

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

ATHOS PAULO TADEU PACCHINI

**O GRAU DE PRONTIDÃO DAS EMPRESAS INDUSTRIAIS PARA IMPLANTAÇÃO
DA INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO NO SETOR AUTOMOTIVO BRASILEIRO**

**SÃO PAULO
2019**

ATHOS PAULO TADEU PACCHINI

**O GRAU DE PRONTIDÃO DAS EMPRESAS INDUSTRIAIS PARA IMPLANTAÇÃO
DA INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO NO SETOR AUTOMOTIVO BRASILEIRO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Prof. Wagner Cezar Lucato, Dr. -
Orientador

**SÃO PAULO
2019**

Pacchini, Athos Paulo Tadeu.

O grau de prontidão das empresas industriais para implantação da indústria 4.0: um estudo no setor automotivo brasileiro. / Athos Paulo Tadeu Pacchini. 2019.

197 f.

Tese (doutorado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2019.

Orientador (a): Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato.

1. Indústria 4.0. 2. Maturidade. 3. Prontidão. 4. Tecnologias habilitadoras. 5. Manufatura avançada.

I. Lucato, Wagner Cezar. II. Título

CDU 658.5

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE

DE

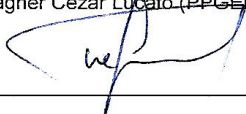
Athos Paulo Tadeu Pacchini

Título da Tese: O Grau de Prontidão das Empresas Industriais para Implantação da Indústria 4.0: Um Estudo no Setor Automotivo Brasileiro.

A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Athos Paulo Tadeu Pacchini Aprovado.

São Paulo, 11 de junho de 2019.

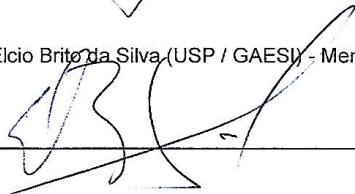
Prof(a). Dr(a). Wagner Cezar Lucato (PPGEP/UNINOVE) - Orientador



Prof(a). Dr(a). Aguinaldo Aragon Fernandes (USP/FIA) - Membro Externo



Prof(a). Dr(a). Élcio Brito da Silva (USP / GAESI) - Membro Externo



Prof(a). Dr(a). Ivanir Costa (UNINOVE/ PPGI) - Membro Externo



Prof(a). Dr(a). Mauro Luiz Martens (UNINOVE/ PPGEP) - Membro Interno



Dedico este trabalho, aos meus pais, a minha esposa, aos meus filhos, como exemplo de que nunca é tarde para recomeçar.

Porque Dele, e por meio Dele, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois a glória eternamente. Amém. Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me ter sustentado nas horas difíceis com Seu braço forte para superar as dificuldades.

À Universidade Nove de Julho, nas pessoas dos Professores Eduardo e Christina Storopoli, que viabilizaram este curso, permitindo um grande crescimento profissional, nestes quase 20 anos de convivência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato, pela paciência, pelo carinho, pela dedicação e pelo seu intensivo apoio na elaboração deste trabalho, que soube conduzir esta orientação com muita maestria.

Aos professores que compuseram a banca examinadora que acompanharam todo esse processo e souberam apoiar e corrigir com muita sabedoria.

Ao grande amigo, Prof. Dr. Renato Lioguidice, principal responsável por eu iniciar essa etapa, pelo apoio, incentivo e companheirismo.

Ao meu grande amigo Prof. Dr. Anthony B. Portigliatti, que possibilitou meu mestrado na Florida Christian University – FCU.

A um amigo por quem tive muito apreço, in memoriam, Dr. Jorge Edney Atalla, que me apoiou e me acolheu em momentos difíceis e turbulentos.

A todos os professores, por me transferirem o conhecimento não apenas intelectual, mas na manifestação do cuidado no processo de formação, pelo tanto que me auxiliaram nesta difícil arte de ensinar. A todos os colegas, muitos deles já mestres e doutores, que estiveram juntos nesta caminhada.

Em especial, à minha esposa pelo carinho, companheirismo, apoio e incentivo nas horas difíceis, nos momentos de desânimo e de cansaço, e por entender o tempo que deixei de dedicar a ela e a família.

Aos meus pais, em particular, ao meu pai in memoriam, os quais lá atrás me ensinaram o caminho que eu deveria andar, sempre com muito amor e proporcionaram a minha formação educacional e moral.

Por fim a todos que direta ou indiretamente fizeram parte desta gratificante jornada, a minha eterna gratidão.

RESUMO

A presente tese tem como objetivo, propor um modelo, para medir o grau de prontidão das empresas industriais, para que possam se situar com relação ao seu grau de preparação para a implantação da Indústria 4.0 (I 4.0). Ela é um conjunto de tecnologias disruptivas, chamadas de tecnologias habilitadoras, que traz no seu escopo profundas alterações nos mais diversos setores da economia, seja internamente nas empresas, como nas relações fornecedores/empresa/clientes. Por se tratar de um assunto novo, ainda não existe na literatura um consenso sobre seu conceito e sua aplicabilidade, porém a magnitude do impacto da digitização, tem deixado as empresas predispostas a enfrentar esse desafio. O modelo aqui desenvolvido faz clara distinção entre prontidão e maturidade, já que prontidão é um passo anterior ao processo de amadurecimento (maturidade). A maioria dos artigos encontrados na revisão da literatura, traz modelos de maturidade/prontidão, porém, utilizam indistintamente ambas as palavras, como se fossem sinônimos, para se referir ao sentido de maturidade, ou seja, os modelos mostram quanto as empresas já caminharam no amadurecimento da I 4.0. No entanto, a literatura não apresenta modelos que meçam o grau de preparação das empresas, com relação as tecnologias habilitadoras, o que aqui se denominou de grau de prontidão, para elas se posicionarem quanto ao desenvolvimento de abordagens globais na jornada rumo à I 4.0, tornando-se esse aspecto uma lacuna de pesquisa a ser explorada por esta tese. Para tanto, o arcabouço teórico e a validação de especialistas em I 4.0, permitiram a definição de oito tecnologias habilitadoras e de quarenta e oito pré-requisitos, seis para cada tecnologia, utilizados para a elaboração do instrumento de avaliação do modelo conceitual. Para a validação desse modelo foram escolhidas, com base em informações do mercado, quatro empresas com diferentes graus de preparação para o início da implementação da I 4.0. Para essas empresas foi aplicado o modelo desenvolvido e obteve-se um grau de prontidão para cada uma que replicou com exatidão as mesmas percepções do mercado, autenticando assim a propriedade do modelo conceitual desenvolvido.

Palavras chaves: Indústria 4.0. Maturidade. Prontidão. Tecnologias habilitadoras. Manufatura avançada. Manufatura inteligente.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to propose a model to measure the degree of readiness of industrial companies for the adoption of Industry 4.0 (I4.0). It is a set of disruptive technologies, called enabling technologies, which brings in its scope profound changes in the most diverse sectors of the economy, both internally and in supplier / company / customer relationships. Because it is a new subject, there is still no consensus in the literature about its concept and its applicability, but the magnitude of the impact of digitization has left companies susceptible to face this challenge. The model developed clearly distinguishes between readiness and maturity, since readiness is a step before maturation. Most of the articles found in the literature review have maturity/readiness models. However, they use both words indistinctly to refer to the meaning of maturity, as if they were synonyms, that is, the models show how many companies have already progressed in the maturity of Industry 4.0. However, the literature does not present models that measure the degree of preparation of the companies with relation to enabling technologies, which is here called a degree of readiness, so that they begin the development of global approaches on the journey towards I 4.0, becoming this aspect a research gap to be explored by this thesis. To that end, the theoretical framework and the validation of specialists in Industry 4.0 allowed the definition of eight enabling technologies and forty-eight prerequisites, six for each technology, used for the development of the conceptual model evaluation tool. For the validation of this model, four companies with different degrees of preparation for the start of the I 4.0 implementation were chosen based on market information. For these companies, the developed model was applied, and a degree of readiness was obtained for each one that accurately replicated the same perceptions of the market, thus confirming the practical value of the conceptual model developed.

Key words: Industry 4.0. Maturity. Readiness. Enabling technologies. Advanced manufacturing. Smart manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das Revoluções Industriais.....	16
Figura 2 – O velho mundo – Indústria 3.0	25
Figura 3 – O novo mundo – Indústria 4.0.....	25
Figura 4 – Percentual das empresas brasileiras que utilizam digitização.....	27
Figura 5 – Estrutura da tese.....	28
Figura 6 – Nomes da Indústria 4.0 no mundo.....	31
Figura 7 – Estágios do Modelo de Maturidade ACATECH.....	36
Figura 8 – Roteiro do Modelo de Maturidade ACATECH.....	36
Figura 9 – Dimensões e Campos de avaliação da I 4.0.....	38
Figura 10 – Framework do Índice de Prontidão <i>Singapore</i>	40
Figura 11 – Modelo de Maturidade PWC.....	42
Figura 12 – Gráfico Radar do Grau de Maturidade.....	44
Figura 13 – Visualização do foco de aplicação do modelo de maturidade.....	48
Figura 14 – Gráfico radar do nível de prontidão.....	50
Figura 15 – Os nove pilares da Indústria 4.0.....	53
Figura 16 – Tecnologias da Indústria 4.0.....	57
Figura 17 – Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0.....	59
Figura 18 – Tecnologias habilitadoras e elementos da Indústria 4.0.....	63
Figura 19 – Framework da Indústria 4.0 e Tecnologias Digitais.....	64
Figura 20 – Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0.....	65
Figura 21 – Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0.....	66
Figura 22 – Distribuição percentual das tecnologias habilitadoras.....	70
Figura 23 – Curva ABC das Tecnologias Habilitadoras.....	71
Figura 24 – Tecnologias e elementos da Indústria 4.0.....	72
Figura 25 – Arquitetura 5C para implantação do CPS.....	81

Figura 26 – Ecossistema da Manufatura Inteligente.....	88
Figura 27 – A estrutura da norma SAE J4000.....	94
Figura 28 – A estrutura básica do modelo proposto.....	96
Figura 29 – Modelo conceitual do estudo.....	98
Figura 30 – Representação do vetor resultado.....	99
Figura 31 – Dimensões do grau de adoção.....	101
Figura 32 – Dimensões do grau de prontidão.....	103
Figura 33 – Representação gráfica do grau de prontidão.....	104
Figura 34 – Representação da área do grau de prontidão.....	106
Figura 35 – A Estrutura do Trabalho.....	108
Figura 36 – Esquema de comunicação da Empresa A.....	130
Figura 37 – Realidade Aumentada	135
Figura 38 – Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa A.....	137
Figura 39 – Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa B	143
Figura 40 – Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa C.....	150
Figura 41 – Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa D.....	155
Figura 42 – Logomarca do modelo READYfor4.0	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0.....	69
Tabela 2 – Tecnologias habilitadoras selecionadas.....	110
Tabela 3 – Quantidade de artigos dos pré-requisitos.....	111
Tabela 4 – Resumo da avaliação da Empresa A.....	136
Tabela 5 – Resumo da avaliação da Empresa B.....	142
Tabela 6 – Resumo da avaliação da Empresa C.....	149
Tabela 7 – Resumo da avaliação da Empresa D.....	155
Tabela 8 – Resultados sintetizados do grau de prontidão.....	156
Tabela 9 – Comparativo do porte da empresa com o grau de prontidão	158

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dimensões e Níveis de Classificação do Modelo de Prontidão 4.0	37
Quadro 2 – Modelos de maturidade	51
Quadro 3 – Resumo dos pré-requisitos das tecnologias habilitadoras	89
Quadro 4 – Exemplo dos aspectos de cada componente	93
Quadro 5 – Avaliação dos pré-requisitos	96
Quadro 6 – Exemplo do Instrumento de Avaliação da entrevista semiestruturada.....	97
Quadro 7 – Características das dimensões do grau de prontidão	103
Quadro 8 – Resumo revisado dos pré-requisitos das tecnologias habilitadoras	116
Quadro 9 – Métodos de pesquisa e técnicas de coleta de dados	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva

AGV - Veículo Guiado Automaticamente

AI – Inteligência Artificial

AM – Manufatura Aditiva

AR – Realidade Aumentada

CNI – Confederação Nacional da Indústria

Cobots – Robôs Colaborativos

CPS – Sistema Físico Cibernético

EPC – Código Eletrônico do Produto.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

I 4.0 – Indústria 4.0

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional

IIoT – Internet Industrial das Coisas

IoS – Internet de Serviços

IoT – Internet das Coisas

ISO – Organização Internacional para Padronização

MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços

OEE – Eficiência Geral de Equipamento

RFID – Identificação por Rádio Frequência

SAE – Sociedade dos Engenheiros Automotivos

SOA – Arquitetura Orientada a Serviço

TI – Tecnologia da Informação

TIC – Tecnologia da Informação e Comunicação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo Geral.....	22
1.2.2 Objetivos Específicos.....	22
1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	22
1.4 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO.....	24
1.5 ESTRUTURA DA TESE.....	27
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	29
2.1 A CONCEITUAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0.....	29
2.2 MODELOS DE MATURIDADE E PRONTIDÃO DA INDÚSTRIA 4.0.....	34
2.2.1 Acatech índice de maturidade da I 4.0 (<i>The Acatech industrie 4.0 maturity index</i>).....	35
2.2.2 Impuls prontidão da I 4.0 (<i>Industrie 4.0 readiness Impuls</i>).....	37
2.2.3 <i>Singapore</i> índice de prontidão da indústria inteligente (<i>Singapore smart industry readiness index</i>)	39
2.2.4 PWC modelo de maturidade.....	41
2.2.5 Modelo de maturidade para avaliar a prontidão e maturidade de empresas do setor de manufatura.....	43
2.2.6 Modelo de maturidade para avaliar a prontidão digital das empresas de manufatura	44
2.2.7 SIMMI 4.0 – <i>A Maturity model for classifying the enterprise-wide IT and software landscape focusing on industry 4.0</i>	46
2.2.8 Conceito de um revolucionário modelo de maturidade baseado na migração para a Indústria 4.0.....	47
2.2.9 Avaliação do nível de prontidão da Indústria 4.0: Casos da Turquia.....	48
2.3 TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	52

