AN INDUSTRY 4 READINESS ASSESSMENT TOOL (WMG)

Desenvolvido em 2017 com base em pesquisas da Warwick Manufacturing Group da Universidade de Warwick, no Reino Unido (WMG) em conjunto com colaboradores das organizações Crimson & Co e Pinsent Masons, o modelo denominado *Industry 4.0 Readiness Assessment Tool* (AGCA, 2017) possui 6 dimensões:

- Produtos e serviços,
- Fabricação e operações,
- Estratégia e organização,
- Cadeia de suprimentos,
- Modelo de negócios e
- Considerações legais

O Quadro 3 apresenta as questões abordadas em cada uma das dimensões, as quais são apresentadas mais detalhadamente adiante.

Quadro 3. Dimensões e sub-áreas do modelo WMG.

Dimensão	Itens de avaliação
Produtos e serviços	Personalização do produto
	Recursos digitais do produto
	Serviços orientados por dados
	Nível de uso de dados do produto pela empresa
	Participação na receita
Fabricação e Operações	Automação
	Integração de Sistemas de máquinas e operações (M2M)
	Preparação de equipamentos para Indústria 4.0
	Peças de trabalho guiadas autonomamente
	Processos de Auto otimização
	Modelagem digital
	Coleta de dados de operações
	Uso de dados de operações
	Uso de soluções em nuvem
TI e segurança de dados	

Estratégia e Organização	Grau de implementação da estratégia
	Medição
	Investimentos
	Capacitação das pessoas
	Colaboração
	Liderança
	Finanças
Cadeia de Suprimentos	Controle do inventário usando gestão de dados em tempo real
	Integração da cadeia de suprimentos
	Visibilidade da cadeia de suprimentos
	Flexibilidade da cadeia de suprimentos
	Tempo de espera
Modelo de Negócio	Modelo “as a service”
	Decisões baseadas em dados
	Rastreamento em tempo real
	Agendamento automatizado em tempo real
	Canais de marketing integrados
	Apoio da TI no negócio
Considerações Legais	Modelos de contratação
	Risco
	Proteção de dados
	Propriedade intelectual

Produtos e Serviços: um dos pilares centrais da Indústria 4.0 é a presunção de que um "tamanho de lote de 1" pode ser produzido com o mesmo custo unitário de um produto produzido em massa, pois acredita-se que, no futuro, os clientes valorizarão os níveis crescentes de personalização do produto (AGCA et al., 2017, p. 6). Para isso, será necessário um processo produtivo de diferenciação tardia, ou seja, que o produto consiga ser alterado

nas etapas finais da sua produção. Segundo os autores, os produtos devem ser capazes de se conectar com o cliente para oferecer serviços baseados em dados. Além disso, um dispositivo habilitado digitalmente também permitirá a coleta de dados do usuário, que podem ser usados para oferecer mais serviços de adição de valor (uso de dados do produto) (AGCA et al., 2017, p. 6). Em última análise, isso pode levar a um modelo de negócios em que a receita é dividida entre a receita da compra inicial do produto físico e a receita contínua dos serviços de valor agregado. A tendência é que a parte da receita dos serviços baseados em dados aumente (AGCA et al., 2017, p. 6), (BARBALHO e DANTAS, in press).

Estratégia e Organização: nesta dimensão, é fundamental que a liderança compreenda os benefícios relacionados à Indústria 4.0 e estejam dispostos a investir. A implementação bem-sucedida também requer apoio interfuncional tanto a nível estratégico como operacional, adotando medições relevantes e formas colaborativas de trabalho (AGCA et al., 2017, p. 10). Os departamentos precisam estar abertos à colaboração entre as áreas para promover melhorias. Conforme os autores, as empresas precisarão de funcionários com o conhecimento e os recursos digitais desenvolvidos para converter a estratégia em ações, por isso treinamentos devem fazer parte da agenda. As empresas precisam incorporar o conceito da Indústria 4.0 em funções e níveis de negócios, garantindo que os KPI's internos e o retorno do investimento (AGCA et al., 2017, p. 10).

Cadeia de Suprimentos: para garantir que os clientes se beneficiem de melhores serviços e flexibilidade, as empresas precisarão ser capazes de responder imediatamente às mudanças no ambiente de mercado e aos requisitos individuais dos clientes (AGCA et al., 2017, p. 12). A implementação da Indústria 4.0 proporcionará melhor visibilidade da demanda futura e dos estoques em toda a cadeia de suprimentos. Serão obtidas informações em tempo real sobre a localização do produto, capacidade, inventário e operações em toda a cadeia de suprimentos, permitindo o compartilhamento de informações ao longo da cadeia com fornecedores e uma melhor resposta às necessidades dos clientes (AGCA et al., 2017, p. 12).

Modelo de Negócio: a transformação de produtos em serviços possui, cada vez mais, implicações nos modelos de negócios das empresas (“as a service model”). (AGCA et al., 2017, p. 14). Segundo os autores, o Reino Unido viu uma mudança da propriedade total de um carro (um produto) para um serviço. Um pagamento mensal assegura o acesso dedicado a um carro, por um determinado número de milhas por ano, com manutenção acordada e

recuperação de avarias (AGCA et al., 2017, p. 14). A próxima etapa da evolução é a visão da "mobilidade como serviço", que questiona a necessidade de acesso dedicado a um carro. Tais provisões podem depender do rastreamento em tempo real do produto e do agendamento automatizado e em tempo real das atividades de manutenção (AGCA et al., 2017, p. 14).

Considerações Legais: foram identificadas quatro dimensões legais para avaliação: modelos de contratação, risco legal, dados e propriedade intelectual (AGCA et al., 2017, p. 16). Como resultado da adoção da Indústria 4.0, os modelos de contratação estão sendo desafiados, particularmente os modelos tradicionais. Há uma necessidade de mudança cultural e legal para alteração de acordos mais colaborativos, com abertura para o compartilhamento de risco e recompensa (AGCA et al., 2017, p. 16). A geração e fluxo de dados é um elemento fundamental da Indústria 4.0 e um facilitador para a criação de valor. No entanto, a proteção adequada e o uso de dados (tanto de propriedade quanto de propriedade de terceiros) são essenciais tanto para o funcionamento da Indústria 4.0 quanto para a realização do valor dos dados. Segundo os autores, a identificação, proteção e exploração da propriedade intelectual sempre foi de extrema importância para as empresas distinguirem seus produtos e serviços dos de seus concorrentes. A adoção da Indústria 4.0 coloca essas questões em foco e expande a gama de direitos a serem considerados, em particular a interação com os direitos de propriedade intelectual de terceiros (AGCA et al., 2017, p. 16).

Como exemplo da análise dos níveis de maturidade dentro de cada dimensão, o Quadro 4 apresenta as sub-áreas da dimensão **Produtos e Serviços** (Personalização do produto; Recursos digitais de produto; Serviços orientados por dados; Nível de uso de dados do produto pela empresa; Participação da receita) e o grau de desenvolvimento de cada conceito representando cada um dos quatro níveis de maturidade.

Quadro 4. Descrição da Dimensão Produtos e Serviços do Modelo da WMG

Nível de maturidade	Nível 1 Iniciante	Nível 2 Intermediário	Nível 3 Especialista	Nível 4 Expert
Personalização do produto	O produto não permite ser fabricado individualmente, a sua produção ocorre	Boa parte dos produtos são feitos em grandes lotes com diferenciação tardia limitada	Os produtos podem ser amplamente personalizados, mas ainda têm base padronizada	Diferenciação tardia (aquela que ocorre ao final da cadeia de produção) disponível para a maioria dos

	de forma padronizada e em massa			produtos sob encomenda (tamanho do lote 1)
Recursos digitais de produto	Produtos mostram apenas valor físico	Os produtos mostram valor apenas para licenciamento de propriedade intelectual (patente)	Produtos exibem algumas características digitais e valor para licenciamento de propriedade intelectual (patente)	Produtos exibem altos recursos digitais e valor para licenciamento de propriedade intelectual (patente)
Serviços dirigidos por dados	Serviços dirigidos por dados são oferecidos sem integração com o cliente	Serviço dirigidos por dados são oferecidos com pouca integração com o cliente	Serviços dirigidos por dados são oferecidos com integração com cliente	Serviços dirigidos por dados são totalmente integrados ao cliente
Nível de uso de dados do produto pela empresa	Não são usados nem coletados dados do usuário por meio do uso do produto	0 a 20% dos dados coletados por meio do uso do produto são utilizados	20 a 50% dos dados coletados por meio do uso do produto são utilizados	Mais de 50% dos dados coletados por meio do uso do produto são utilizados
Participação da receita	Os serviços baseados em dados são responsáveis por uma participação inicial de receita (<2,5%)	Os serviços baseados em dados representam uma parte moderada de receita (2,5 a 7,5%)	Os serviços baseados em dados são responsáveis por uma participação significativa de receita (7,5 a 10%)	Os serviços baseados em dados desempenham um papel importante na receita (>10%)

O modelo Agka (2017) incorpora em suas dimensões uma visão dos principais processos corporativos e de negócios, no qual cada nível de prontidão, e não maturidade, possui intrínseco uma avaliação sobre tecnologias habilitadoras e como a empresa as utiliza. Cada dimensão possui subdimensões e uma descrição para cada nível de prontidão, de acordo com suas próprias especificidades de processo.