2.4 PRÉ-REQUISITOS PARA A IMPLANTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	75
2.4.1 Pré-requisitos para a Tecnologia Internet das Coisas (t ₁)	75
2.4.2 Pré-requisitos para a tecnologia <i>Big Data</i> (t ₂)	77
2.4.3 Pré-requisitos para a Tecnologia de Computação em Nuvem (t ₃)	78
2.4.4 Pré-requisitos para o Sistema Físico Cibernético (t ₄)	80
2.4.5 Pré-requisitos para o Robô Colaborativo (t ₅)	82
2.4.6 Pré-requisitos para a Manufatura Aditiva (t ₆)	84
2.4.7 Pré-requisitos para a Realidade Aumentada (t ₇)	86
2.4.8 Pré-requisitos para a Inteligência Artificial (t ₈)	87
3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO PARA MEDIÇÃO DO GRAU DE PRONTIDÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NAS EMPRESAS INDUSTRIAIS.....	91
3.1 INTRODUÇÃO.....	91
3.2 O MODELO PARA MEDIDA DO GRAU DE PRONTIDÃO.....	95
3.2.1 Os pré-requisitos para a implementação das tecnologias habilitadoras.....	95
3.2.2 A medida do grau de adoção de um elemento (tecnologia).....	98
3.2.3 A medida do grau de prontidão de uma empresa.....	101
4. METODOLOGIA DE PESQUISA	107
4.1 DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	107
4.2 CRITÉRIOS PARA A REVISÃO DA LITERATURA.....	108
4.2.1 Seleção dos artigos para identificar os modelos de maturidade ou prontidão.....	109
4.2.2 Seleção dos artigos para identificar as tecnologias habilitadoras relevantes... ..	109
4.2.3 Seleção dos artigos para identificar os pré-requisitos de cada tecnologia habilitadora	110
4.3 A VALIDAÇÃO DAS TECNOLOGIAS E SEUS PRÉ-REQUISITOS POR ESPECIALISTAS.....	112

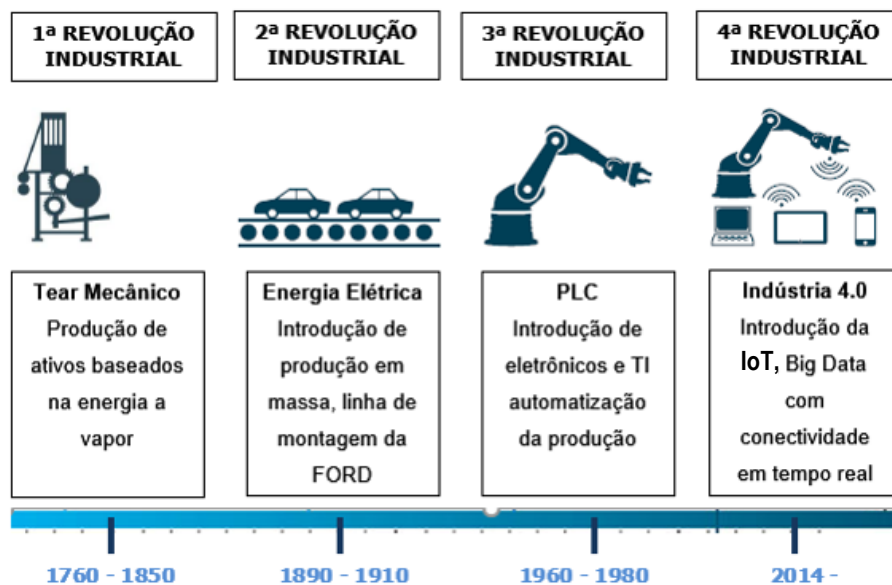
4.4 PESQUISA DE CAMPO	117
4.4.1 A seleção do método e da técnica de coleta de dados.....	117
4.4.2 A seleção das empresas para o estudo de caso.....	122
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	129
5.1 RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO.....	129
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO.....	156
6. CONCLUSÕES	160
7. REFERÊNCIAS.....	163
APÊNDICE – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO.....	178
GLOSSÁRIO.....	193

1. INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial já está a caminho. As revoluções são rápidas, disruptivas e destrutivas, e não têm volta. A Indústria 4.0 será uma resposta aos desafios que estão por vir (BERGER, 2014).

Desde o início da industrialização, em meados do século XVIII, avanços tecnológicos levaram a mudanças de paradigmas. Foram as chamadas "revoluções industriais". A primeira, com o uso da energia a vapor quebrou-se o paradigma da produção artesanal. Com o advento da energia elétrica, no final do séc. XIX, surge a segunda revolução industrial. Com a cibernética e a digitização¹ generalizada, veio a 3ª revolução industrial. A Figura 1 mostra em uma linha do tempo essas revoluções.

Figura 1: Evolução das Revoluções Industriais



Fonte: Adaptado de Berger (2016).

¹ Segundo o senso comum, a palavra usualmente utilizada para designar um alto grau de tecnologias digitais tem sido a digitalização. Porém, para Valino, Simões e Tomasini (2016), "Digitização" é o termo usado para representar a transformação das empresas por meio das ferramentas digitais, palavra que será empregada neste estudo.

Atualmente, com a combinação de diversas tecnologias, a internet e os chamados objetos inteligentes (máquinas e produtos), parecem apontar para uma nova revolução industrial, a Indústria 4.0, apresentando novos paradigmas para a indústria de manufatura (LASI *et al.* 2014; SCHWAB, 2016).

As três revoluções industriais do passado foram marcadas por inovações técnicas: a primeira pela introdução de fabricação mecânica à base de água e vapor no final do século 18, a segunda pela eletricidade e a divisão do trabalho no início do século 20 e a terceira pela introdução da lógica programável controladores (PLC) para fins de automação na manufatura nos anos 1960. De acordo com especialistas da indústria e da pesquisa, a próxima revolução industrial permitirá a comunicação entre humanos e máquinas no sistema físico cibernético (*Cyber Physical System - CPS*), por meio Internet das coisas (*Internet of Things - IoT*), em grandes redes (BRETTEL *et al.* 2014).

Segundo Dilberoglu *et al.* (2017) e Mosterman e Zander (2015) a quarta revolução industrial é um conjunto integrado de sistemas de produção inteligentes e tecnologias de informação avançadas baseadas em conjuntos de sistemas de *softwares* integrados. De acordo com Berger (2014), a I 4.0 é um conjunto de tecnologias que formam a chamada quarta revolução industrial, baseada na digitização e interconexão de todas as unidades de produção presentes dentro de um sistema econômico. Para De Carolis *et al.* (2017), na I 4.0, o principal motor de transformação são as tecnologias digitais, elas permitem às empresas encontrarem soluções capazes de transformar a complexidade crescente em oportunidades, que asseguraram uma competitividade sustentável e um crescimento rentável.

O termo, Indústria 4.0 (I 4.0), nasceu na Alemanha, no alemão "*Industrie 4.0*", e se espalhou rapidamente, principalmente na Europa, encontrando relevante interesse internacional entre produtores e indústrias voltadas para a tecnologia (ZEHL, 2016). Cada país foi adotando seu próprio termo, para se referir a esta nova revolução, nos Estados Unidos, por exemplo, ela ficou conhecida como, Internet Industrial das Coisas (IIoT), manufatura avançada ou indústria inteligente (*Smart Manufacturing - SM*), os quais têm sido também muito difundidos globalmente, tanto na indústria quanto na academia em anos recentes. Indústria Inteligente tornou-se sinônimo da I 4.0, como sendo indústrias que utilizam um conjunto de tecnologias de informação e comunicação (TICs) em rede para controlar operações de manufatura. (MITTAL *et al.*, 2017; THIEDE; JURASCHEK; HERRMANN, 2016).

A I 4.0, terá em um futuro bem próximo, pessoas, coisas, processos, serviços e dados conectados em rede. São os chamados objetos inteligentes equipados com atuadores e sensores, com códigos QR, sigla do inglês “*Quick Response*” e chips RFID, sigla do inglês “*Radio-Frequency Identification*” que tomarão decisões, ao longo de toda a cadeia de valor, desde o desenvolvimento de produtos até o serviço ao cliente. Muitas oportunidades virão com esses novos desenvolvimentos, acompanhadas de muitos riscos e desafios para a economia, bem como para as empresas. Além dos problemas de privacidade, proteção e segurança de dados, serão exigidas novas qualificações para as pessoas e novos requisitos para as indústrias (BUHR, 2015; BAUTERS *et al.*, 2018).

Toda essa interconexão, tanto na vida cotidiana como no trabalho, faz com que a internet se torne cada vez mais importante. A nova visão da internet, ligada à Indústria 4.0, chamada Internet das Coisas (IoT), irá conectar bilhões de objetos "coisas", tais como sensores, monitores e dispositivos de identificação, máquinas, por radiofrequência, em uma escala que ultrapassa o uso da Internet tal como se tem empregado até agora (DUTTON, 2015).

A ideia por trás da IoT é levar objetos físicos a conectar-se com o mundo virtual, monitorar e analisar dados, fornecendo feedback em tempo real, formando o chamado Sistema Físico Cibernético (CPS), no qual as possibilidades e aplicações da IoT são infinitas e podem ser utilizadas em diversos segmentos (KESTER, 2016; VEZA; MLADINEO; GJELDUM, 2016). De acordo com Xu *et al.* (2013) a IoT fornece uma promessa de oportunidade de se construir sistemas e aplicações industriais poderosos, alavancando a crescente ubiquidade de RFID, conexões sem fio (*wireless*), celulares e dispositivos de sensoreamento, corroborando a tendência de uma ampla gama de aplicações.

Na atual conjuntura, é importante que uma empresa enfrente estes desafios tecnológicos. Do contrário, terá dificuldades em reduzir custos, apresentar novos produtos e/ou serviços e inovar em modelos de negócios, o que a coloca em posição desfavorável em relação aos concorrentes que fazem investimento em tecnologia (KHAN; TUROWSKI, 2016).

Por meio dessa convergência das atuais TICs, em consonância com as atuais tecnologias de fabricação, a indústria de manufatura tem como objetivo melhorar a competitividade, garantindo, assim, seu crescimento. Indústria 4.0, *Smart*

Manufacturing, Manufatura Avançada, Internet Industrial das Coisas, *Made in China 2025*, ou qualquer outro nome que cada país tenha adotado para se referir a essa revolução industrial, significa a convergência dessas tecnologias de ponta, as quais tornam a engenharia eficaz e precisa na tomada de decisão em tempo real (KANG *et al.* 2016).

Neste sentido, De Carolis *et al.* (2017), diz como é importante a empresa conhecer sua capacitação tecnológica e ter uma visão clara do nível de digitização tanto interno como externo, para construir parâmetros que possam medir a sua posição em relação ao desenvolvimento da I 4.0.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A revisão da bibliografia realizada como parte desta tese mostrou que, dentre os vários aspectos discutidos na literatura, o desenvolvimento da 4ª Revolução Industrial é um caminho inevitável, como foi a internet nos anos 90 (DRATH; HORCH, 2014). Em se tratando de uma Revolução ou mesmo de uma Evolução (EROL *et al.* 2016) e de acordo com Lee *et al.* (2014), as empresas, no ambiente competitivo de hoje, devem estar preparadas para este novo desafio.

Poucas indústrias brasileiras conhecem as tecnologias ligadas à I 4.0. Segundo a CNI (2016), nem a metade das indústrias no Brasil chegam a conhecer ao menos uma das tecnologias que suportam a I 4.0. Assim medir o grau de prontidão, nos países em desenvolvimento, segundo Temur, Bolat e Gozlu (2019), torna-se necessário para que as indústrias se posicionem quanto ao seu potencial para a implantação da I 4.0.

A revisão da literatura, mostrou uma quantidade considerável de artigos, sobre modelos de maturidade e/ou prontidão. Porém, além de, não haver consenso sobre o assunto, segundo Stefan *et al.* (2018), as empresas precisariam gastar com consultores, para utilizar os modelos na prática. É importante para as empresas industriais, que empreendam uma avaliação abrangente do seu desenvolvimento digital, a fim de, obterem uma visão transparente sobre o seu nível atual de prontidão digital. De fato, um profundo entendimento do *status* atual da digitização, é o primeiro passo para uma transformação bem-sucedida (DE CAROLIS *et al.*, 2017).

Por isso, dada a importância desse novo cenário com relação à competitividade das empresas, este estudo se propõe desenvolver um modelo, no âmbito das empresas industriais para medir o seu grau de prontidão com relação as tecnologias relevantes para a implantação da I 4.0.

Vale ressaltar que prontidão é diferente de maturidade. Schumacher *et al.* (2016) expressam a diferença entre esses dois conceitos, colocando a prontidão antes de iniciar o processo de amadurecimento, ou seja, a prontidão mostra se a organização está pronta para iniciar um processo de desenvolvimento. Já a maturidade demonstra em qual nível está a organização com relação ao processo analisado. E mais, Ferreira (2010) indica que Prontidão (s. f.) é: “Estado de quem se acha pronto para fazer alguma coisa”, e Maturidade (s. f.) é: “Estado em que há maturação” (amadurecimento). Na mesma linha o dicionário de Cambridge (2004), estabelece que: *Readiness* (prontidão) é “*willingness or a state of being prepared for something* (disposição ou estado de preparação para algo)” e *Maturity* (maturidade): “*a very advanced or developed form or state* (uma forma ou estado muito avançado ou desenvolvido)”. Finalizando, no dicionário Oxford (2002) encontram-se as seguintes definições: *Readiness* (prontidão): *The state of being fully prepared for something* (o estado de estar totalmente preparado para algo)” e *Maturity* (maturidade): *The state, fact, or period of being mature* (o estado, fato ou período de amadurecimento)”. Pelo exposto, este trabalho adota como definição de Prontidão: O estado em que se encontra uma entidade para realizar algo, e Maturidade: O nível de evolução que se encontra uma entidade com relação a algo.

O modelo aqui apresentado considera o grau de prontidão das empresas industriais, para a implantação da I 4.0. Os artigos encontrados na revisão da literatura, realizada em várias bases de artigos científicos, apresentam modelos de maturidade e não deixam claro a diferença entre maturidade e prontidão (SCHUMACHER *et al.*, 2016; PESSL *et al.*, 2017).

Dentre esses modelos pode-se citar os seguintes: *IMPULS – Industrie 4.0 Readiness*, (LICHTBLAU *et al.*, 2015); *A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises* (SCHUMACHER *et al.*, 2016); *ACATECH Maturity Index*, (SCHUH, 2017); *The Singapore Smart Industry Readiness Index - Catalysing the transformation of manufacturing* (KIANG, 2018) e *DREAMY - Digital Readiness Assessment Maturity Model* (DE CAROLIS *et al.*, 2017).

Apesar de alguns destes modelos trazerem *readiness* (prontidão) no nome, com exceção de um artigo, os demais não avaliaram o grau de prontidão para a implementação da I 4.0, com relação as tecnologias. Eles, normalmente, segundo Temur, Bolat e Gozlu (2019), tratam maturidade e prontidão como sinônimos, deixando indefinido a diferença entre o grau de maturidade e o grau de prontidão. O que torna a mensuração do grau de prontidão (e não maturidade) uma interessante lacuna de pesquisa a ser explorada neste estudo.

Assim, como ponto central de seu desenvolvimento, este estudo buscou responder às seguintes questões não resolvidas:

- 1. Como avaliar o grau de prontidão de uma empresa industrial com relação à implementação da Indústria 4.0?**
- 2. Como essa avaliação pode fornecer às empresas industriais orientações sobre os pontos que precisam ser melhorados para capacitá-las a crescer nos níveis de prontidão com relação a I 4.0?**

Como premissa básica de resposta provável e provisória às questões enunciadas, a seguinte proposição pode ser proposta:

Se for possível identificar as tecnologias habilitadoras mais relevantes para a implantação da Indústria 4.0 e para essas for possível identificar os pré-requisitos para a sua implantação, então será possível propor um modelo que meça o grau de prontidão de uma empresa industrial para a adoção da Indústria 4.0, ao mesmo tempo em que forneça direcionadores de ações para melhorar aquela medida.

1.2. OBJETIVOS

Para poder responder as questões de pesquisa propostas, o objetivo geral, a seguir, e os seguintes objetivos específicos foram considerados:

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo central deste trabalho, é desenvolver um modelo que possa diagnosticar o grau de prontidão das empresas industriais para implantação da Indústria 4.0.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Identificar e estabelecer os pré-requisitos para adoção das tecnologias identificadas, que habilitam a I 4.0.
- Validar as tecnologias e os pré-requisitos estabelecidos na literatura, por meio de especialistas.
- Estabelecer um modelo que possibilite medir o grau de prontidão das empresas para a implantação da I 4.0 e, ao mesmo tempo, indicar as áreas de atenção prioritárias para aumentar o grau de prontidão das empresas industriais.
- Testar o modelo desenvolvido por meio de estudos de caso.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo está delimitado sob alguns aspectos, a fim de que se pudesse testar o modelo para medir o grau de prontidão.

Na implementação da Indústria 4.0, é necessário estabelecer-se normas e protocolos para a comunicação e interoperabilidade, tanto na vertical (na empresa), como na horizontal (na cadeia de suprimentos). De acordo com Cimini *et al.* (2017), uma boa parte dos modelos de referência existentes têm contribuído para estes fins nas indústrias, tais como, o *Reference Architecture Model Industry 4.0* (RAMI 4.0), proposto em 2015, a *Industrial Internet Consortium* (IIC), nos Estados Unidos, proposto em 2016, o modelo *Industrial Internet Reference Architecture* (IIRA), e a *China System Architecture*, propostos em 2016 (HANKEL, 2016).

No entanto, como o objetivo deste estudo é medir o grau de prontidão, não o grau de maturidade, não foram levados em conta tais modelos de referência, pois são muito abrangentes e complexos quanto a sua implementação (Langmann; Rojas-Pena, 2016), eles não mostram explicitamente os detalhes sobre a comunicação entre máquinas e "coisas" para orientar os produtos no processo de fabricação de acordo com as operações requeridas (PISCHING *et al.*, 2017). De acordo com Lichtblau *et al.* (2015) e Schuh *et al.* (2017), quando a empresa chega no nível 3 de maturidade, de um total de cinco, ela ainda não está apta a utilizar os modelos de referência na sua totalidade.

Portanto, o modelo proposto limitou-se a analisar as tecnologias habilitadoras da I 4.0, com seus respectivos pré-requisitos. Aspectos importantes da Indústria 4.0, tais como processos, estrutura e pessoal das empresas analisadas (SCHUMACHER; EROL; LICHTBLAU *et al.*, 2015; SIHN, 2016; DE CAROLIS *et al.*, 2017; KIANG *et al.*, 2018; STEFAN *et al.*, 2018), não foram desconsiderados, eles foram incluídos nos pré-requisitos das tecnologias habilitadoras.

Vários autores conceituam a I 4.0 como um conjunto de tecnologias, chamadas habilitadoras, por se tratarem de tópicos que devam estar presentes, no primeiro momento, para viabilizá-la (GEISSBAUER *et al.* 2016; KHAN; TUROWSKI 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016; GERBERT *et al.* 2015; BERGER, 2014; SCHWAB, 2016).

As tecnologias têm um impacto significativo na maneira como os negócios são planejados e conduzidos. O desenvolvimento pleno do potencial da Indústria 4.0 ainda requer esforços na integração e coordenação das capacidades de cada tecnologia (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018). Em particular, tecnologias inteligentes, que são indispensáveis, nesta revolução industrial, desempenham um papel dominante (ZÁVADSKÁ; ZÁVADSKÝ, 2018).

Quanto ao número das tecnologias habilitadoras, foram selecionadas oito. Das quais sete delas representam 70% das citações pesquisadas e a oitava, a Inteligência Artificial (AI) foi sugerida pelos especialistas.

O modelo para medir o grau de prontidão tem sua aplicação em qualquer tipo de empresa, que esteja disposta a ingressar na I 4.0. Apesar disto, o presente estudo, delimitou o setor industrial para desenvolver e testar o modelo. A industrialização, que

é o processo de transformação de matérias-primas e informações em produtos acabados que agregam valor e satisfazem as necessidades humanas, tem sido uma contribuição relevante para o crescimento econômico das nações e, continuará a sê-lo no futuro (NEE *et al.*, 2012).

Uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) com 2.002 pessoas em 141 municípios, mostrou a importância do setor industrial, onde mais de 90% dos brasileiros consideram que a indústria tem papel de destaque no desenvolvimento econômico e social do Brasil. De acordo com a PNAD / IBGE em 2015 a indústria de transformação brasileira representou 15,6% do PIB e foi responsável por 7,2 milhões de empregos formais (CNI, 2014).

A escolha do setor foi totalmente aleatória, não foi induzida pela denominação genérica dessa quarta revolução industrial, “Indústria 4.0”. Esta denominação pode causar uma certa confusão quanto ao seu foco, porém sua aplicação não se restringe somente ao setor industrial, mas a qualquer setor da economia (FIRJAM, 2016).

Apesar de qualquer setor ou segmento ter potencial para desenvolvimento da I 4.0 e ela ser transversal a todos os setores industriais, delimitou-se, neste estudo, o segmento automotivo no Brasil para aplicar o modelo que mede o grau de prontidão da I 4.0. Segundo a FIRJAM (2016), o setor mais adiantado para receber essa nova onda de produção é a indústria automotiva. Os profissionais deste setor possuem qualificação em constante atualização para atender as demandas de mercado deste segmento.

1.4 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO

Segundo consenso de especialistas, a indústria nacional ainda se encontra em grande parte na transição entre a Indústria 2.0, caracterizada pela utilização de linhas de montagem e energia elétrica e a Indústria 3.0, mostrada na Figura 2, que aplica automação através da eletrônica, robótica e programação (FIRJAM, 2016).

Este atraso com relação aos chamados países industrializados, deve-se ao fato de que nas três revoluções industriais anteriores as empresas no Brasil não terem acompanhado a evolução tecnológica ocorrida no mundo o que fez com que o parque

industrial nacional ficasse obsoleto frente às organizações mundiais, perdendo competitividade (FIRJAM, 2016).

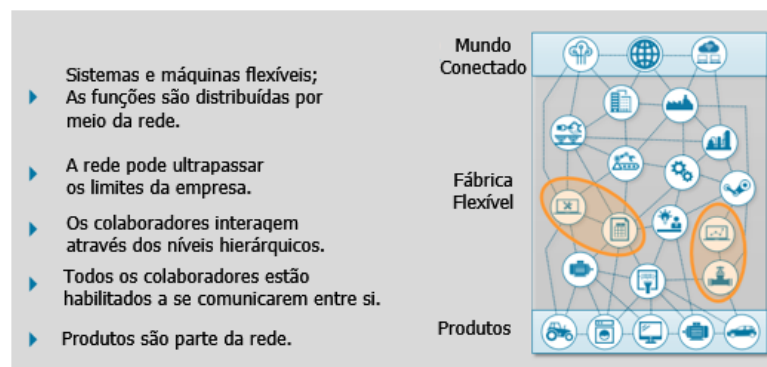
Figura 2: O velho mundo – Indústria 3.0



Fonte: Adaptado de Plattform Industrie 4.0 (2018)

Apesar de serem poucas as empresas que se encontram em estágios mais avançados da Indústria, segundo o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), o crescimento da I 4.0, Figura 3, terá impacto sobre a indústria nacional – “Será cada vez mais intensa a pressão competitiva e as empresas brasileiras vão sentir a necessidade de se modernizar” (MARQUES, 2017, p.27).

Figura 3: O novo mundo – Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Plattform Industrie 4.0 (2018)

Ainda, de acordo com Marques (2017), o desafio é garantir competitividade à indústria brasileira frente a uma transformação que ganha corpo na Europa e nos Estados Unidos, dando mais eficiência e flexibilidade a linhas de produção e reduzindo custos. Além de que, o uso da I 4.0 implica em mudança nos sistemas de produção, impulsionado por novas tecnologias, resultando, mesmo nas indústrias tradicionais, uma mudança nos modelos de negócios (LASI, *et al* 2014).

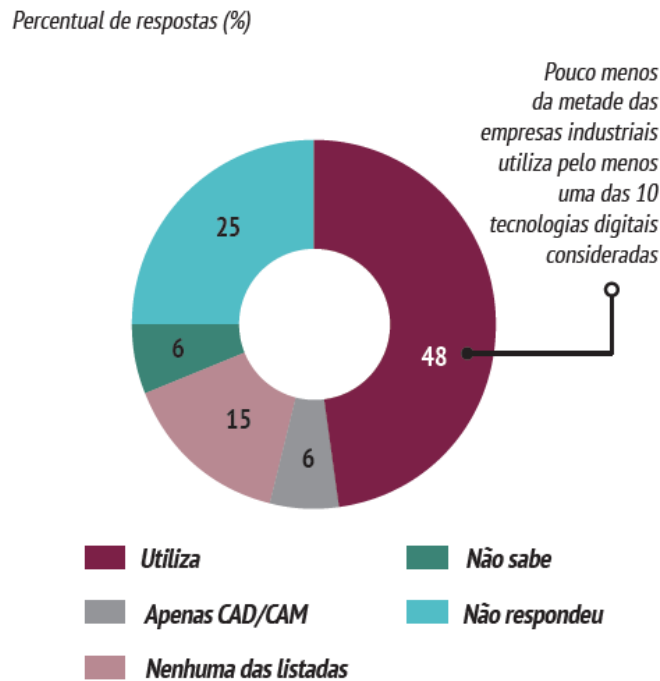
A Figura 4 mostra que apenas 48% das empresas utilizam pelo menos uma das seguintes tecnologias: Automação digital sem sensores; Automação digital com sensores para controle de processo; Monitoramento e controle remoto da produção com sistemas do tipo MES e SCADA²; Automação digital com sensores com identificação de produtos e condições operacionais, linhas flexíveis; Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento de produtos e manufatura de produtos; Manufatura aditiva, prototipagem rápida ou impressão 3D; Simulações/análise de modelos virtuais (Elementos Finitos, Fluidodinâmica Computacional, etc.) para projeto e comissionamento; Coleta, processamento e análise de grandes quantidades de dados (*Big Data*); Utilização de serviços em nuvem associados ao produto e, Incorporação de serviços digitais nos produtos (“Internet das Coisas” ou *Product Service Systems*), listadas pelo CNI que, na visão dessa organização, compõem a Indústria 4.0 (CNI, 2016).

Assim, diante dessas colocações, este tema torna-se relevante e atual para as indústrias do país, soma-se a oportunidade que o Brasil tem de avançar no seu desenvolvimento tecnológico. Este estudo apresenta-se como relevante para auxiliar as industriais brasileiras a entender melhor não só sua posição no contexto atual, como encontrar caminhos para o seu desenvolvimento futuro.

O desenvolvimento da I 4.0 no Brasil depende em todos os sentidos de maior conhecimento por parte das empresas dos ganhos da digitalização. Com um maior acesso à informação e a ampliação da implantação da I 4.0, haverá menos incerteza e uma mudança cultural paulatina nas empresas, diante da situação atual do Brasil. Falar em maturidade, sem estabelecer o grau de prontidão, mostrando para as empresas o caminho a seguir, seria prematuro para aquelas que ainda não conhecem toda esta transformação.

² MES – *Manufacturing Execution Systems*; SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*.