A principal ponto positivo do modelo da Agka (2017) é a facilidade de coleta de dados da maturidade em Indústria 4.0 da empresa, possibilitando um conjunto significativos de dados coletados, permitindo uma análise comparativa em nível mundial. As descrições também permitem uma análise direta de possíveis melhorias para cada sub-dimensão. Por outro lado, um alinhamento entre níveis de maturidade e aplicações tecnológicas poderia ser

melhor estruturado. Como habilitadores organizacionais são cobertos por outras áreas, algumas necessidades críticas por melhorias não podem ser explicadas de acordo com os dispositivos do modelo.

4.4 INDUSTRY 4.0 READINESS (IMPULS):

Outro modelo de maturidade desenvolvido a partir da parceria entre Indústria e Academia foi o modelo Industry 4.0 Readiness. O Estudo foi financiado pela Fundação IMPULS da Federação Alemã de Engenharia (VDMA) e conduzido pelo Instituto de Gestão Industrial da Universidade de Aachen (FIR at RWTH) e pelo Instituto de Pesquisa Econômica de Cologne (IW Consult) no ano de 2017. Foi então desenvolvido uma ferramenta online na qual empresas interessadas poderiam avaliar seus níveis individuais de prontidão em relação à Indústria 4.0 (LICHTBLAU, 2017).

O estudo foi realizado por meio de questionários aplicado em indústrias de engenharia mecânica da Alemanha com mais de 20 funcionários, considerando que entre as mais de 6000 entidades registradas no país como sendo indústrias dessa categoria, mais da metade são membros da VDMA.

Além disso, as empresas foram categorizadas de acordo com o número de funcionários:

- Pequenas empresas: 20 a 99 funcionários.
- Médias empresas: 100 a 499 funcionários.
- Grandes empresas: mais de 500 funcionários.

O modelo é baseado nas indústrias de engenharia mecânica, e possui como visão quatro objetivos:

- **Integração horizontal:** Uma Fábrica Inteligente adapta-se constantemente a novas situações (como o volume de pedido ou a disponibilidade de materiais) e otimiza automaticamente seus processos de produção. Faz isso por integração com fornecedores e clientes na cadeia de valor.
- **Integração Vertical:** Pessoas, Maquinário e recursos são modelados digitalmente na fábrica inteligente, comunicando-se entre si através de sistemas ciberfísicos.
- Os **Produtos Inteligentes** possuem informações sobre seu próprio processo de produção e podem coletar e transmitir dados durante a fase de fabricação e uso. Isso

torna possível obter um modelo digital da fábrica inteligente e oferecer serviços orientados a dados a clientes durante a fase de utilização.

- O **ser humano** como ponto fundamental para criação de valor.

O modelo apresenta seis dimensões:

- Estratégia e Organização
- Fábrica Inteligente
- Operações Inteligentes
- Produtos Inteligentes
- Serviços orientados a dados
- Funcionários

Cada uma das seis dimensões apresentadas possui seis níveis de prontidão, iniciando do nível 0 (outsider ou não habituado) quando a organização ainda não realizou nada ou muito pouco para implantar ações da Indústria 4.0, até o nível 5 (Top performers ou maior desempenho) para aquelas companhias que implantaram com sucesso as ferramentas da Indústria 4.0.

O estudo realizado pelas instituições busca responder essencialmente as duas questões:

- (1) Em que posição as indústrias de engenharia mecânica da Alemanha atualmente se encontram no caminho da Indústria 4.0?
- (2) Quais são as condições que precisam ser criadas para uma implantação com sucesso dos conceitos da Indústria 4.0 nestas empresas, e quais condições precisam ser mudadas?

Além disso, cada dimensão do modelo pode ser apresentada como uma análise das seguintes questões:

Estratégia e Organização: Até que ponto a Indústria 4.0 está estabelecida e implantada como estratégia de sua organização?

Fábrica Inteligente: Até que ponto sua empresa possui uma produção digitalmente integrada e automatizada baseada em sistemas ciber-físicos?

Operações Inteligentes: Até que ponto os processos e produtos em sua empresa são digitalmente modelados e possíveis de serem controlados através de sistemas e algoritmos em um mundo virtual?

Produtos Inteligentes: Até que ponto os seus produtos podem ser controlados digitalmente, tornando-os possíveis de se comunicar e interagir com sistemas de alto nível através da cadeia de valor?

Serviços orientados a Dados: Até que ponto é oferecido serviços orientados a dados que são possíveis somente através da integração de produtos, produção e clientes?

Funcionários: Sua companhia possui as habilidades necessárias para implantar os conceitos da Indústria 4.0?

Cada uma das seis dimensões é formada por um conjunto de ações ou atividades que juntos representam os conceitos da Indústria 4.0, de acordo com o modelo, conforme Quadro 5.

Quadro 5. Estrutura do Modelo de Maturidade IMPULS

Dimensões	Ações a serem avaliadas
Estratégia e Organização	Estratégia
	Investimentos
	Gestão da Inovação
Fábrica Inteligente	Modelagem Digital
	Infraestrutura de equipamentos
	Uso de dados
	Sistema TIC
Operações Inteligentes	Uso de nuvem
	Segurança da informação
	Processos Autônomos
	Compartilhamento de dados
Produtos Inteligentes	Análise de dados
	Funções complementares de TIC
Serviços orientados por dados	Compartilhamento de dados
	Compartilhamento de receitas
	Serviços orientados por dados
Funcionários	Aquisição de habilidades
	Habilidades dos Funcionários

Já os níveis do modelo são os seguintes:

Nível 0: Uma empresa neste nível não possui nenhum dos requisitos para a Indústria

4.0.

Nível 1: São realizadas iniciativas piloto em diversos setores e somente alguns processos são realizados por sistemas de Tecnologia da Informação (TI) e a infraestrutura de equipamentos permite somente parcialmente os requisitos futuros de integração e comunicação.

Nível 2: Há uma estratégia para implantação da Indústria 4.0 em andamento e a empresa possui indicadores que medem o status da implantação. Investimentos relevantes são realizados em algumas áreas.

Nível 3: A empresa já possui uma estratégia para Indústria 4.0. Por meio da implantação de diversas tecnologias habilitadoras, a empresa desenvolve produtos com várias funções complementares interconectados, formando a base para serviços orientados a dados, porém ainda de forma não integrada com os seus clientes.

Nível 4: Investimentos são realizados em quase todas as áreas e os processos são apoiados por meio de gestão da inovação. Os sistemas de TIC apoiam a maioria dos processos e coletam uma grande quantidade de dados, os quais são utilizados para otimização.

Nível 5: A empresa nesse nível além de já possuir uma estratégia para Indústria 4.0, monitora constantemente o status de seus projetos. Possui uma gestão da inovação bem estabelecida e ampla. Os equipamentos satisfazem todos os requisitos para integração e comunicação de sistemas. Algumas áreas da produção já utilizam ferramentas e maquinários guiados de forma autônoma.

Com o objetivo de melhor representar o progresso e condições relativas à Indústria 4.0, os seis níveis de maturidade apresentados foram agrupados em 3 níveis:

Iniciantes (níveis 0 e 1), Aprendizes (nível 2) e Líderes (níveis 3, 4 e 5).