Figura 4: Percentual das empresas brasileiras que utilizam digitização



Fonte: CNI (2016)

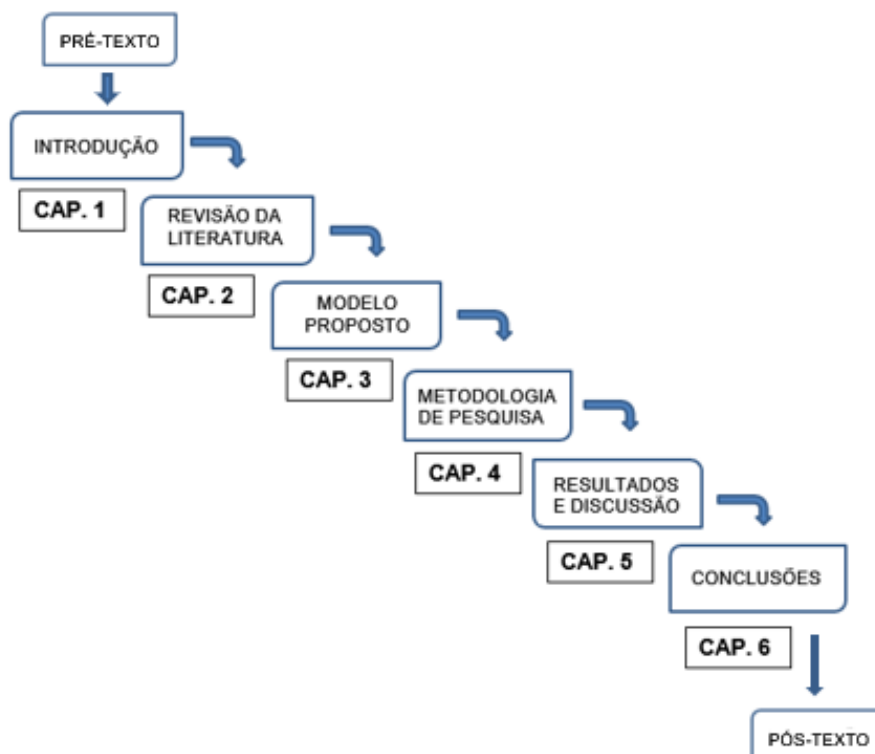
Por essa razão este estudo assume uma importância na medida em que o modelo proposto para medir o grau de prontidão, mostrará para as empresas industriais não só o grau de adoção do conjunto de tecnologias habilitadoras importantes para a implantação da Indústria 4.0, como também áreas de atenção prioritária para evoluir o grau de prontidão da empresa analisada.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Com a finalidade de relatar a pesquisa desenvolvida, esta tese apresenta seis capítulos, mostrados resumidamente na Figura 5, dos quais o primeiro é esta Introdução. No segundo capítulo, desenvolveu-se uma revisão da literatura, que teve como objetivo estabelecer os fundamentos teóricos necessários, além de identificar a lacuna de pesquisa desta tese. No terceiro, foi apresentada a proposta do modelo

para medir o grau de prontidão de uma empresa industrial para a implantação da Indústria 4.0. No quarto, apresentaram-se detalhadamente o método escolhido para a pesquisa, as técnicas de coleta de dados e demais informações necessárias à adequada compreensão dos resultados. No quinto capítulo, mostrou-se os resultados as ações realizadas para testar o modelo proposto, em quatro empresas do mundo real e discutiu-se os resultados obtidos. Finalmente no sexto e último capítulo, foram apresentadas as conclusões deste estudo, sendo indicadas as suas limitações e sugestões para pesquisas futuras, bem como as contribuições desta tese para a Academia e para a Engenharia de Produção. No pré-texto temos o Resumo, o Abstract, o Sumário e outros itens exigidos. No pós-texto desta tese se encontram as Referências, o Apêndice e o Glossário.

Figura 5: Estrutura da tese



Fonte: Elaborado pelo autor

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo contempla-se a revisão da literatura que sustenta o presente estudo. Inicialmente tem-se no subcapítulo 2.1 a conceituação da Indústria 4.0, destacando os seus diversos aspectos. A seguir, o subcapítulo 2.2 apresentam-se os modelos de maturidade encontrados na literatura, no subcapítulo 2.3 apresentam-se as tecnologias que a literatura aponta como composição da Indústria 4.0 e que foram chamadas de tecnologias habilitadoras (*enabling technologies*). Finalmente, no subcapítulo 2.4, identificam-se os pré-requisitos que também a literatura aponta para a adoção de cada uma delas.

2.1 A CONCEITUAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Desde o advento da máquina a vapor, da energia elétrica, com a produção em massa introduzida por Henry Ford e, a primeira digitização das produções industriais na década de 70, os processos de fabricação vêm mudando significativamente. Atualmente está ocorrendo uma nova revolução industrial, comumente chamada de Indústria 4.0 (EROL; SCHUMACHER; SIHN, 2016).

A Europa, em particular a Alemanha, estava preocupada com as perdas no valor da sua produção industrial para os países emergentes, ocorridas na última década, principalmente para a China e países asiáticos (BERGER, 2014). Soma-se a isto a perspectiva futura da diminuição da população em idade ativa, ou seja, pessoas entre 24 a 60 anos. Isso impulsionou o desenvolvimento de tecnologias industriais tais como o Sistema Físico Cibernético e a Internet das Coisas, consideradas duas tecnologias avançadas, desenvolvidas na última década, objetivando a redução da utilização da força de trabalho e diminuição do tempo de desenvolvimento dos produtos (QIN *et al.*, 2016; MONOSTORI *et al.*, 2016; GRUNDSTEIN; FREITAG; SCHOLZ-REITER, 2017).

Com base nessas tecnologias, um novo conceito “INDÚSTRIE 4.0” (Indústria 4.0) foi usado pela primeira vez em 2011 na Feira de Hannover na Alemanha e a cada ano ele vem se expandindo pelo mundo, simbolizando o início da quarta revolução industrial (ROBLEK *et al.*, 2016; LASI *et al.*, 2014; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2011; SCHWAB, 2016). Desde a sua origem o termo é usado como sinônimo

de Sistemas de Produção Físico Cibernéticos, ou seja, sistemas que envolvem o ambiente físico com o virtual (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016; ZEHL, 2016).

Imediatamente essa iniciativa teve apoio do governo alemão, como parte de sua estratégia visando a liderança em inovação tecnológica para 2020. Assim, formou-se o “Grupo de Trabalho da Indústria 4.0”, que desenvolveu um relatório final com as primeiras recomendações para a I 4.0, as quais foram publicadas em abril de 2013 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Neste relatório, de acordo com Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), as empresas, no futuro, estabelecerão no ambiente de fabricação Sistemas Físicos Cibernéticos capazes de executar trocas autônomas de informações entre máquinas inteligentes, sistemas de armazenagem e instalações, por meio de redes globais, desencadeando ações e controle independentemente da ação humana. Isso traria melhorias fundamentais em toda a cadeia de valor e no gerenciamento do ciclo de vida dos produtos, pois serão identificáveis de forma única e localizados em todos os momentos, em tempo real, até chegar ao seu destino.

Nessas fábricas inteligentes, todos os sistemas de fabricação estarão interconectados verticalmente com os processos de negócios dentro das fábricas e todas as empresas da cadeia de valor estarão interconectadas horizontalmente, em tempo real, “*end-to-end*”, ou seja, toda a cadeia de valor interconectada de ponta a ponta (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; STOJKIC; VEZA; BOSNJAK, 2016).

A chamada 4ª Revolução Industrial, tem inspirado um caloroso debate sobre o futuro desta nova visão, além das fronteiras da Alemanha, envolvendo diversos países e alcançando um clímax, temporário, no Fórum Econômico Mundial em Davos, em 2016, com o tema – Dominando a Quarta Revolução Industrial (PFEIFFER, 2017).

Tão logo o termo foi apresentado, formou-se também uma associação entre a BITKOM (uma associação de empresas digitais na Alemanha, sediada em Berlim) com a VDMA (Associação Alemã de Fabricação de Máquinas e Instalações Industriais, com sede em Frankfurt e instalada no Brasil desde 2013) e com a ZVEI (Associação Central de Engenharia Elétrica e Indústria Eletrônica, com sede em Frankfurt) a fim de solidificarem o conceito da Indústria 4.0 (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016). Elas atuaram na sugestão de continuação e desenvolvimento do projeto “*INDUSTRIE 4.0*” e, em abril de 2013, concluíram um acordo de cooperação para

executar estudos sobre a Indústria 4.0 além dos limites das associações, denominada “*Plattform Industrie 4.0*” (Plataforma da Indústria 4.0). O lançamento da plataforma foi oficialmente anunciado na Feira de Hannover em 2013. Em abril de 2015, a “*Plattform Industrie 4.0*” foi expandida e mais empresas, associações, sindicatos, setores políticos e científicos foram adicionados, desenvolvendo novas recomendações sobre como implantar a I 4.0.

No início, termo “*INDUSTRIE 4.0*” ficou restrito na Alemanha (LASI *et al.*, 2014). Outros países, inclusive europeus, desenvolveram suas próprias plataformas com outros termos, de acordo com Hofmann e Rüsç (2017). Nesse contexto foram criados termos como fabricação inteligente (*smart manufacturing*), internet industrial ou indústria integrada. Independente do nome adotado, todos convergem para o mesmo objetivo final, porém com estratégias diferentes. A Figura 6 mostra os termos utilizados em alguns países (SILVA, 2017).

Figura 6: Nomes da Indústria 4.0 no mundo



Fonte: Adaptado pelo autor de Silva (2017)

Nos Estados Unidos, a GE (General Electric) desenvolveu o conceito com o nome Internet Industrial, definido como a integração de máquinas e dispositivos físicos em rede, funcionando de forma autônoma para prever, controlar e planejar as ações do negócio (EVANS; ANNUNZIATA, 2012). Em março de 2014 a GE, IBM, SAP e DELL, entre outras, fundam o “*Industrial Internet Consortium*”, o Consórcio Internet Industrial, para reunir as organizações e tecnologias necessárias para acelerar o crescimento da Internet Industrial, com o apoio do governo americano, que passa a utilizar o nome de Internet Industrial das Coisas, com a sigla na língua inglesa IIoT (*Industrial Internet of Things*) (FMEAE, 2018).

Representantes da “*Plattform Industrie 4.0*” e a “*Industrial Internet Consortium*”, alinharam os seus esforços de arquitetura, respectivamente, do Modelo de Referência para a Industrie 4.0 (RAMI4.0), mais focado na indústria, com a Arquitetura de Internet Industrial (IIRA), transversal a vários segmentos. Houve aí um consenso para que houvesse a complementariedade dos modelos e assegurasse a interoperabilidade futura (FMEAE, 2018).

No Brasil, de acordo com Pacchini, Lucato e Vanalle (2017), em pesquisa feita na indústria automotiva, a tendência é utilizar o termo Indústria 4.0 (I4.0), designação que será utilizada nesta pesquisa daqui por diante, para se referir a este novo conceito.

Devido ao recente aparecimento deste tema, segundo Pereira e Romero (2017), ainda não existe um consenso sobre a conceituação do termo Indústria 4.0, ele é muitas vezes referido como a quarta revolução industrial e abrange um conjunto de avanços que estão tendo um alto impacto no panorama industrial atual.

Para Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), a Indústria 4.0 é conceituada como a integração técnica do CPS na fabricação e logística e o uso da Internet das Coisas e Serviços em processos industriais. Já Khan e Turowski (2016) indicam que a Indústria 4.0 é uma revolução habilitada por aplicação, ao nível da produção, de tecnologias avançadas de informações para trazer novos valores e serviços para clientes e a própria organização.

A I 4.0 é um termo coletivo para tecnologias e conceitos para a cadeia de valor da organização. Dentro das fábricas inteligentes com a estrutura modular da Indústria 4.0, o CPS monitora processos físicos e cria uma cópia virtual do mundo físico tomando decisões descentralizadas. Utilizando a IoT, o CPS cria a comunicação entre

o mundo virtual com os humanos em tempo real. Por meio da IoS a comunicação é feita, tanto interna como externamente, entre os participantes da cadeia de suprimentos (TJAHJONO *et al.*, 2017; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

No entendimento de Dilberoglu *et al.* (2017) e Mosterman e Zander (2015), a I 4.0 é um conjunto integrado de sistemas de produção inteligentes e Tecnologias de Informações avançadas, com conjuntos de sistemas de *softwares* integrados. Berger (2014), propõe que a Indústria 4.0 seja um conjunto de tecnologias baseadas na digitização e interconexão de todas as unidades de produção presentes dentro de um sistema econômico.

A I 4.0 é uma iniciativa estratégica que visa conectar plenamente manufatura, automação e Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) em uma integração vertical dentro da organização e, em uma integração horizontal entre duas ou mais organizações da cadeia de suprimentos para criar transparência organizacional e produção limpa (CHUKWUEKWE *et al.*, 2016).

Geissbauer *et al.* (2016), conceituam a I 4.0 como um conjunto que reúne uma ampla gama de tecnologias para criar valor, centrado na digitização de ponta a ponta de todos os ativos físicos e integração em ecossistemas digitais com parceiros da cadeia de valor. Baur e Wee (2015) propõem que a I 4.0 seja uma nova etapa na digitização do setor de manufatura, impulsionada por quatro disrupções: maior poder no aumento volumes de dados, potência computacional e de conectividade; o surgimento de recursos analíticos e de inteligência de negócios; interação homem-máquina, como interfaces tácteis e sistemas de realidade aumentada; e melhorias na transferência de instruções digitais para o mundo físico, como robótica avançada e impressão em 3-D.

Conceitua-se a Indústria 4.0 como um avanço tecnológico recente, no qual a internet e as tecnologias de informação servem como espinha dorsal para conectar objetos físicos, humanos, máquinas inteligentes, linha de produção e processos organizacionais, em tempo real, formando uma inteligência organizada e autônoma nas tomadas de decisões com muita agilidade (SCHUMACHER; EROL; SIHN; 2016).

A I 4.0 é a integração de nove avanços em tecnologia, que já são usados atualmente, isoladamente na fabricação, que vão transformar a produção. Células isoladas e otimizadas se juntarão como uma solução totalmente integrada, automatizada, com um fluxo de produção otimizado, levando a maiores eficiências e mudanças nas

tradicionais relações de produção entre fornecedores, produtores e clientes, bem como, entre humanos e máquinas (Gerbert *et al.*, 2015),

Finalmente, segundo Davies (2015), a Indústria 4.0 pode ser conceituada como a transformação de toda a cadeia produtiva, por meio da fusão, entre a Internet, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), com os processos de fabricação.

Pelos artigos apresentados, neste subcapítulo, pode-se perceber que a I 4.0 é um conceito que representa a adoção por parte de empresas industriais de técnicas e processos permitidos pela digitalização, tais como, IoT, computação em nuvem, e *big data* entre outras tecnologias. A maneira de como o setor industrial está adotando a Indústria 4.0 é desafiadora, uma vez que não há uma definição fechada do termo (CASTELO-BRANCO; CRUZ-JESUS; OLIVEIRA, 2019).

Com base na revisão da literatura, e por não haver encontrado um consenso entre os autores pesquisados, esta tese utilizou, o conceito da Indústria 4.0 do autor, para desenvolver o modelo para medir o grau de prontidão o seguinte texto: **A Indústria 4.0 é um conjunto de tecnologias habilitadoras que viabilizam a manufatura inteligente, conectando entre si objetos, máquinas, humanos, processos, organizações, em tempo real, proporcionando, produção customizada e diminuição de custos, com tomada de decisões autônomas e rápidas.**

2.2 MODELOS DE MATURIDADE E PRONTIDÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Neste subcapítulo apresentam-se os modelos de maturidade e prontidão que foram encontrados na literatura. Empresas industriais, em todo o mundo, estão enfrentando desafios substanciais devido as recentes mudanças ambientais, sociais, evolução económica e tecnológica. Para atender a esses desafios que empresas industriais precisarão ter recursos e conhecimento, para gerenciar toda a cadeia de valor de forma ágil e maneira responsiva (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016).

Os conceitos da I 4.0, atualmente, desafiam as empresas industriais em vários setores. No entanto, as empresas mostram diferentes níveis de maturidade em relação às novas tecnologias, processos e aspectos organizacionais, uma abordagem sistemática para conhecer esses níveis e implementar estratégias da I 4.0, se faz necessária (PESSL; SORKO; MAYER, 2017).

Na literatura, no que diz respeito à I 4.0, alguns modelos e ferramentas para avaliar a prontidão ou maturidade foram publicados. Estes modelos são comumente usados como um instrumento para conceituar e medir a maturidade de uma organização ou de um processo relativo a algum estado alvo específico. Modelos de Maturidade e Modelos de Prontidão são considerados sinônimos, por alguns autores, que usam indistintamente maturidade ou prontidão para referir-se ao mesmo conceito. Para Schumacher, Erol e Sihn (2016), há uma diferença entre prontidão e maturidade. Avaliar a prontidão é algo antes de se envolver no processo de maturação, enquanto avaliar a maturidade visa capturar o estado em que se encontra o processo de maturação.

Com o objetivo de capturar o nível de desenvolvimento do processo, no que diz respeito à Indústria 4.0 os seguintes modelos e ferramentas para avaliar a prontidão ou maturidade foram encontrados na literatura.

2.2.1 Acatech índice de maturidade da I 4.0 (*The Acatech industrie 4.0 maturity index*)

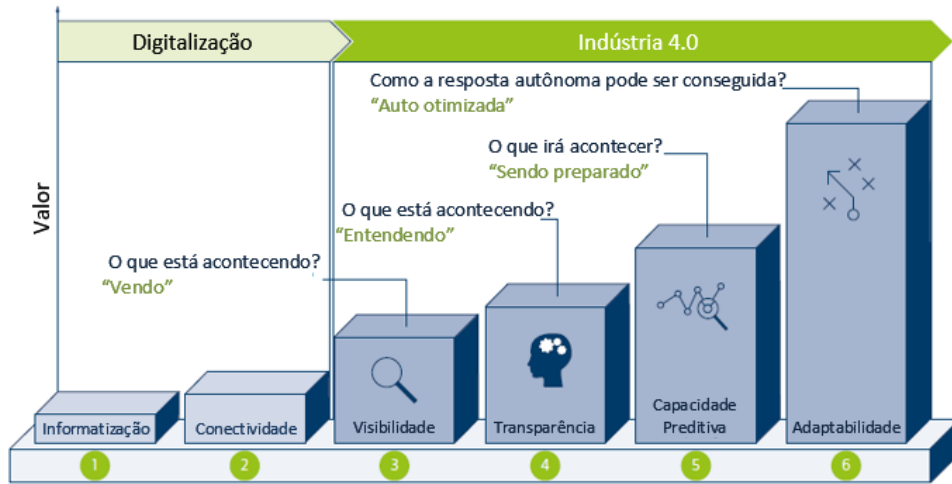
Este índice ajuda as empresas a determinar em qual estágio elas estão atualmente em sua transformação para uma empresa ágil que aprende. Avalia-as a partir de uma perspectiva, tecnológica, organizacional e cultural, com foco nos processos de negócios das empresas de manufatura. As empresas respondem perguntas sobre a sua situação atual, quais são seus objetivos estratégicos nos próximos anos, quais tecnologias e sistemas já estão implementados e como eles operam dentro da empresa. As respostas determinam quais capacidades que a empresa ainda precisa adquirir para obter sucesso para introduzir a I 4.0 (SCHUH *et al.*, 2017).

O índice apresenta seis estágios consecutivos, de acordo com a Figura 7, para quatro áreas-chave de cada empresa. O método para se chegar a um resultado está ilustrado na Figura 8. Ele pode ser utilizado para desenvolver um roteiro digital adaptado às necessidades de cada empresa, a fim de ajudá-las a dominar a transformação digital em todas as unidades de negócios envolvidas (SCHUH *et al.*, 2017).

O Índice de Maturidade da I 4.0 ACATECH está baseado em um conjunto de dados abrangentes e detalha cada estágio. O modelo é cientificamente bem fundamentado e sua estrutura, porém o modelo não aborda quais tecnologias são necessárias, ou

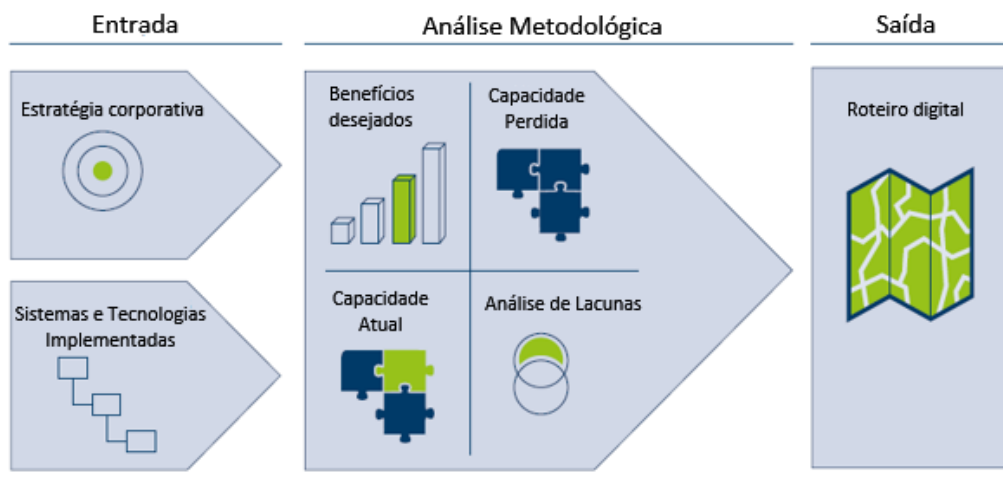
quais são os primeiros passos que a empresa deve dar, para que ela esteja pronta para começar a pensar no desenvolvimento da I 4.0.

Figura 7: Estágios do Modelo de Maturidade ACATECH



Fonte: SCHUH *et al.*, (2017)

Figura 8: Roteiro do Modelo de Maturidade ACATECH



Fonte: SCHUH *et al.* (2017)

2.2.2 Impuls prontidão da I 4.0 (*Industrie 4.0 readiness Impuls*)

Este modelo de prontidão procura esclarecer questões não resolvidas, incertezas e desafios que envolvem a I 4.0. Porque a I 4.0 não acontecerá sozinha. Destaca também os marcos desafiadores que muitas empresas ainda devem passar no caminho para a prontidão da I 4.0. O estudo examina onde as empresas nas áreas de engenharia mecânica e de instalações se posicionam atualmente, enfocando o que os motiva e o que os retém, e as diferenças que surgem entre pequenas e médias empresas, por um lado, e grandes empresas, por outro. Os resultados permitem, pela primeira vez, desenvolver uma imagem detalhada e sistemática da prontidão da I 4.0. no setor de engenharia (LICHTBLAU *et al.*, 2015).

O modelo que foi usado define um total de seis dimensões da I 4.0, cada uma delas classificadas em um dos seis níveis de prontidão (maturidade) da I 4.0, conforme o Quadro 1. Cada uma das seis dimensões possui indicadores detalhados e 18 campos de avaliação, de acordo com a Figura 9 (LICHTBLAU *et al.*, 2015).

QUADRO 1: Dimensões e Níveis de Classificação do Modelo de Prontidão 4.0

QUADRO DAS DIMENSÕES E CLASSIFICAÇÃO DO MODELO DA IMPULS		
DIMENSÃO	NÍVEL DE CLASSIFICAÇÃO	
Estratégia e organização	0	FORA DE CLASSIFICAÇÃO
Fábrica inteligente	1	INICIANTE
Operações inteligentes	2	INTERMEDIÁRIO
Produtos inteligentes	3	EXPERIENTE
Serviços baseados em dados	4	ESPECIALISTA
Funcionários	5	MELHOR DESEMPENHO

Fonte: Adaptado pelo autor de LICHTBLAU *et al.* (2015)

Figura 9: Dimensões e Campos de avaliação da I 4.0



Fonte: LICHTBLAU *et al.* (2015)

O modelo é bem transparente e estruturado, abrangendo seis dimensões de uma empresa. Depois de finalizado, foi feito um *workshop* com empresas líderes da indústria da engenharia mecânica, que trabalharam como parceiros no projeto, pois o modelo limitou-se a ser aplicado nas empresas de engenharia mecânica, o que foi uma das limitações deste modelo. Nota-se, também, como bem ressaltou, Schumacher, Erol e Sihm (2016), tanto maturidade como prontidão são usados como sinônimos, uma vez que no nível 5 a empresa além de pronta já está madura para a I

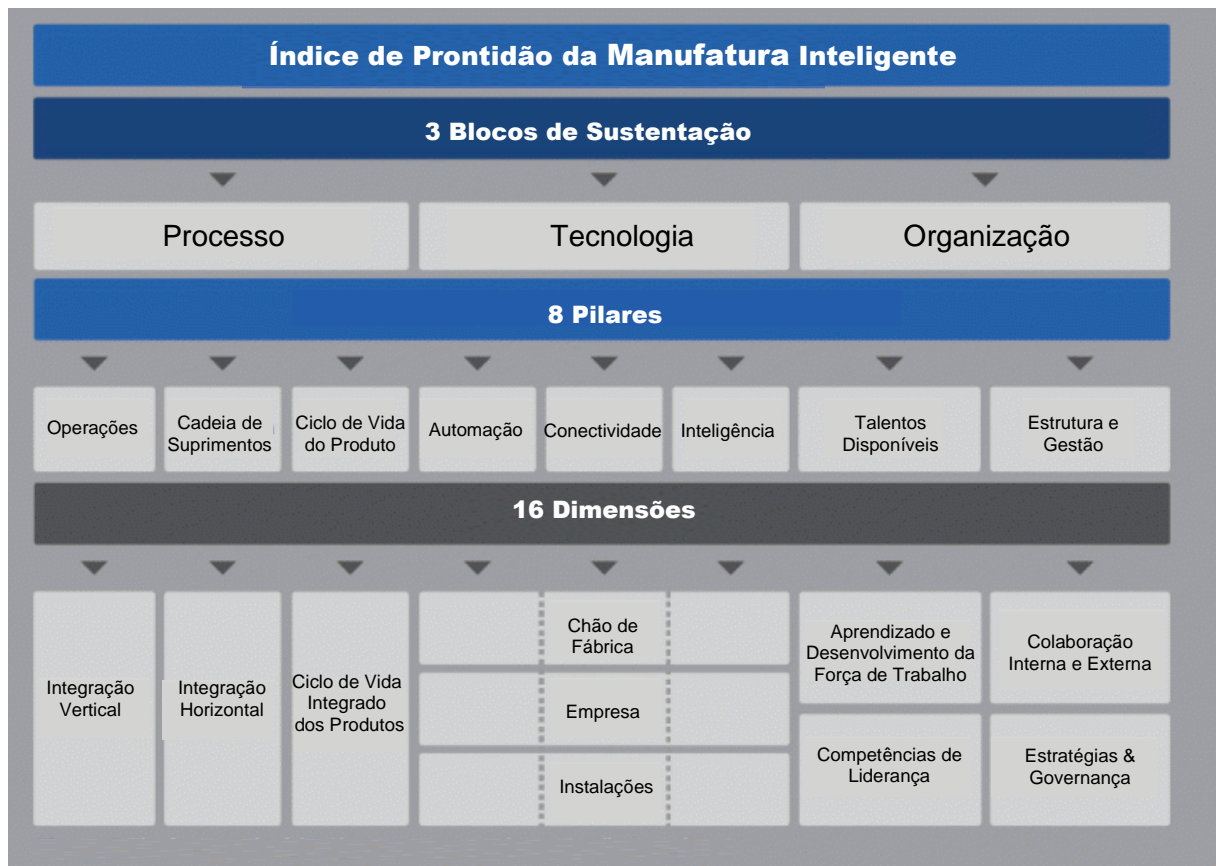
4.0. O modelo da IMPULS é bem fundamentado quanto as estruturas, mas deixa uma lacuna na prontidão quanto as tecnologias habilitadoras da I 4.0.

2.2.3 *Singapore* índice de prontidão da indústria inteligente (*Singapore smart industry readiness index*)

A I 4.0 está agora ganhando impulso globalmente, aumentando consideravelmente o nível de digitalização. Porém ainda existe falta de uma visão clara, estratégica, e um roteiro sistemático, o que dificulta a implantação da I 4.0. O Índice *Singapore* de Prontidão da Indústria Inteligente é uma tentativa deliberada de abordar esses desafios. O Índice foi projetado como uma ferramenta abrangente para todas as empresas, independentemente do seu tamanho ou da indústria em que estão operando (KIANG *et al.*, 2018).

O índice abrange todos os três elementos principais da I 4.0 (Tecnologia, Processo e Organização) e procura encontrar um equilíbrio entre rigor técnico e usabilidade. O índice é composto de três camadas. A camada mais alta é composta de 3 blocos de construção fundamentais da I 4.0: Processo, Tecnologia e Organização. Abaixo destes três blocos de construção fundamentais da I 4.0, na camada intermediária estão oito pilares. Na terceira e última camada, sob os oito pilares, mapeia-se 16 dimensões de avaliação, que as empresas podem usar para avaliar suas instalações próprias, conforme a Figura 10 (KIANG *et al.*, 2018).