Após aplicação do modelo de maturidade nas empresas no ano de 2015, observou-se que as empresas de engenharia mecânica na Alemanha ainda estavam no início da jornada em direção a Indústria 4.0, conforme observa-se a seguir:

Aproximadamente 75% das empresas avaliadas estão entre os níveis 0 – 1 (Iniciantes) e possuem as seguintes dificuldades apontadas:

- Falta de clareza sobre os benefícios econômicos dos conceitos da Indústria 4.0 (77%)
- Falta de mão de obra qualificada (72%)
- Uma certa hesitação e falta de clareza sobre Indústria 4.0 (56%)
- Falta de mercado para os conceitos de Indústria 4.0 (38%)
- Falta de uma cultura corporativa em relação aos conceitos de Indústria 4.0 (38%)

Aproximadamente 20% das empresas foram classificadas como sendo Aprendizes (nível 2) e apresentaram as seguintes dificuldades:

- Falta de clareza sobre os benefícios econômicos dos conceitos da Indústria 4.0 (64%)
- Uma certa hesitação e falta de clareza sobre Indústria 4.0 (49%)
- Falta de mão de obra qualificada (48%)
- Força de trabalho não aberta à digitalização (30%)
- Preocupações sobre o poder de mercado de grandes corporações (14%)

A indústrias classificadas entre os níveis 3 – 5 (Líderes) no Modelo, representam apenas 6% das empresas de engenharia mecânica da Alemanha e foram apontados os seguintes obstáculos para se tornar de fato uma organização 4.0:

- Falta de recursos financeiros para realizar investimentos em Indústria 4.0 (63%)
- Falta de normas e padrões (60%)
- Questões legais não resolvidas (47%)
- Falta de mão de obra qualificada em Indústria 4.0 (46%)
- Falta de confiança na segurança de dados (40%)
- Regulações e burocracias internas (35%)

Em seu modelo, Lichtblau (2017) considera a integração horizontal com clientes e fornecedores externos como parte da base técnica que apoia as PMEs. No entanto, as seis dimensões do modelo consideradas para um ambiente da Indústria 4.0 incluem tecnologias de manufatura avançada, digitalização, produtos inteligentes e conscientização e treinamento de funcionários, estratégias adequadas e cultura organizacional alinhada à Indústria 4.0. Porém, as PMEs dificilmente serão capazes de obter uma boa pontuação nessas dimensões, o que poderia resultar em uma estimativa incorreta de sua maturidade. Portanto, seguindo esse modelo, a maioria das PME acabará sendo classificada pelo modelo como “outsider ou não habituado” ou seja, o nível mais baixo da Indústria 4.0.

4.5 MODELO DE SCHUMACHER et al (2016)

O modelo de maturidade desenvolvido em 2016 por Andreas Schumacher (2016) é o mais citado na literatura com relação a modelos para Indústria 4.0, de acordo com a plataforma Scopus. Posteriormente em 2018 ele foi aprimorado, juntamente com o Prof. Wilfried Sihm e Tanja Nemeth da Universidade de Tecnologia de Vienna (TU Wien) em parceria com o Instituto Fraunhofer da Áustria (Schumacher, 2018), apresentando um roteiro ou framework para a Indústria 4.0 com oito dimensões e 65 itens de avaliação da maturidade para Indústria 4.0, conforme Quadro 6, e ainda quatro níveis de classificação.

Quadro 6. Dimensões e sub-áreas do modelo de Schumacher

Dimensão	Itens de avaliação
Tecnologia	Tecnologia para troca de informação
	Utilização de tecnologia em nuvem
	Dispositivos mobile no chão de fábrica
	Armazenamento descentralizado de informações
	Sensores para coleta de dados
	Máquinas com computadores integrados
	Ferramentas com computadores integrados
	Manufatura Aditiva
	Utilização de robôs
Produtos	Individualização de produtos
	Produtos com características flexíveis
	Produtos com coleta de informações
	Produtos com componentes de processamento de dados
	Conexão de produtos via internet
	Compatibilidade e interoperabilidade digital
	Produtos com serviços de TIC relacionados
Clientes e Parceiros	Abertura a novas tecnologias
	Habilidades com TIC avançados
	Contatos com clientes digitalizados
	Desenvolvimento de produtos integrado com clientes
	Utilização de dados relacionados aos clientes
	TI apoiando o desenvolvimento de produtos
	Contato com as empresas parceiras de forma digital

	Nível de digitalização de empresas parceiras
Processos para criação de valor	Automação de processos de criação de valor
	Parque de máquinas autônomas
	Troca de informações entre máquinas
	Parque de máquinas controlado remotamente
	Controle de qualidade automatizado
	Manutenção de máquinas baseada em dados (preditiva)
	Manipulação de objetos de automação
	Colaboração entre humanos e robôs (cobot)
Dados e Informação	Processos de informação digital
	Coleta de dados automática
	Análise de dados coletados
	Tomada de decisão baseada em dados
	Fornecimento automatizado de informações
	Individualização das informações fornecidas
	Visualização digital de processos
	Simulação via software de cenários futuros baseados em dados
Padrões Corporativos	Monitoramento de realizações da Indústria 4.0
	Padrões de tecnologia
	Recrutamento e seleção para Indústria 4.0
	Ajustes na organização do trabalho
	Treinamento de funcionários para competências digitais
	Proteção legal de produtos e serviços digitais
	Aumento na segurança cibernética
	Normas para funcionários em um meio de trabalho digital
Funcionários	Abertura a novas tecnologias
	Habilidades com tecnologias da informação e comunicação atuais
	Consciência sobre dados a todos funcionários
	Consciência sobre segurança cibernética a todos funcionários
	Boa vontade para flexibilizar arranjos de trabalho
	Autonomia dos trabalhadores no chão-de-fábrica
	Experiência com trabalho interdisciplinar
	Boa vontade em treinamento constante no trabalho
	Conhecimento sobre competências dos funcionários
Estratégia e Liderança	Roteiro (roadmap) para realização da Indústria 4.0
	Coordenação central das atividades da indústria 4.0
	Recursos financeiros para realizar a Indústria 4.0

	Comunicação de atividades da Indústria 4.0
	Objetivos dos funcionários em realizar a Indústria 4.0
	Avaliação de risco para Indústria 4.0
	Boa vontade dos gestores em realizar a Indústria 4.0
	Treinamento de gestores para Indústria 4.0

Cada um dos 65 itens de avaliação é representado por questões consistindo de um exemplo descrevendo uma situação de rotina e quatro possibilidades de respostas, uma para cada nível de maturidade. Como exemplo o autor apresenta a questão relacionada ao item 2.7, da dimensão Produtos/Produtos com serviços de TIC relacionados, conforme ilustrado no Quadro 7:

<p>Descrição: Oferecer serviços de TI relacionados aos produtos físicos para gerar receita adicional por meio de serviços digitais. (por exemplo, monitoramento remoto do status do produto nos clientes, possibilidade de atualizações de software ou consultoria operacional).</p>
<p>Nível 1: Não oferece serviços de TI relacionados a produtos físicos. Nível 2: Pequena oferta de serviços de TI relacionados a produtos físicos. Nível 3: Oferece uma ampla gama de serviços de TI relacionados a produtos físicos. Nível 4: Os serviços de TI relacionados a produtos físicos formam a maioria de todas as receitas.</p>

Quadro 7. Exemplo de questão presente no Modelo de Schumacher de 2016.

Caso o respondente selecione os itens 3 ou 4 em qualquer questão, é solicitado que seja feita uma breve descrição ou exemplos de casos na empresa, de forma a aumentar a precisão e confiabilidade da avaliação. O modelo foi aplicado em empresas de manufatura na Áustria, Alemanha, Eslováquia, Hungria, China e Índia.

O modelo de maturidade de Schumacher, como o autor sugere, deve ser utilizado preferencialmente em PME que pretendem adotar tecnologias da Indústria 4.0 além de uma maior digitalização e automação em seus processos. Porém, como o próprio autor também aponta, as estratégias de PME frequentemente dependem de seus líderes, de seu entendimento do tema e da vontade de implantar mudanças na empresa.

Por fim, modelo utiliza uma equação com o objetivo de calcular a maturidade em uma empresa, em que cada dimensão é aplicado um peso específico, sendo esses pesos independentes da empresa a ser avaliada, o que pode gerar incompatibilidades ao se comparar empresas com tamanhos ou setores diferentes. O modelo abrange um grande conjunto de habilitadores para a indústria 4.0, porém falta uma visão de processo que conecte toda a cadeia de suprimentos para um produto específico.

CAPÍTULO 5 ESTUDO DE CASO –

ENTREVISTA COM PROFISSIONAIS DA INDÚSTRIA

De acordo com Gil (1999), existem diversas fontes de evidência a partir das quais o investigador pode coletar informações para sua pesquisa, entre elas pode ser citadas:

- Entrevistas: uma das mais importantes fontes de informações, podendo ser estruturada (roteiro previamente estabelecido) ou semi-estruturada (roteiro flexível, permitindo explorar mais amplamente algumas questões), onde as informações são obtidas de um entrevistado;
- Questionário: constituído de uma série ordenada de perguntas, que devem ser respondidas por escrito pelo informante. Pode ser elaborado com questões abertas, fechadas ou de múltiplas escolhas.

Com o intuito de se ter uma visão de como indústrias no Brasil se comportam diante da Indústria 4.0 e das formas de avaliação de sua maturidade, durante o mês de março de 2020 foram realizadas entrevistas por videoconferência com profissionais responsáveis por desenvolver e coordenar políticas de manufatura avançada em suas organizações, ocupando posições técnicas em suas empresas como Engenheiros de Automação e de Produção.

Com o intuito de saber como a empresa vem lidando com a implantação de tecnologias habilitadoras para Indústria 4.0, mudanças organizacionais e novos processos, em primeiro lugar foi elaborado um roteiro de entrevista com aplicação de 10 perguntas do tipo dicotômicas e descritivas, disponível no Apêndice A, porém possuindo flexibilidade para abordar outras questões de acordo com o andamento da entrevista.

Posteriormente partiu-se para a seleção das empresas, tendo sido escolhidas aquelas que atuam com processos de manufatura em suas plantas, de setores, portes e localização geográfica diversa. E por fim, a entrevista se deu com profissionais que atuam diretamente com o desafio de realizar a transformação digital nas companhias, tendo posições gerenciais ligadas à engenharia e novos processos.

A primeira empresa, denominada no texto de *Empresa A*, possui cerca de 2.100 colaboradores, no qual um de seus segmentos atua na produção, comercialização e distribuição de bebidas em geral, carbonatados e não-carbonatados. Apesar de localizada no Distrito Federal, seu raio de atuação inclui também a região sudeste e nordeste do Goiás, parte de Minas Gerais e Tocantins.

A segunda empresa, denominada de *Empresa B*, é uma multinacional que desenvolve e manufatura equipamentos para indústrias de automação e controle, em especial usinas de açúcar e etanol, classificando-se como OEM (Original Equipment Manufacturer). Ela possui um grande portfólio de produtos, fato justificado pela necessidade de atender a requisitos específicos de cada cliente. Além da manufatura de peças, atua também na manutenção completa de fábricas, otimização, modernização e reconstrução de equipamentos.

A unidade entrevistada se localiza no estado de Santa Catarina, possui 350 funcionários e é voltada para a produção de equipamentos e serviços para separação sólido-líquido em diversos setores industriais.

A última empresa selecionada para o estudo, denominada aqui de *Empresa C*, é uma multinacional que atua no setor de produção cervejeira e de não alcoólicos, com um portfólio de mais de 300 marcas de bebidas internacionais, regionais e locais, empregando aproximadamente 80.000 pessoas em suas plantas distribuídas em mais de 70 países.

No Brasil, a *Empresa C* possui 15 unidades distribuídas pelo país, sendo que a unidade pesquisada se localiza no estado do Ceará e possui cerca de 100 colaboradores.

A preparação das empresas para a Quarta Revolução Industrial

Com relação à posição das empresas para com a Indústria 4.0, se se consideram preparadas, ambas três empresas entrevistadas declararam estar preparadas em partes para os desafios da Quarta Revolução Industrial.

A *Empresa A* afirma que está investindo constantemente em novas tecnologias e possui planos de ação tendo em vista a Indústria 4.0, porém focados, por enquanto, somente na área industrial e de produção.

Com relação à sua estrutura organizacional, a *Empresa A* pode ser distribuída nos seguintes setores: Produção, Logística, Comercial, Financeiro e Administrativo, sendo que, segundo o gestor entrevistado, a área Comercial é a que apresenta as maiores dificuldades com relação à implantação de tecnologias da Indústria 4.0 por ainda utilizar ferramentas pouco inteligentes e integradas como por exemplo planilhas.

A *Empresa B* reconhece a importância da Indústria 4.0 para se posicionar perante a concorrência no mercado. Afirma que já realizou estudos de viabilidade para adequar seu maquinário para a Indústria 4.0 e investe capital para embarcar tecnologia nos equipamentos, tornando-os compatíveis para integração e compartilhamento de dados. Porém ainda encontra

dificuldades em implementar conceitos em sua fábrica, tendo em vista os custos em adaptar a infraestrutura.

A *Empresa B* possui como estrutura os seguintes setores: Engenharia e Automação, Comprar/Vendas, Montagem, Administrativo e Financeiro, PCP e, Logística e segundo o entrevistado, o setor de PCP (Planejamento e Controle da Produção) é o que necessita de maior atenção para o desenvolvimento da Indústria 4.0. O setor atua como uma interface entre as liberações da engenharia e da logística, concentrando grande quantidade de informações sobre a produção, sendo, entretanto, tratados com auxílio de planilhas sem outras ferramentas de análise de dados.

A *Empresa C* declara que alguns de seus setores, que atuam constantemente com processos mais automatizados estão mais avançados e no caminho para implantação de novas tecnologias, porém em outros, os processos ainda são antiquados.

Possui como setores em sua estrutura organizacional: Produção, Qualidade, Logística e Administrativo, sendo que a área Administrativa, segundo o entrevistado, ainda possui poucos processos integrados com o restante da empresa. Seria um setor no qual uma maior digitalização e eficiência no aproveitamento dos dados poderia trazer grandes benefícios para a companhia.

Conhecimento sobre Modelos de Maturidade nas empresas

Quando questionados se já tiveram contato ou se já ouviram falar sobre modelos que avaliam a maturidade de empresas com relação à Indústria 4.0, somente o entrevistado da *Empresa B* afirma que já leu a respeito do assunto e que já respondeu um questionário de maturidade disponibilizado online pelo SENAI.

O modelo de maturidade apresentado pelo SENAI é baseado no modelo da Academia Alemã de Ciência e Engenharia, a Acatech, apresentado nesta pesquisa na Seção 4.1 (SCHUH, 2017).

Nesse contexto, foi realizada uma breve explanação aos entrevistados sobre a utilização dos modelos de maturidade para Indústria 4.0, seus objetivos e principais pontos de ação, com a apresentação de dois modelos presentes na literatura (SCHUH, 2017 E AGCA, 2017).

Após apresentados os conceitos sobre os modelos de maturidade, foi questionado aos entrevistados se eles consideravam que tais modelos são apropriados para uma aplicação assertiva de tecnologias da Indústria 4.0. Ambos concordaram que os modelos são válidos e

que podem agregar bastante para as empresas, possibilitando que se antecipem e tomem ações estratégicas em tempo menor.

Além disso, segundo os entrevistados, quando não se tem um controle, não é possível saber em que ponto a empresa se encontra em relação à Indústria 4.0. A organização pode pensar que está em um nível alto, porém pode se enganar. Tais modelos possuem papel importante no que se refere ao identificar pontos críticos da empresa, sabendo em quais setores da empresa é necessário priorizar o investimento.

Melhor forma de aplicar os Modelos de Maturidade nas empresas

Ao analisar os modelos de maturidade da Tabela 2, observa-se que, aqueles que tiveram aplicação em campo, se baseiam na utilização de questionários online às empresas com questões avaliando cada item de suas dimensões em seus respectivos modelos, buscando-se, através das respostas, representar a realidade atual da organização.

As respostas a um questionário podem ser classificadas como sendo do tipo dicotômica com duas respostas possíveis, sim ou não; do tipo de escala de Likert, quando o respondente mostra o quanto ele concorda ou discorda diante de uma atitude ou ação, geralmente utilizando uma escala de 1 a 5 ou 0 a 10; do tipo de múltipla escolha situacional, no qual é apresentada uma situação hipotética e suas possíveis reações e do tipo aberta na qual o respondente possui liberdade para apresentar sua resposta.

Em relação ao número de questões, não existe um valor padrão na literatura, podendo ser até 40 questões como os modelos de Leyh (2016), Agca (2017) e Canetta (2018), entre 40 e 100 questões como Schumacher (2016), ou questionários com mais de 100 questões, como os modelos de De Carolis (2017) e Schuh (2017). Nesse contexto, foi indagado aos entrevistados qual seria a opinião das empresas sobre a aplicação de tais questionários de maturidade.

Segundo o entrevistado da *Empresa A*, ele se sentiria mais a vontade em realizar a avaliação de maturidade por meio de entrevista, pois, segundo o profissional, o formato de questionário online pode apresentar alguma análise da empresa de forma equivocada, comprometendo a qualidade da informação.