Em seu cerne, o Índice *Singapore*, baseia-se na estrutura do RAMI 4.0. Desenvolvido pela *Plattform Industrie 4.0*, uma das maiores redes da Indústria 4.0 no mundo. Hoje, RAMI 4.0 foi formalmente reconhecido, pelos principais especialistas e associações, para ser o modelo de referência de arquitetura, que melhor incorpora os principais conceitos da Indústria 4.0. Além do RAMI 4.0, outra referência utilizada foi o Índice de Maturidade desenvolvido pela Academia Alemã da Ciência e Engenharia (ACATECH) (KIANG *et al.*, 2018).

Figura 10: Framework do Índice de Prontidão *Singapore*

Fonte: KIANG *et al.* (2018)

O modelo *Singapore* que mede o índice de prontidão da indústria inteligente é bem detalhado e tem sua estrutura abrangente, mostrando seu desenvolvimento de forma clara, estruturado com 16 dimensões de avaliação. porém classifica cada dimensão em uma escala de maturidade de zero a cinco, da mesma forma que os modelos da *Acatech* e *Impuls*. selecionando o bloco das tecnologias, foco deste estudo, que tem três pilares (automação, conectividade, inteligência) e nove dimensões, divididas três a três em chão de fábrica, empresa e instalações. onde respectivamente: a produção e gestão de bens é desenvolvida; onde as tarefas administrativas são realizadas; o edifício físico ou local onde produção ocorre. pode-se perceber que o *gap* com relação às tecnologias habilitadoras continua, pois, o modelo não trata de nenhuma delas de

forma isolada ou em conjunto, e sim de maneira genérica, como que, se as empresas já tivessem conhecimento prévio das referidas tecnologias.

O modelo é uma ferramenta para ajudar as empresas a se desenvolverem na I 4.0, porém não se aplica para medir o grau de prontidão da forma como é proposta no presente estudo, adequando-se mais aos outros modelos que medem o grau de maturidade das empresas.

2.2.4 PWC modelo de maturidade

Há uma movimentação de muitas empresas no sentido de digitizar os seus negócios. Mas, com frequência, não existe uma visão sistêmica, e o processo tem início em áreas estanques da organização. O modelo de maturidade da PWC é uma ferramenta que pode ajudar a avaliar o nível de maturidade em todas as áreas da empresa e mostrar os pontos fortes para acelerar os processos que serão integrados em soluções futuras (GEISSBAUER; VEDSO; SCHRAUF, 2015).

Segundo Geissbauer, Vedso e Schrauf (2015), o modelo de maturidade PWC, foi construído para ajudar as empresas na implementação dos conceitos 4.0, a partir da avaliação de sete dimensões que resultam em quatro níveis de maturidade, conforme Figura 11.

O modelo tem uma estrutura semelhante aos modelos já apresentados neste estudo. Além de, não ser muito transparente quanto a sua construção, ele serve somente como uma base comparativa para que a empresa, por si só, se posicione nos níveis demonstrados na Figura 11, em cada uma das sete dimensões classificadas.

Figura 11: Modelo de Maturidade PWC

	1 “Iniciante” digital	2 Integrador vertical	3 Colaborador horizontal	4 Champion digital
Modelo de negócio e acesso de clientes digitais	Primeiras soluções digitais e aplicativos isolados	Portfólio de produtos digitais e serviços com software, rede (M2M) e dados como diferenciais importantes	Soluções de cliente integradas ao longo das fronteiras da cadeia de suprimento, colaboração com parceiros externos	Desenvolvimento de novos modelos de negócio com portfólio inovador de produtos e serviços
Digitização de ofertas de produtos e serviços	Presença on-line separada dos canais <i>off-line</i> , foco no produto e não no cliente	Distribuição multicanal com uso integrado de canais <i>on-line</i> e <i>off-line</i> ; <i>analytics</i> implementado. Ex.: personalização	Abordagem de cliente individualizado e interação com parceiros da cadeia de valor. Interfaces integradas e compartilhadas	Gestão integrada da jornada do cliente ao longo dos canais de vendas e marketing digitais, com empatia do cliente e CRM
Digitização e integração de cadeias de valor verticais e horizontais	Subprocessos digitizados e automatizados. Integração parcial incluindo produção ou com parceiros internos e externos. Processos padrão para colaboração parcialmente definidos	Digitização vertical e processos internos padronizados e harmonizados, fluxo de dados dentro da empresa; integração limitada com parceiros externos	Integração horizontal dos processos e fluxo de dados com clientes e parceiros externos, uso intensivo de dados por meio da integração total de toda a rede	Ecosistema de parceiros integrado, totalmente digitizado, com processos virtualizados e auto-otimizados, foco em competência essencial; autonomia descentralizada. Acesso a um conjunto de informações operacionais quase em tempo real
<i>Data & Analytics</i> como capacidade <i>core</i>	Capacidades analíticas baseadas principalmente em extração de dados semimanual; monitoramento e processamento de dados selecionados, sem gestão de eventos	Capacidades analíticas suportadas pelo sistema de inteligência de negócio isolado (BI); sistemas de apoio a decisão não padronizados	Sistema de BI central, consolidando fontes de informações relevantes, internas e externas. Análises preditivas. Sistemas específicos de apoio à decisão e de gestão de eventos	Uso central de análise preditiva para otimização em tempo real e manipulação automatizada de eventos com banco de dados inteligente e algoritmo de autoaprendizagem, permitindo análise de impacto e apoio à decisão
Arquitetura de TI ágil	Arquitetura de TI fragmentada – <i>in-house</i>	Arquitetura de TI homogênea <i>in house</i> . Conexão entre diferentes cubos de dados em desenvolvimento	Arquiteturas de TI em comum na rede de parceiros. Único <i>data lake</i> interligado com arquitetura de alta performance	<i>Data lake</i> único com funcionalidades de integração de dados externos e organização flexível. Barramento de serviço de parceiro, troca segura de dados
Compliance, segurança, legal e fiscal	Estruturas tradicionais. Digitização fora do foco	Desafios digitais reconhecidos, mas não amplamente abordados	Risco legal consistentemente abordado com os parceiros de colaboração	Otimização da rede da cadeia de valor para <i>compliance</i> , segurança, questões legais e fiscais
Organização, funcionários e cultura digital	Foco funcional em “silos”	Colaboração interfuncional mas não estruturada e realizada de forma inconsistente	Colaboração além das fronteiras da empresa, cultura e incentivo ao compartilhamento	Colaboração como um dos principais fatores de geração de valor

Fonte: Geissbauer; Vedso; Schrauf (2015)

2.2.5 Modelo de maturidade para avaliar a prontidão e maturidade de empresas do setor de manufatura

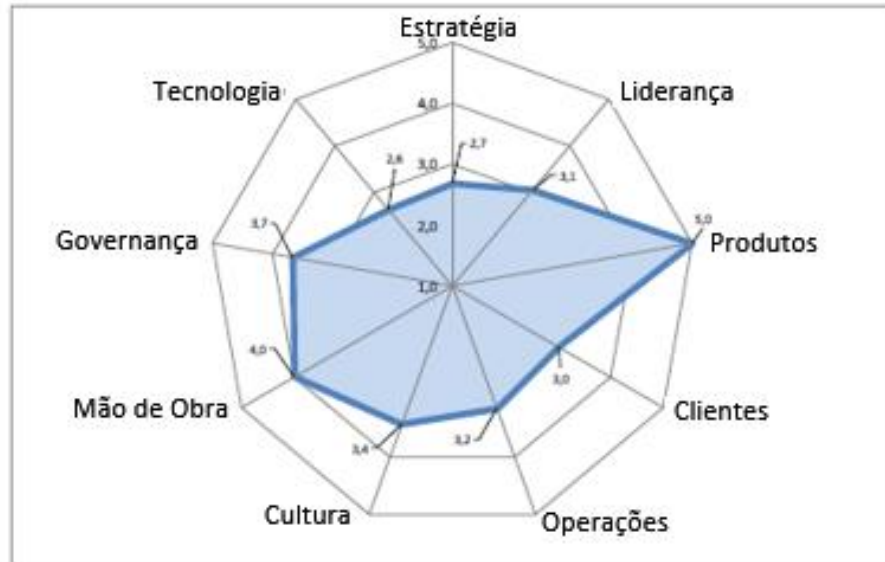
Este Modelo de Maturidade da Indústria 4.0, de autoria de Andreas Schumacher, Selim Erol e Wilfried Sihn, da *Vienna University of Technology, Institut of Management* e da *Fraunhofer Austria Research GmbH*, tem um forte foco nos aspectos organizacionais. Na verdade, é uma extensão dos modelos e ferramentas existentes. Além disso, visa transformar os conceitos abstratos de fabricação inteligente em itens que podem ser medidos em ambientes de produção real. O objetivo deste modelo, visa possibilitar uma empresa poder avaliar rigorosamente sua própria maturidade, com relação à I 4.0 e refletir sobre adequação das estratégias em uso (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016).

A fim de facilitar a análise da maturidade, da I 4.0, o modelo proposto incluiu um total de 62 itens que são agrupados em nove dimensões da empresa. O modelo possui cinco níveis de maturidade, onde o nível 1 descreve uma falta completa de atributos apoiando os conceitos da Indústria 4.0 e o nível 5 representa o estado-da-arte dos atributos obrigatórios (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016).

Os itens foram avaliados por 23 especialistas que responderam a um questionário na escala Likert, onde 1 significa “não é importante” e 4 significa “muito importante”, a média calculada, representando a importância de cada item gerou um fator de ponderação, para o cálculo do Índice de Maturidade de cada dimensão (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016).

De acordo com Schumacher, Erol e Sihn (2016), o modelo foi testado em uma empresa de manufatura, no setor aeroespacial na Áustria. Os autores escolheram uma empresa com conhecimentos prévios da I 4.0. O resultado do grau de maturidade dos nove pilares foi apresentado em gráfico radar, mostrado na Figura 12, acompanhado de um relatório para a empresa.

Figura 12: Gráfico Radar do Grau de Maturidade



Fonte: Schumacher, Erol e Sihn (2016)

O modelo oferece informação sobre a estrutura do modelo e tem seus procedimentos de avaliação transparentes para as empresas que o utilizam. Não foi encontrado o questionário de avaliação das nove dimensões. Apesar de mais simples, na sua aplicação prática, do que os modelos já analisados, na literatura, ele se aplica para medir o grau de maturidade e não o grau de prontidão.

2.2.6 Modelo de maturidade para avaliar a prontidão digital das empresas de manufatura

Este modelo está baseado nos princípios do CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), a proposta é estabelecer um modelo para investigar a maturidade digital das empresas. O modelo está construído com diferentes dimensões, que são usadas para avaliar cinco áreas nas quais os principais processos de fabricação podem ser

agrupados: (1) projeto e engenharia, (2) gerenciamento de produção, (3) gerenciamento de qualidade, (4) gerenciamento de manutenção e (5) gerenciamento de logística. Cada área de processo pode ser considerada como um módulo independente e portanto, é possível adicionar ou remover uma ou mais áreas, caso elas não sejam significativas em determinadas situações industriais sem impacto na fundação da macroestrutura. Cada área é classificada em um dos cinco níveis do CMMI (DE CAROLIS *et al.*, 2017).

O CMMI foi desenvolvido pelo SEI (*Software Engineering Institute*) da Universidade *Carnegie Mellon*, para avaliar as melhores práticas de fornecedores de *software*. Ele é a evolução do seu antecessor CMM - *Capability Maturity Model*, desenvolvido em 1986, é um modelo associado ao gerenciamento de projetos e pode ser aplicado por empresas de qualquer setor. É dividido em cinco níveis: Inicial (1), Repetitivo (2), Definido (3), Gerenciado (4) e, Otimizado (5) (BERSSANETI; CARVALHO, 2015).

Depois de definida a estrutura é feito o levantamento dos níveis de maturidade, de acordo com a classificação do CMMI. O modelo avalia prontidão digital das empresas industriais, por meio de quatro dimensões de análise: Processo, Monitoramento e Controle, Tecnologia e Organização. Assim, o modelo de maturidade avalia a prontidão digital do DREAMY, nome dado ao modelo (**D**igital **RE**adiness **A**ssessment **M**aturit**Y**), nessas quatro dimensões: Processo (1) a maneira como esses processos são realizados; Monitoramento e Controle (2) a maneira pela qual esses processos são monitorados e controlados, incluindo os *feedbacks* recebidos de sua execução; Tecnologia (3) as tecnologias que suportam esses processos; Organizacional (4) as estruturas organizacionais por trás desses processos (DE CAROLIS *et al.*, 2017).

Este modelo não deixa claro como inserir o resultado das avaliações, muito menos como é obtido. No mais segue o padrão de outros modelos analisados com cinco níveis de maturidade, com o diferencial que utiliza como base o modelo da SEI - *Software Engineering Institute*, o CMMI. Considera que a empresa atingiu um nível de maturidade, aquela que chegou ao nível cinco do modelo.

2.2.7 SIMMI 4.0 – *A Maturity model for classifying the enterprise-wide IT and software landscape focusing on industry 4.0*

A crescente digitização dos negócios e da sociedade leva a mudanças drásticas nas empresas. Neste sentido um dos grandes desafios que a I 4.0 traz é a classificação realista da infraestrutura de TI da própria empresa. O SIMMI 4.0, permite esta classificação, ele consiste em 5 etapas, cada qual descreve várias características da digitização. Além de permitir uma autoavaliação por parte da empresa, pode-se recomendar as atividades que possibilitam que a empresa alcance o próximo estágio de maturidade (LEYH *et al.*, 2016).

O SIMMI 4.0 é composto de quatro dimensões as quais permitem que uma empresa avalie seu panorama do sistema de TI. As dimensões definidas são: Integração Vertical (1) que se concentra na troca de informações entre o chão de fábrica com os níveis de cima; Integração Horizontal (2) um fluxo de informações integrado e automatizado entre os departamentos da empresa que vai além das fronteiras da empresa; Desenvolvimento de Produtos Digitais (3) representa cada etapa do processo digitalmente; Critérios de Tecnologia Transversal (4) nesta dimensão avalia-se até que ponto as tecnologias são usadas na indústria 4.0. São avaliadas as seguintes tecnologias: SOA, Computação em Nuvem, *Big Data* e Segurança de TI (LEYH *et al.*, 2016).