A *Empresa B* afirma que seria interessante em um primeiro momento um questionário prévio, com questões básicas sobre a empresa, permitindo uma visão preliminar sobre a organização para o avaliador, e posteriormente uma entrevista, possibilitando que sejam discutidos pontos mais complexos que um questionário não permite.

Na visão da *Empresa C*, um questionário seria mais viável para abordar pontos mais superficiais da empresa e para que o avaliador tenha uma visão básica dos pontos-chaves e tecnologias utilizadas pela empresa. Já outras questões, que abordem processos mais complexos da companhia e análises mais aprofundadas, o formato de entrevista se aplicaria mais eficazmente.

Considerando o posicionamento das empresas, foi questionado qual seria o tempo ideal para realização de uma entrevista que visa avaliar a maturidade de uma organização. A *Empresa A* e a *Empresa C* afirmaram que em torno de 1 hora seria suficiente para poder ter uma visão dos pontos importantes da empresa e compreender os processos da companhia, porém outras entrevistas podem ser realizadas.

Segundo a *Empresa B*, o tempo de 1 hora e meia de entrevista seria razoável, pois o avaliador precisa conhecer bem as particularidades de cada organização.

Os Modelos de Maturidade e as Pequenas e Médias Empresas

Das três empresas entrevistadas, duas podem ser classificadas como Pequenas e Médias Empresas (PME), a *Empresa B* e a *Empresa C*. Já a *Empresa A* estaria posicionada como Grande Empresa, considerando o número de funcionários.

A Lei Complementar nº 123/2006, que instituiu o Estatuto Nacional da Microempresa e da Empresa de Pequeno Porte (EPPs), classifica uma pequena empresa como sendo aquela que possui uma receita bruta anual superior a R\$ 360 mil e inferior a R\$ 4,8 milhões e número de funcionários entre 20 e 99 pessoas.

Já segundo o BNDES (2020), uma empresa de porte médio seria aquela com número de funcionários entre 100 e 499 pessoas e faturamento maior que R\$ 4,8 milhões e menor ou igual a R\$ 300 milhões. Na Europa, define-se uma PME como sendo uma empresa com menos de 250 funcionários e um faturamento anual menor que 50 milhões de Euros (EUROPEAN UNION COMMISSION, 2003).

Em se tratando do porte das empresas, os desafios em relação à adoção de conceitos e implantação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 são ainda maiores quando se tratam de pequenas e médias empresas (VELTHUIJSEN, 2018). Nesse sentido, ainda são poucos os autores que abordam especificamente como Pequenas e Médias Empresas (PMEs) vêm lidando com o tema (Mittal, 2018; Junior, 2018).

Mittal (2018), após analisar 15 modelos de maturidade para Indústria 4.0 disponíveis na literatura, observou que existe um ponto de atenção relacionado a necessidade de

diferenciação no nível inicial dos modelos entre SME e empresas de grande porte, ou multinacionais, ou seja, a criação de um nível 0, no qual a empresa ainda não possui uma infraestrutura básica e recursos financeiros e humanos para se iniciar uma jornada em direção a Indústria 4.0, diferente da capacidade de uma empresa de grande porte, no qual o salto do nível 0 para o nível 1 se dá de forma mais natural ou facilitada.

Schumacher (2016) identificou, após entrevistas com profissionais da indústria de diferentes portes, três problemas ao colocar em prática os conceitos relacionados a Indústria 4.0.

- As empresas consideram complexos os conceitos da Indústria 4.0, no qual não há uma orientação estratégica;
- As empresas não possuem uma ideia clara sobre a Indústria 4.0, o que resulta em incertezas em relação aos benefícios e seus resultados;
- As empresas não conseguem avaliar suas próprias capacidades na Indústria 4.0, impedindo a tomada de medidas coordenadas.

As empresas entrevistadas neste estudo, apesar do tempo transcorrido da pesquisa de Schumacher, ainda possuem as características apontadas pelo pesquisador. Observa-se uma incerteza sobre os benefícios e a capacidade de retorno dos investimentos e adaptações necessárias em suas plantas para que possuam características de uma Indústria 4.0. Outro ponto é a falta de critérios analíticos sobre onde devem ser realizados os investimentos na empresa, sendo privilegiado, na maior parte, os setores que tratam diretamente com a produção e manufatura.

Característica semelhante foi levantada pelo Ministério da Economia e Energia da Alemanha, que identificou como um dos principais obstáculos à introdução da Indústria 4.0, a falta de uma clara visão quanto às vantagens e benefícios de se implantar seus conceitos, especialmente entre as Pequenas e Médias Empresas (PMEs) (SCHUH, 2017).

Segundo Mittal (2018), apesar da quantidade representativa de modelos de maturidade para Indústria 4.0 existentes na literatura, estes não apresentam uma perspectiva voltada para pequenas e médias empresas. As dimensões e níveis de maturidade, que se adaptam bem para grandes empresas, necessitam ser adaptados para PMEs, refletindo as características destas empresas.

Leyh (2017) aponta que grande parte das PMEs ainda subestimam as possibilidades e oportunidades da digitalização, ao mesmo tempo que superestimam o próprio uso de tecnologias da informação e computação e seu próprio nível de digitalização. Em Leyh

(2016), o autor desenvolve um modelo de maturidade que possibilita uma empresa classificar seu sistema de TI com foco nos requisitos da Indústria 4.0.

Um dos maiores desafios para PMEs com foco em manufatura é identificar aplicações para Indústria 4.0 em seus processos e iniciar ações visando implantar soluções digitais (Kolla, 2019)

O modelo da Acatech (SCHUH, 2017), apesar de não ter sido desenvolvido com foco em PMEs, apresenta como validação sua aplicação em uma empresa de médio porte especializada na manufatura de componentes industriais de comunicação, localizada na Alemanha.

Dentre os modelos descritos neste estudo, apresentados na Tabela 2, somente Ganzarain (2016) considera diretamente uma perspectiva de PME's. Os autores sugerem um modelo de maturidade de três estágios em direção a Indústria 4.0, que são: imaginar, habilitar e executar. O modelo possui ainda 5 níveis de maturidade para cada estágio, com um objetivo final de auxiliar a identificar oportunidades para diversificação de negócios em um contexto de Indústria 4.0 para empresas de pequeno e médio porte.

Sjödín (2018) apresenta um estudo de modelo de maturidade voltado para implantação de conceitos de fábricas inteligentes, baseado em três princípios: introduzir processos ágeis, configurar tecnologias modulares e cultivar uma cultura digital entre as pessoas. O modelo foi construído por meio de estudos de casos envolvendo cinco fábricas automotivas classificadas como de grande porte, com número de funcionários entre 1100 e 3000 pessoas.

De Carolis (2017) aponta que apesar de alguns modelos permitirem que as empresas avaliem sua própria maturidade em relação a Indústria 4.0, eles não fornecem um "guia" estruturado sobre como encontrar o processo de transformação digital com base em seu nível atual, ou seja, como avançar na maturidade, seja em PME ou em grandes empresas.

Segundo os entrevistados, existe um desequilíbrio de investimento nas empresas, sendo privilegiados os setores que estão diretamente relacionados à produção, ou seja, aqueles com maiores ativos tecnológicos. Porém, como demonstrado nos modelos de maturidade presentes neste estudo, todos os setores devem receber atenção e ser tratados como importantes para a transformação digital, seja ele administrativo, financeiro ou de produção.

Além disso, como apontado por Schumacher (2016) e Schuh (2017), as empresas afirmaram que o retorno dos altos investimentos a serem realizados ainda não são claros. Com isso, existe uma certa insegurança em quais investimentos e adaptações devem ser

realizados. Nesse contexto os modelos de maturidade surgem como um facilitador, possibilitando que toda a empresa possa ser mapeada e suas limitações, pontos fracos e fortes identificados.

Porém, como também apontado por Schumacher (2016) e Kolla (2019), a avaliação de maturidade para Indústria 4.0 necessita do apoio de especialistas, não somente para identificar o nível no qual a empresa se encontra, mas para apontar e sugerir caminhos para que esta maturidade possa evoluir em direção à um nível ótimo.

Capítulo 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Proposta de Modelo, desenvolvido em parceria UnB/WZL RWTH Aachen (2019)

Por meio de uma parceria entre pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Inovação, Projetos e Processo da UnB (GPIPP) e do Laboratório de Máquinas-Ferramentas da Universidade de Aachen (WZL RWTH/Aachen), no ano de 2019 foi proposto um modelo de maturidade, a partir de uma pesquisa bibliométrica realizada nas bases de periódicos Scopus e Web of Science, com relação aos modelos de maturidade para Indústria 4.0 (SILVA et al, 2019).

Considerando os modelos de maturidade analisados, de acordo com a Tabela 2, e suas respectivas dimensões, duas dimensões podem ser identificadas e simplificadas, caracterizadas aqui por Facilitadores e Tecnologias, conforme Quadro 8.

Quadro 8. Dimensões Facilitadores e Tecnologias a partir dos modelos de maturidade

Facilitadores	Fonte	Tecnologias	Fonte
Estratégia e Organização	Lichtblau, 2015	Tecnologias	Schumacher, 2016
Estratégia, Liderança, Cultura	Schumacher, 2016	Desenvolvimento Digital, Cruzamento de tecnologias	Leyh, 2016
Organização e Cultura	Geissbauer, 2016	Análise de Dados, Infraestrutura de TI ágil	Geissbauer, 2016
Processos e Organização	De Carolis, 2017	Controle e Monitoramento, Tecnologia	De Carolis, 2017
Alinhamento Organizacional	Gokalp, 2017	Sistemas de Informação	Schuh, 2017
Cultura, Estrutura Organizacional	Schuh, 2017	Produtos e Serviços, Tecnologia	Canetta, 2018

Estratégia, Processos, Recursos Humanos	Canetta, 2018	Tecnologias	Sjodin, 2018
---	---------------	-------------	--------------

Facilitadores pode ser definido como aspectos gerais que permitem uma organização se tornar digitalmente integrada, em direção a um ambiente de Indústria 4.0.

Considerando os conceitos do CMM, grande parte das empresas falham em suas abordagens de Indústria 4.0, pois apesar de possuírem o desenvolvimento necessário nas dimensões de Facilitadores Organizacionais e Tecnológicos, ainda falta maturidade em seus processos.

Baseando-se no modelo CMMI, a terceira dimensão chamada de Maturidade engloba variáveis necessárias para uma melhoria contínua em processos organizacionais.

O Quadro 9 apresenta as dimensões e as respectivas variáveis do modelo em desenvolvimento.

Quadro 9. Dimensões e respectivas variáveis do modelo *Industry 4.0 Readiness*

Dimensão	Variáveis
Facilitadores Organizacionais	Cultura Organizacional
	Modelo de Negócio
	Recursos Humanos
Facilitadores Tecnológicos	Interconexão
	Transparência das informações
	Decisões Descentralizadas
	Assistência técnica
	Produção baseada em rede
Maturidade	Desenvolvimento de produtos e serviços
	Produção

	Logística
	Marketing e Vendas

Nesse contexto, com base nesses dois tipos de habilitadores, pensou-se um modelo tridimensional em que os dois habilitadores seriam avaliados, juntamente com uma terceira dimensão denominada de maturidade, e que permitiria avaliar a prontidão de uma empresa para incorporar tecnologias e modelos de negócio alinhados com o conceito de indústria 4.0.

Esse modelo está proposto em SILVA et al. (2019). A presente proposição de modelo avança no sentido de levantar requisitos de empresas brasileiras sobre o uso de modelos que permitam sistematizar a implantação da indústria 4.0.

O modelo foi desenvolvido com uma forma tridimensional, com 4 níveis de prontidão, conforme representado na Figura 12.

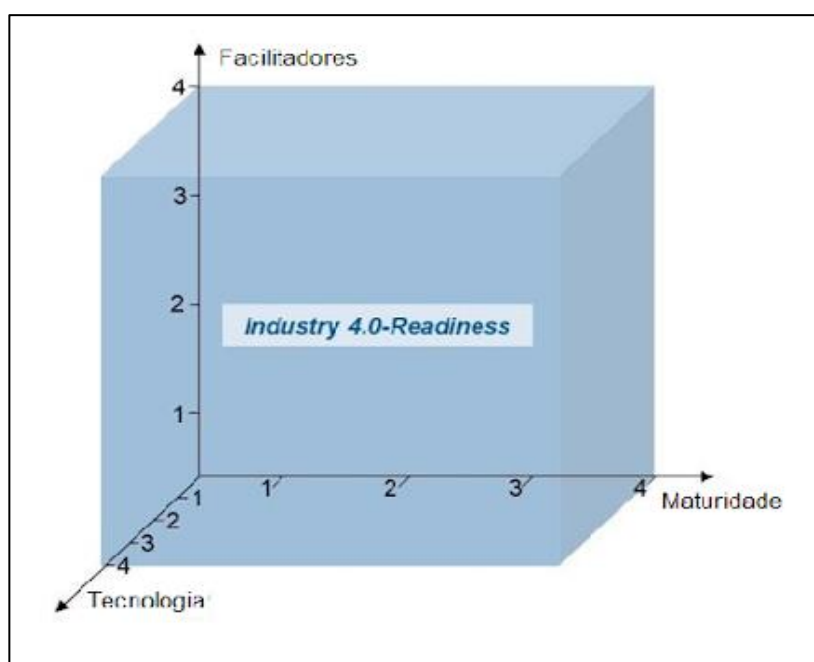


Figura 12. Modelo em forma de cubo do Industry 4.0 Readiness

Como trabalho futuro, pretende-se aperfeiçoar a elaboração deste modelo de maturidade para Indústria 4.0 considerando as especificidades da produção industrial no Brasil e Alemanha, além de poder aplicá-lo *in loco* por meio de entrevistas com gestores.

Conclusões

O presente trabalho visou descrever inicialmente os principais avanços tecnológicos que fizeram que com que alcançássemos a Quarta Revolução Industrial, além de alguns conceitos que englobam a Indústria 4.0.

Dentro da necessidade de se avaliar o quão preparadas as organizações estão para enfrentar a nova onda tecnológica chamada Indústria 4.0, diversos pesquisadores e instituições públicas e privadas iniciaram o desenvolvimento de Modelos de Maturidade, Capabilidade e de Prontidão.

Diante desse novo conceito, foi realizada uma pesquisa bibliométrica englobando os termos relacionados à Indústria 4.0 e Modelos de Maturidade nas bases de periódicos Web of Science e Scopus, tendo sido observado o número crescente de pesquisas nos últimos 5 anos sobre este tema, saindo de 216 publicações no ano de 2014 para um total de 3310 em 2019.

A partir dos dados coletados, iniciou-se uma análise dos principais modelos, apresentados aqui pelo Modelo de Maturidade da Acatech, Modelo de Maturidade baseado no CMMI de Anna de Carolis do Politecnico de Milão, Modelo da Universidade de Warwick, Modelo IMPULS e Modelo de Maturidade de Schumacher. Com as informações obtidas dos modelos descritos, um Modelo de Prontidão com 3 dimensões e 12 sub áreas foi elaborado em parceria com a Universidade de Aachen.

Ao final foram realizadas entrevistas com profissionais da indústria com o objetivo de se ter uma percepção dos tomadores de decisão de empresas com relação à Indústria 4.0 em suas organizações e a forma de aplicação de tais Modelos de Maturidade.

Apesar das três empresas entrevistadas possuírem, em diferentes níveis de atuação, projetos voltados para Indústria 4.0, na avaliação dos entrevistados, os setores que atuam diretamente com a produção, por terem mais equipamentos industriais e processos automatizados, estariam mais preparados para receber os conceitos e ferramentas da Indústria 4.0 como IoT, realidade aumentada e Sistemas Ciber Físicos. Porém, observa-se um certo desequilíbrio em relação de investimentos tecnológicos, com os demais setores geralmente ficando defasados, necessitando de maior atenção no que se refere a conceitos da quarta revolução industrial.

A falta de clareza para os gestores no que se refere aos reais benefícios em torno da Indústria 4.0, o retorno dos altos investimentos a serem realizados e adaptações a serem implementadas na empresa, principalmente para Pequenas e Médias Empresas, se tornam um

ponto de hesitação no momento de colocar em prática estudos e planos que envolvem conceitos de transformação digital.

Outro ponto observado é que, o modelo de avaliação por questionário online não é atrativo, podendo inclusive apresentar respostas que não representam a realidade, ambos concordaram que seria interessante o envio de um questionário prévio com questões básicas da empresa para que o avaliador possa conhecer como alguns pontos da empresa funcionam e posteriormente uma avaliação presencial, com duração entre 1 hora e 1 hora e meia, permitindo, assim, ter uma maior fidelidade às informações.