O SIMMI 4.0 está dividido em cinco etapas, que são: (1) Nível Básico de Digitalização, significa que a empresa ainda não abordou a Indústria 4.0; (2) Digitalização Interdepartamental, a empresa está ativamente envolvida com tópicos do I 4.0, já implementou a digitização nos departamentos e os primeiros requisitos da Indústria 4.0 foram implementados em toda a empresa; (3) Digitalização Horizontal e Vertical, a empresa é digitalizada horizontal e verticalmente, os requisitos da I 4.0 foram implementado e os fluxos de informação foram automatizados. A empresa estabeleceu a tecnologia SOA; (4) Digitalização Completa, a empresa está completamente digitalizada, até mesmo além fronteiras corporativas e integradas em cadeia de valor. Abordagens da Indústria 4.0 são ativamente seguidas e ancoradas dentro da estratégia corporativa; (5) Digitalização Completa Otimizada, a empresa é uma vitrine para as atividades da I 4.0, isto colabora fortemente com seus parceiros de negócios e, otimiza sua cadeia de valor (LEYH *et al.*, 2016).

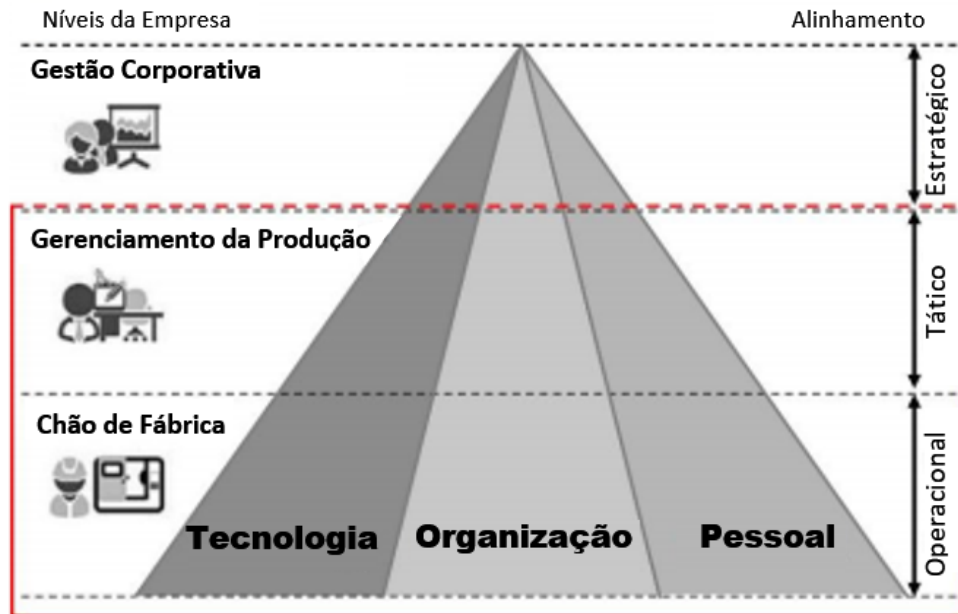
Modelo de maturidade voltado para avaliar um Sistema de TI de uma I 4.0, também baseado nos tradicionais cinco níveis de maturidade. Em momento nenhum mostra como é feita a avaliação, o que demonstra ser subjetiva, sem nenhum critério utilizado. Além disso não houve teste prático do modelo nas empresas.

2.2.8 Conceito de um revolucionário modelo de maturidade baseado na migração para a Indústria 4.0

A transformação de uma empresa na direção da Indústria 4.0 deve levar em conta todas as dimensões sócio-técnicas (Tecnologia, Organização e Pessoal), nas quais este modelo está baseado, em igual medida. Um sistema sociotécnico é uma unidade de produção composta por subsistemas tecnológicos, organizacionais e de pessoal interdependentes. A dimensão tecnologia inclui todos os elementos relacionados à produção operacional ou tarefas administrativas. A dimensão organização compreende essencialmente elementos em todos os níveis da empresa que contribuem para estruturar e regular os processos de trabalho. A dimensão pessoal também inclui elementos relacionados ao próprio pessoal, bem como atividades essenciais de qualificação e participação (STEFAN *et al.*, 2018).

A maioria dos modelos de maturidade não focam em uma área. Este modelo é aplicado somente na área de produção e conforme a Figura 13, dividindo a estrutura da empresa em três níveis, ele é aplicado somente no chão de fábrica (operacional) e no nível gerencial de produção (tático). O modelo avalia a maturidade dentro de 44 critérios, associados a uma das três dimensões sócio técnicas, e dentro de cada critério existe um número variado de características. O modelo provê as explicações de cada critério e característica, porém devido ao grande volume não foram publicados (STEFAN *et al.*, 2018).

Figura 13: Visualização do foco de aplicação do modelo de maturidade



Fonte: Adaptado de Stefan *et al.* (2018)

O modelo da figura 13 tem um enfoque distinto em relação aos cinco níveis de maturidade dos modelos apresentados pela literatura. Ainda não é claro e tão pouco transparente, quanto a definição dos critérios e das características, deixando para a empresa estudada definir as metas, como se ela tivesse conhecimento prévio da I 4.0, e em momento nenhum fala sobre prontidão.

2.2.9 Avaliação do nível de prontidão da Indústria 4.0: Casos da Turquia

Pouca pesquisa foi conduzida para saber das opiniões das empresas sobre os efeitos sócio-econômicos da Indústria 4.0. Nem, tampouco, em avaliar a prontidão da Indústria 4.0 nos países em desenvolvimento. Este modelo contribui com a avaliação de três casos, de empresas turcas, que lidam com as percepções, conscientização e

prontidão das empresas no processo de adaptação da Indústria 4.0 (TEMUR; BOLAT; GOZLU, 2019).

O modelo visa dois objetivos: (1) Avaliação das percepções e conscientização das empresas em termos de fatores socioeconômicos e, (2) Avaliação e cálculo do nível de prontidão, aplicando o modelo IMPULS. A metodologia para obtenção dos resultados é por meio de questionários, que devem ser respondidos pelos coordenadores da Indústria 4.0 de cada empresa. Na primeira parte do questionário, são feitas perguntas para avaliação das percepções e sensibilização das empresas em termos de fatores operacionais e socioeconômicos. Na segunda parte do questionário, são feitas perguntas para avaliação e cálculo do nível de prontidão, aplicando 24 perguntas, distribuídas nas seis dimensões do modelo IMPULS (TEMUR; BOLAT; GOZLU, 2019).

Para a avaliação da prontidão através das dimensões do modelo IMPULS, assume-se que cada um dos fatores de avaliação tem o mesmo peso de importância. No caso do modelo em questão são 24 fatores (perguntas) ($sa_1, sa_2, \dots, sa_{24}$); portanto, cada um deles tem o valor de importância $0,0416$ ($w_1 = w_2 = \dots = w_{24} = 0,0416$). O total de pesos de importância é "1". Sob estas condições, a prontidão da empresa (R_C) é avaliada computando-se a média ponderada dos valores usando a seguinte fórmula:

$$R_C = \frac{w_1 * sa_1 + w_2 * sa_2 + \dots + w_{24} * sa_{24}}{w_1 + w_2 + \dots + w_{24}}$$

Os valores de sa , variam de 1 a 5, em função dos cinco níveis de maturidade do modelo IMPULS. O resultado é colocado em um gráfico radar, conforme a Figura14, de uma das empresas onde foi aplicado o modelo (TEMUR; BOLAT; GOZLU, 2019).

Este modelo tem claro o sentido de prontidão, fazendo a diferenciação entre prontidão e maturidade. Os autores reconhecem que as empresas de países em desenvolvimento, não têm o mesmo entendimento da I 4.0, do que empresas de países desenvolvidos. Porém não mostra o critério utilizado para definir os 24 fatores, que utilizou nas dimensões do modelo da IMPULS, e nem porque eles são variados na distribuição, para cada uma das dimensões. Também não aborda diretamente as tecnologias, que são habilitadoras da I 4.0.

Figura 14: Gráfico radar do nível de prontidão



Fonte: Adaptado de Temur; Bolat; Gozlu (2019).

Outros modelos e ferramentas que foram encontrados na literatura não oferecem detalhes sobre a estrutura e conteúdo, ou são semelhantes aos que foram listados neste estudo e, portanto, não foram considerados. De um modo geral os modelos apresentados neste estudo, têm em comum o fato de não fazerem distinção entre prontidão e maturidade. Além de, terem uma alta complexidade nas soluções apresentadas. Portanto, fica impraticável que as empresas apliquem essas soluções sem uma consultoria externa onerosa. O Quadro 2 resume os modelos de maturidade e prontidão, com um breve resumo das características de cada um, encontrados na literatura.

Quadro 2: Modelos de Maturidade

MODELOS DE MATURIDADE	AUTORES	CARACTERÍSTICAS
ACATECH Índice de Maturidade da I 4.0 (<i>The Acatech Industrie 4.0 Maturity Index</i>)	SCHUH <i>et al.</i> , 2017	Classifica quatro áreas chaves da empresa em seis estágios de maturidade. Esta avaliação é feita a partir de uma perspectiva tecnológica, organizacional e cultural.
IMPULS Prontidão da I 4.0 (<i>Industrie 4.0 Readiness IMPULS</i>)	LICHTBLAU <i>et al.</i> , 2015	Avaliação de 18 itens distribuídos em 6 dimensões que podem variar em seis níveis (0 a 5). Utiliza prontidão e maturidade como sinônimos.
SINGAPORE Índice de Prontidão da Indústria Inteligente (SINGAPORE Smart Industry Readiness Index)	KIANG <i>et al.</i> , 2018	O modelo tem como base três dimensões (tecnologia, processo e organização), onde apoiam-se 8 pilares, sob os pilares mapeiam-se 16 dimensões classificadas em cinco níveis de maturidade.
PWC Modelo de maturidade	GEISSBAUER; VEDSO; SCHRAUF, 2015	Modelo para autoavaliação online em 7 dimensões, que classificam a empresa em 4 níveis de Maturidade e faz a comparação com a situação de outras empresas do mesmo setor.
Modelo de maturidade para avaliar a prontidão e maturidade de empresas do setor de manufatura	SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016	Modelo de maturidade desenvolvido como extensão dos modelos existentes, o modelo inclui 9 dimensões e tem 62 itens distribuídos nestas dimensões. O modelo tem seis níveis de maturidade, que variam de zero a cinco para cada uma das nove dimensões.
Modelo de maturidade para avaliar a prontidão digital das empresas de manufatura	DE CAROLIS <i>et al.</i> , 2017	Modelo de maturidade baseado no CMMI, o modelo avalia cinco áreas que são modulares e são adaptáveis a empresa analisada. Cada área é classificada em um dos cinco níveis do CMMI - <i>Capability Maturity Model Integration</i> .
SIMMI 4.0 – <i>A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0</i>	LEYH <i>et al.</i> , 2016	Modelo voltado para avaliar o sistema de TI de uma indústria 4.0, baseado nos cinco níveis de maturidade. É composto por quatro dimensões: Integração vertical; Integração horizontal; Desenvolvimento de produtos digitais e Critérios de tecnologia transversal.
Conceito de um revolucionário modelo de maturidade baseado na migração para a Industrie 4.0	STEFAN <i>et al.</i> , 2018	Modelo baseado nas dimensões sócio técnicas (tecnologia, organização e pessoal), este modelo é aplicado somente na área de produção, no nível operacional (chão de fábrica) e no nível tático (gerencial). O modelo utiliza 44 critérios de avaliação.
Avaliação do nível de prontidão da Indústria 4.0: Casos da Turquia	TEMUR; BOLAT; GOZLU, 2019	O modelo toma como base os níveis de maturidade e as seis dimensões do modelo da IMPULS, onde distribuem-se 24 fatores que são perguntas relativas as dimensões utilizadas. Ele faz distinção entre maturidade prontidão, porém não aborda as tecnologias habilitadoras.

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0

Neste subcapítulo apresentam-se as tecnologias que a literatura aponta como habilitadoras para a implantação da I 4.0. Da mesma forma que se verificou uma falta de unanimidade na conceituação da I 4.0, aqui também há diversos autores com opiniões diferentes sobre essa questão.

Com base na revisão de literatura cujo método de realização está descrito no Capítulo 4 – Metodologia de Pesquisa, foram identificados 19 artigos que mostram as tecnologias habilitadoras para compor a I 4.0. Uma revisão do conteúdo desse material possibilitou a geração das seguintes observações.

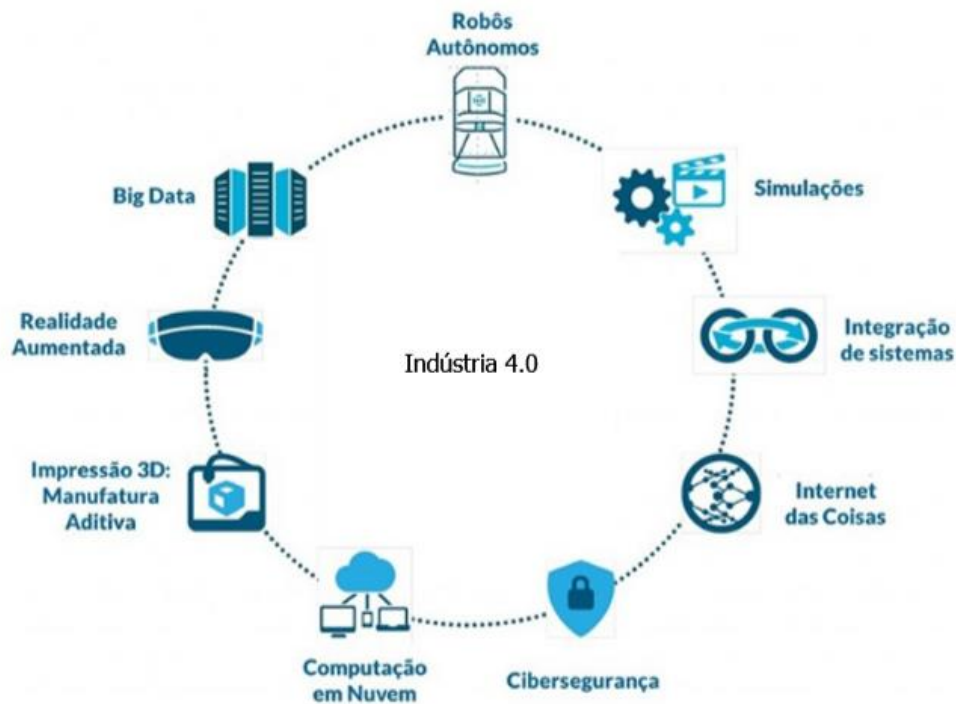
As tecnologias habilitadoras que eles consideram fundamentais, chamada de pilares, para a implantação da I 4.0 estão mostradas na Figura 15. Como se observa elas são: *Big Data*, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva (AM), Simulação, IoT, Robô Autônomo, Realidade Aumentada (AR), Segurança Cibernética e Integração Vertical e Horizontal (GERBERT *et al.*, 2015).