Por fim, todos entrevistados concordam que os Modelos de Maturidade possuem grande potencial de auxiliar os gestores a tomar as melhores decisões no momento de investir em novas tecnologias de forma a manterem as empresas inovadoras em um mercado cada vez mais competitivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEMOGLU, Daron; RESTREPO, Pascual. **Artificial intelligence, automation and work**. National Bureau of Economic Research, 2018.

ANDREONI, Antonio; CHANG, Ha-Joon. Industrial policy and the future of manufacturing. **Economia e Politica Industriale**, v. 43, n. 4, p. 491-502, 2016.

AGCA, O. et al. An Industry 4 readiness assessment tool. WMG International Institute for Product and Service Innovation University of Warwick. 2018.

ARCHAMBAULT, Éric et al. Comparing bibliometric statistics obtained from the Web of Science and Scopus. **Journal of the American society for information science and technology**, v. 60, n. 7, p. 1320-1326, 2009.

ASHTON, Kevin et al. That ‘internet of things’ thing. **RFID journal**, v. 22, n. 7, p. 97-114, 2009.

ASHTON, Thomas Southcliffe et al. The industrial revolution 1760-1830. Oxford; New York: Oxford University Press, **OUP Catalogue**, 1997.

BAJD, Tadej et al. **Robotics**. Springer Science & Business Media, 2010.

BAKER, Nick. ZigBee and Bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications. **Computing and Control Engineering**, v. 16, n. 2, p. 20-25, 2005.

BALLARD, L., Sabanovic, S., Kaur, J., & Milojevic, S. *George Charles Devol, Jr. [History]*. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, 19(3), 114–119, 2012.

BARAN, Paul A.; HOBBSAWM, Eric J. The stages of economic growth. **Kyklos**, v. 14, n. 2, p. 234-242, 1961.

BARBALHO, Sanderson C. M.; DANTAS, Rafaela F. The effects of islands of improvement on the maturity models for industry 4.0: the implementation of an inventory management system in a beverage factory. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, (In press).

BNDES. Classificação de porte dos clientes. Disponível em: <
<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/porte-de-empresa> >.
Acesso em: 05 set. 2020.

BMBF. Research and Innovation that benefit the people. **The High-Tech Strategy 2025**. Federal Ministry of Education and Research. Alemanha, 2018

CANETTA, Luca; BARNI, Andrea; MONTINI, Elias. Development of a Digitalization Maturity Model for the manufacturing sector. In: **2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)**. IEEE, 2018. p. 1-7.

COYLE, Karen. Mass digitization of books. **The Journal of Academic Librarianship**, v. 32, n. 6, p. 641-645, 2006.

CHRISSIS, Mary Beth; KONRAD, Mike; SHRUM, Sandra. **CMMI for development: guidelines for process integration and product improvement**. Pearson Education, 2011.

CROSBY, Philip B. “The quality management maturity grid”, **Quality is free: The art of making quality certain**. New York: McGraw-hill, 1979.

DANE, Francis C. **Research methods**. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing Company, 1990.

DAUDT, Gabriel Marino; WILLCOX, Luiz Daniel. Reflexões críticas a partir das experiências dos Estados Unidos e da Alemanha em manufatura avançada. *BNDES Setorial*, n. 44, p. 5–45, 2016.

DAVIES, Ron. Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. **European Parliamentary Research Service**, v. 10, 2015.

DE CAROLIS, Anna et al. A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. In: **IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. Springer, Cham, 2017. p. 13-20.

DE MAURO, Andrea; GRECO, Marco; GRIMALDI, Michele. A formal definition of Big Data based on its essential features. **Library Review**, p. 122-135, 2016.

DORLING, A.; SIMMS, P. Study Report: The Need and Requirements for a Software Process Assessment Standard. ISO/IEC JTC1/SC7/WG7/WG7/SG1 N944R Issue 2.0. **Technical report**, Cranfield IT Institute and UK Ministry of Defence, 1992.

DUSTDAR, Schahram; NASTIĆ, Stefan; ŠĆEKIĆ, Ognjen. Smart Cities. In: *The Internet of Things, People and Systems*. Springer, 2017

DUTTA, Soumitra et al. CREATING THE FUTURE HEALTHY OF MEDICAL LIVES—-INNOVATION. **Global Innovation Index 2019: Creating Healthy Lives—The Future of Medical Innovation**, Cornell University, p. 201941, 2019.

EISENHARDT, Kathleen M. Building theories from case study research. **Academy of management review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

ESPECIAL, SONDAGEM. Indústria 4.0. **Revista da Confederação Nacional Da Indústria. Brasília: Ed**, v. 66, 2016.

EVANS, Dave. The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. **CISCO white paper**, v. 1, n. 2011, p. 1-11, 2011.

EUROPEAN UNION COMMISSION et al. Commission recommendation of 6 May 2003 concerning the definition of micro, small and medium-sized enterprises. **Official Journal of the European Union**, v. 46, n. L124, p. 36-41, 2003.

FARAHANI, Shahin. **ZigBee wireless networks and transceivers**. Newnes, 2011.

FRIEDLAENDER, Heinrich E.; OSER, Jacob. Economic history of modern Europe. New York, Prentice Hall, 1953.

GALLI, Stefania. **Towards a New Technological Paradigm Based on Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Innovation Policies**. 2018. Tese de Doutorado. University of Trento.

GANZARAIN, Jaione; ERRASTI, Nekane. Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. **Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)**, v. 9, n. 5, p. 1119-1128, 2016.

GARFINKEL, Simon; ROSENBERG, Beth. 'Understanding RFID technology', **RFID: Applications, security, and privacy**. Pearson Education India, p. 15-36, 2006.

GASPARETTO, A.; SCALERA, L. From the Unimate to the Delta robot: the early decades of Industrial Robotics. In: **Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms**. Springer, Cham, 2019. p. 284-295.

GEISSBAUER, Reinhard; VEDSO, Jesper; SCHRAUF, Stefan. **Industry 4.0: Building the digital enterprise**. 2016.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GILL, Khusvinder et al. A zigbee-based home automation system. **IEEE Transactions on consumer Electronics**, v. 55, n. 2, p. 422-430, 2009.

GRIEVES, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, v. 1, p. 1-7, 2014.

GÖKALP, Ebru; ŞENER, Umut; EREN, P. Erhan. Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-MM. In: **International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination**. Springer, Cham, 2017. p. 128-142.

HARRINGTON, Joseph. **Computer integrated manufacturing**. RE Krieger Publishing Company, 1979.

HOZDIĆ, Elvis. Smart factory for industry 4.0: A review. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, v. 7, n. 1, p. 28-35, 2015.

ISO 10218-1:2011: Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots

ISO 16290:2013 Space Systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment.

ISO/TS 15066:2016: Robots and Robotic Devices — Collaborative Robots

ISO/IEC JTC1/SC7, The Need and Requirements for a Software Process Assessment Standard, Study Report, Issue 2.0, JTC1/SC7 N944R, 11 June 1992

JAZDI, Nasser. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In: **2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics**. IEEE, 2014. p. 1-4.

JIANKANG, Wang et al. Knowledge management maturity models: A systemic comparison. In: **2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering**. IEEE, 2011. p. 606-609.

JUNIOR, Liborio De Oliveira; OLIVEIRA, G. A. ; TRENTIN, M. G. ; CHUNG, L. ; TAN, K. H. . Maturity Models for Industry 4.0 in Developing Countries: A Conceptual Framework Focusing on the Animal Feed Industry. In: **Twentieth International Working Seminar on Production Economics**, Innsbruck. 2018.

KAGERMANN, Henning et al. (Ed.). **Industrie 4.0 in a Global Context: strategies for cooperating with international partners**. Acatech study, Herbert Utz Verlag, 2016.

KOHLEGGER, Michael; MAIER, Ronald; THALMANN, Stefan. **Understanding maturity models. Results of a structured content analysis**. Proceedings of I-KNOW '09 and I-SEMANTICS '09, 2009.

KOLLA, Sri; MINUFEKR, Meysam; PLAPPER, Peter. Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. **Procedia Cirp**, v. 81, p. 753-758, 2019.

KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. 11ª Ed. Editora Perspectiva SA, 2011.

LANDES, David S. **The unbound Prometheus: technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present**. Cambridge University Press, 2003.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.

LEMSTRA, Wolter; HAYES, Vic. Unlicensed innovation: The case of Wi-Fi. **Competition and Regulation in Network Industries**, v. 9, n. 2, p. 135-171, 2008.

LEYH, Christian et al. SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. In: **2016 federated conference on computer science and information systems (fedcsis)**. IEEE, 2016. p. 1297-1302.

LEYH, Christian, Bley, K., Schäffer, T., and Bay, L. The Application of the Maturity Model Simmi 4.0 in Selected Enterprises, in **Proceedings of 23rd Americas Conference on Information Systems (AMCIS 2017)**. Boston, USA: Association for Information Systems (AIS). 2017.

LICHTBLAU, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, R., Bleider, M., & Millack, A. **IMPULS, Industry 4.0 readiness**, VDMA. 2017.

LI, Ling. China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of “Made-in-China 2025” and “Industry 4.0”. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 135, p. 66-74, 2018.

LI, Qing et al. Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework. **Computers in Industry**, v. 101, p. 91-106, 2018.

MATTERN, Friedemann; FLOERKEMEIER, Christian. From the Internet of Computers to the Internet of Things. In: **From active data management to event-based systems and more**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 242-259.

MITTAL, Sameer et al. A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). **Journal of manufacturing systems**, v. 49, p. 194-214, 2018.

ONGSULEE, Pariwat. Artificial intelligence, machine learning and deep learning. In: **2017 15th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)**. IEEE, 2017. p. 1-6.

PRITCHARD, Alan et al. Statistical bibliography or bibliometrics. **Journal of documentation**, v. 25, n. 4, p. 348-349, 1969.

QI, Qinglin; TAO, Fei. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. **Ieee Access**, v. 6, p. 3585-3593, 2018.

REILLY, Kara. From Automata to Automation: The Birth of the Robot in RUR (Rossum's Universal Robots). In: **Automata and Mimesis on the Stage of Theatre History**. Palgrave Macmillan, London, 2011. p. 148-176.

ROBLA-GÓMEZ, Sandra et al. Working together: A review on safe human-robot collaboration in industrial environments. **IEEE Access**, v. 5, p. 26754-26773, 2017.

ROBOT INSTITUTE OF AMERICA. Robot Institute of America Worldwide Robotics Survey and Directory. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1982.

RUIZ, João Álvaro. Metodologia científica. **Guia para eficiência nos estudos**, v. 13, p. 131, 1996.

SADIN, Stanley R.; POVINELLI, Frederick P.; ROSEN, Robert. The NASA technology push towards future space mission systems. In: **Space and Humanity**. Pergamon, 1989. p. 73-77.

SARAVANAN, Krishnan; JULIE, E. Golden; ROBINSON, Y. Harold. Smart cities & IoT: evolution of applications, architectures & technologies, present scenarios & future dream. In: **Internet of Things and Big Data Analytics for Smart Generation**. Springer, Cham, 2019. p. 135-151.

SCHILLMOELLER, Sandra. *BMW Group Harnesses Potential of Innovative Automation and Flexible Assistance Systems in Production*. Press Release. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0268199EN/bmw-group-harnesses-potential-of-innovative-automation-and-flexible-assistance-systems-in-production>, 2017.

SCHUH, Günther et al. Industrie 4.0 maturity index. **Managing the Digital Transformation of Companies**, Acatech STUDY, Munich, 2017.

SCHUMACHER, Andreas; EROL, Selim; SIHN, Wilfried. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia Cirp**, v. 52, n. 1, p. 161-166, 2016.

SCHUMACHER, Andreas; NEMETH, Tanja; SIHN, Wilfried. Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises. **Procedia Cirp**, v. 79, p. 409-414, 2019.

SCHWAB, Klaus. *A quarta revolução industrial*. São Paulo: EDIPRO, 2016

SCHWAB, Klaus et al. *The Global Competitiveness Report*. Geneva: World Economic Forum. 2019.

SIAU, Keng; WANG, Weiyu. Building trust in artificial intelligence, machine learning, and robotics. **Cutter Business Technology Journal**, v. 31, n. 2, p. 47-53, 2018.

SILVA, Isaac A., BARBALHO; Sanderson. C. M.; ADAM, Tobias; HEINE, Ina & SCHMITT, Robert. Industry 4.0 Maturity Models: A bibliometric study of scientific articles from 2001 to 2018. **Proceedings of the 26th EurOMA Conference**, p. 1829-1838, 2019.

SJÖDIN, David R. et al. Smart Factory Implementation and Process Innovation: A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing Moving to smart factories presents specific challenges that can be addressed through a structured approach focused on people, processes, and technologies. **Research-Technology Management**, v. 61, n. 5, p. 22-31, 2018.

SHARMA, Neha; SHAMKUWAR, Madhavi; SINGH, Inderjit. The history, present and future with IoT. In: **Internet of Things and Big Data Analytics for Smart Generation**. Springer, Cham, 2019. p. 27-51.

SMITH, James D. An alternative to technology readiness levels for non-developmental item (NDI) software. In: **Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences**. IEEE, 2005. p. 315a-315a.

TEAM, C. P. CMMI® for Development, Version 1.3, Improving processes for developing better products and services. Software Engineering Institute. 2010

TETLAY, Abideen. Capability readiness for product-service systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, n. 8, p. 1471-1477, 2011.

TERZI, Duygu Sinanc; TERZI, Ramazan; SAGIROGLU, Seref. Big data analytics for network anomaly detection from netflow data. In: **2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)**. IEEE, 2017. p. 592-597.

TURING, Alan M. COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE, *Mind*, Volume LIX, Issue 236, October 1950, Pages 433–460.

VAN LOOY, Amy; DE BACKER, Manu; POELS, Geert. Defining business process maturity. A journey towards excellence. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 22, n. 11, p. 1119-1137, 2011.

VELTHUIJSEN, Jan Willem et al. Europe Monitor - Innovation and Digital Transformation: How do European SMEs perform? **PWC**. 2018. Disponível em: <<https://www.pwc.nl/en/topics/economic-office/europe-monitor/the-digital-transformation-of-smes.html>>. Acesso em: 05 set. 2020.

VERMULM, Roberto et al. Políticas para o desenvolvimento da indústria 4.0 no Brasil. São Paulo. 2018.

WANG, Ke-Sheng. Intelligent and integrated RFID (II-RFID) system for improving traceability in manufacturing. **Advances in Manufacturing**, v. 2, n. 2, p. 106-120, 2014.

WANG, Pei. On Defining Artificial Intelligence. **Journal of Artificial General Intelligence**, v. 10, n. 2, p. 1-37, 2019.

WANG, Shiyong et al. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, p. 3159805, 2016.

YIN, Robert K. Case study research: Design and methods fourth edition. **Los Angeles and London: SAGE**, 2009.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO ÀS EMPRESAS.

As questões apresentadas a seguir buscam conhecer melhor como as organizações localizadas no DF estão lidando para a Indústria 4.0:

- 1) Qual o setor de atuação de sua empresa?
- 2) Quantos funcionários possui sua empresa?
- 3) Como sua empresa está estruturada? (Estrutura Organizacional)
- 4) Você considera que sua organização está preparada para a Quarta Revolução Industrial?
 - a) Sim
 - b) Não
 - c) Se Não, o que sua organização precisa desenvolver? _____
- 5) Você já teve conhecimento de algum modelo que avalia a maturidade da empresa na Indústria 4.0?
 - a) Sim
 - b) Não.
 - c) Se sim, qual modelo conhece? _____
- 6) Em sua organização, qual área ou dimensão necessita de maior atenção para o desenvolvimento da Indústria 4.0?
 - a) Cultura
 - b) Tecnologia
 - c) Estrutura organizacional
 - d) Recursos Humanos
 - e) Modelo de Negócio

- f) Outra _____
- 7) Qual seria o tempo ideal para realização de uma entrevista de aplicação de um questionário que visa avaliar a maturidade de uma organização?
- 8) Do ponto de vista da organização, qual seria o número ideal de questões em um questionário, de forma a não tornar a avaliação cansativa e ineficiente?
- a) Menos de 20, com questões mais elaboradas, necessitando uma análise mais aprofundada.
 - b) 20 a 30
 - c) 30 a 40
 - d) 40 a 50
 - e) Mais de 50, com questões mais simples e diretas
- 9) Você se sentiria à vontade de responder a um questionário de maturidade disponibilizado via internet? Com questões para pontuar de 1 a 4, por exemplo? Ou considera que o formato de entrevista é melhor?
- 10) Você aplicaria tecnologias de indústria 4.0 com base em um questionário de avaliação ou preferiria uma visita de técnicos especialistas na área? Ou outra abordagem?