Segundo Gerbert *et al.* (2015), *Big Data* envolve o armazenamento de grandes conjuntos de dados e a produção de informações estruturadas no contexto da Indústria 4.0. Pode-se coletar e avaliar dados de muitas fontes diferentes, em grande velocidade para apoiar a tomada de decisões em tempo real. Já os Robôs Autônomos ou colaborativos (Cobots), não são novidade para as indústrias, pois há algum tempo elas lidam com eles. Porém no ambiente da I 4.0, os robôs estão evoluindo para uma utilidade ainda maior. Eles estão se tornando mais autônomos, flexíveis e cooperativos. Eventualmente, eles vão interagir uns com os outros e trabalhar em segurança lado a lado com os humanos aprendendo com estes.

Na fase de engenharia, as simulações tridimensionais de produtos, materiais e processos de produção já são utilizadas, mas, na I 4.0, elas serão utilizadas também nas operações da fábrica. Essas simulações irão alavancar dados em tempo real para espelhar o mundo físico em um modelo virtual, que pode incluir máquinas, produtos e humanos. Isso permite que os operadores testem e otimizem as configurações da máquina, do próximo produto em linha, no mundo virtual antes da aplicação física da operação. Também, na I 4.0 haverá a Integração de Sistemas Horizontais e Verticais, ou seja, toda a empresa estará integrada verticalmente em todos os seus níveis, ao

mesmo tempo em que todas as empresas da cadeia de valor, do início ao fim, estarão integradas horizontalmente, o que permitirá ter uma cadeia de valor completamente automatizada (GERBERT *et al.*, 2015).

Figura 15 - Os nove pilares da Indústria 4.0



Fonte: Gerbert *et al.* (2015)

Atualmente apenas alguns dos sensores e máquinas nas fábricas estão em rede e fazem uso de computação embarcada. Eles são tipicamente organizados em uma pirâmide de informações em que os sensores e dispositivos de campo com inteligência e controladores de automação alimentam um sistema abrangente de controle de processo de manufatura. Mas com a Internet Industrial das Coisas (IIoT), mais dispositivos, incluindo produtos inacabados, serão enriquecidos com computação embutida e conectados usando protocolo padrão. Isso permite que dispositivos de campo se comuniquem e interajam uns com os outros e com controladores mais centralizados. A segurança cibernética também deve ser incrementada com o desenvolvimento da I 4.0. O uso de protocolos padrão e o aumento drástico das conectividades, levarão as indústrias a buscar cada vez mais proteção para os seus

sistemas industriais. Portanto, as comunicações devem ser confiáveis, bem como, o gerenciamento de máquinas e a identidade dos usuários (GERBERT *et al.*, 2015).

A tecnologia de Computação em Nuvem, assim como as demais já veem sendo usadas por várias empresas. Porém com I 4.0 será exigido maior compartilhamento de dados, com conectividade além dos limites da empresa. Por isso, o desempenho da Computação em nuvem deverá melhorar, atingindo tempos de reação de apenas alguns milissegundos, permitindo mais serviços orientados a dados para produção (GERBERT *et al.*, 2015).

Por fim, segundo Gerbert *et al.* (2015), a tecnologia de Manufatura Aditiva (AM), ou impressão 3D, será amplamente utilizada na I 4.0 para produzir pequenos lotes de produtos personalizados que oferecem vantagens de construção, como em peças de designs complexos. Enquanto a tecnologia de AR, proporcionará aos operadores uma vasta quantidade de informação obtidas por meio de dispositivos móveis o que permitirá agilizar a tomada de decisões e os procedimentos de trabalho.

Várias tecnologias estão presentes na I 4.0, Coelho (2016) focou as que considerou como sendo os principais pilares dessa indústria: *Big Data*, a IoT, IoS e CPS. Para esse autor, o termo *Big Data* refere-se a grandes quantidades de dados que são armazenados e disponibilizados em tempo real. Esses dados resultam da existência de milhões de sistemas atualmente conectados produzindo dados a cada instante, por meio da IoT.

O termo IoT refere-se a objetos físicos e virtuais ligados à internet. Esse conceito foi desenvolvido no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), em 1999, durante um desenvolvimento na área da Identificação por Rádio Frequência (RFID). Ao longo dos anos pelo surgimento de sensores cada vez menores e mais baratos, telefonia móvel, conexões sem fio, bem como computação em nuvem, essa tecnologia tem tomado um grande impulso, e já faz parte do nosso dia a dia. Por isso, as empresas irão utilizar a Internet para fornecer todo o tipo de serviço. Essa nova abordagem, uma evolução natural da IoT, é a IoS, com o objetivo de criar serviços de valor perceptível para o cliente (COELHO, 2016).

Outra tecnologia citada por Coelho (2016) é o CPS, como sendo sistemas que geram uma interação entre redes de comunicação, computadores e processos físicos influenciando-se mutuamente de forma efetiva e em tempo real. O coração dos

Sistemas Físicos Cibernéticos são os sistemas de computação embarcados, que são sistemas de processamento de informação embutidos em outros produtos ou equipamentos principais. De uma forma genérica o autor propõe, que os Sistemas Embarcados, mais Ambiente Físico, são iguais aos Sistemas Físicos Cibernéticos.

Berger (2016) define as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 como: *Big Data*, Robô Autônomo, Integração Vertical e Horizontal, IoT, AM, Segurança Cibernética, AR, Computação em Nuvem e RFID.

Os mesmos conceitos, com relação as tecnologias, descritos acima, por Gerbert *et al* (2015), são compartilhados, por Berger (2016), que acrescenta uma tecnologia. Ele considera a RFID, como uma tecnologia que compõe a I 4.0, ela possibilita a conectividade com componentes, por meio de *tags*, etiquetas colocadas nos produtos e componentes que possuem informação dos mesmos e são identificadas por meio de rádio frequência.

Segundo Guoping, Yun e Aizhi (2017), a tecnologia digital é a força motriz fundamental para a I 4.0. Eles consideram as seguintes tecnologias estabelecidas para a I 4.0: IoT, Inteligência Artificial (AI), *Big Data*, Computação em Nuvem, Plataforma Digital e AM, também mencionam as tecnologias do campo da biologia e do carro autônomo, que não foram consideradas por não se tratar do tema deste estudo. A ideia básica da IoT é a comunicação, generalizada, de coisas que rodeiam as pessoas para alcançar objetivos comuns. As maiores características da IoT são a integração de várias tecnologias de rastreamento, como sensores sem fio de atuadores de rede, podendo identificar, localizar, rastrear, bem como monitorar e controlar, autonomamente, eventos e objetos em tempo real.

A AI é uma tecnologia que tem sido usada para simular o processo de pensamento e comportamento (como estudar, raciocinar, pensar e planejar) de seres humanos. Habilita as máquinas ou sistemas inteligentes nas fábricas a serem semelhantes ao cérebro humano. Máquinas que apreendem é uma das áreas de maior aplicação dentro do campo da AI. Já *Big Data* e Computação em Nuvem são outras tecnologias destacadas. O *Big Data* é definido como sendo a teoria 4V: volume; velocidade; variedade e veracidade dos dados. Embora a análise de grande volume de dados, possa implicar uma enorme quantidade de *hardware*, a Computação em Nuvem será capaz de armazenar grandes quantidades de dados, com a utilização de menos *hardware*, com rápidas respostas (GUOPING; YUN; AIZHI, 2017).

Quanto a Plataforma Digital, de acordo com Guoping, Yun e Aizhi (2017), também considerada uma tecnologia da I 4.0, é o compartilhamento, em escala global, de um serviço terceirizado a fim de baratear o custo da digitização. Finalmente, a AM ou impressão em 3D, é uma tecnologia que cria um objeto físico tridimensional moldando camada sobre camada a partir de um desenho ou modelo digital 3D.

Os quatro principais componentes do I 4.0 são: CPS, IoT, IoS e Fábrica Inteligente. Além disso, a I 4.0 é baseada em Computação Móvel, Computação em Nuvem, e *Big Data*. A importância da Computação em Nuvem e da Computação Móvel para I 4.0 está na provisão de serviços, que podem ser acessados globalmente pela Internet (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

As fábricas inteligentes terão processos de manufatura mais inteligentes, flexíveis e dinâmicos, equipadas com sensores e sistemas autônomos. Máquinas e equipamentos terão a capacidade de melhorar os processos por meio de auto otimização e tomada de decisão autônoma. Ainda, os Sistemas Físicos Cibernéticos conectarão computadores e processos físicos, por meio de redes e irão monitorar e controlar os processos físicos, com *loops* de *feedback* nos quais os processos físicos conversam com os computadores e vice-versa. Não foram encontradas nessa referência definições específicas para as outras tecnologias mencionadas (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

Bortolini *et al.* (2017) indicam que a I 4.0 é caracterizada pela digitização do processo de fabricação que se baseia nas tecnologias habilitadoras mostradas na Figura 16.

A IoT é a onipresença, inclusive no ambiente industrial, de várias coisas ou objetos capazes de cooperar e interagir uns com os outros para um propósito comum. Estes objetos heterogêneos interconectados geram uma variedade de dados, em grande volume, não estruturados, em alta velocidade, com grande valor agregado que são definidos como *Big Data*. Essa rápida geração de dados e as necessidades da análise rápida, de maneira assertiva, utiliza poderosas e versáteis meta-heurísticas, para simular a situação de forma virtual, otimizando as decisões em tempo real. Todas essas informações ficam no novo modelo de computação, chamado Computação em Nuvens, que pode armazenar e analisar os enormes conjuntos de dados típicos das aplicações da I 4.0 (BORTOLINI *et al.*, 2017).

Figura 16: Tecnologias da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Bortolini *et al* (2017)

Para gerenciar a interconexão entre os ativos físicos do chão de fábrica, os quais possuem sensores para receber os dados em tempo real, e os dados computacionais, é necessária uma arquitetura apropriada chamada CPS. Os sensores inteligentes adquirem dados precisos e confiáveis de vários dispositivos. Então, esses dados são transformados em informações significativas que são coletadas em um *hub* (concentrador) central. Análises específicas são implementadas para gerar conhecimento do sistema monitorado e para apoiar o processo de decisão dos usuários no chão de fábrica (BORTOLINI *et al.*,2017).

As máquinas que aprendem envolvem clusters de algoritmos computacionais no campo da AI. São projetados para aprender e executar tarefas de forma autônoma, cujo processo de aprendizado é tipicamente baseado em dados históricos usados em uma fase de treinamento. Com base nesses exemplos, as máquinas preveem valores

futuros que auxiliam processos autônomos de decisão, sem a intervenção humana (BORTOLINI *et al.* 2017).

Existem mais três tecnologias de *hardware* para a I 4.0. Os *Cobots*, ou seja, robôs colaborativos, que representam uma nova geração de robôs industriais que cooperam ativamente com os operadores durante as atividades de trabalho. No sistema de compartilhamento de local de trabalho, humano e robô podem realizar conjuntamente atividades com interação limitada. A segunda tecnologia de *hardware* para I 4.0 é a AR que amplia as informações do ambiente circundante de um humano interagindo com objetos virtuais, objetos estes que coexistem no mesmo espaço do ambiente real, e em tempo real (BORTOLINI *et al.* 2017).

Por fim, Bortolini *et al.* (2017) nos descrevem a terceira tecnologia de *hardware* que é a AM, como um processo de fabricação de objetos de modelos 3D adicionando camada por camada de material. Essa tecnologia minimiza o desperdício de matéria-prima e é capaz de fabricar objetos complexos sem soldas e usinagens, promovendo a produção sob encomenda de produtos personalizados.

A I 4.0 é a superposição de vários desenvolvimentos tecnológicos que envolvem produtos e processos, relacionada com o chamado CPS e que descrevem a conexão entre fluxos de trabalho digitais e físicos. Isso significa que as etapas de produção física são acompanhadas por processos baseados em computador. CPS são fundamentados na Internet, usada como um meio de comunicação. Outra tecnologia relacionada com a IoT, definida como o acesso onipresente a objetos na internet, é a IoS que busca uma abordagem semelhante com serviços em vez de objetos físicos (SCHMIDT *et al.*, 2015).

Tecnologias importantes para a I 4.0 são Computação Móvel, Computação em Nuvem e *Big Data*. A importância de computação em nuvem e computação móvel para a I 4.0 não é tanto para fornecer capacidade de computação escalável, ou seja, sua capacidade de suportar um aumento de carga quando for requerido, mas sim na prestação de serviços que podem ser acessados globalmente pela Internet. Assim, os serviços de suporte podem ser facilmente integrados e usados (SCHMIDT *et al.*, 2015).

Já segundo a CNI (2016), as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 estão relacionadas na Figura 17. No entanto, não foi apresentado na publicação da CNI, os conceitos de cada uma das tecnologias.

Este novo paradigma industrial, a I 4.0, envolve mudanças rápidas e disruptivas, que abrange um conjunto de desenvolvimentos tecnológicos, como o CPS, IoT, IoS, Robótica, *Big Data*, Computação em Nuvem e AR, que influenciarão tanto os produtos quanto os processos, permitindo melhorias de eficiência e produtividade entre as empresas que irão adotar tais tecnologias (PEREIRA; ROMERO, 2017).

Figura 17: Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0



Fonte: CNI (2016)

Na I 4.0 será predominante o CPS, para processos de manufatura e a IoT e a IoS para processos industriais. O CPS pode ser descrito, fundamentalmente, como um sistema embarcado que troca dados em uma rede inteligente propiciando uma produção inteligente. Quando o CPS está conectado à Internet, é frequentemente conhecido como “Internet das Coisas”. Este um termo emergente que combina diferentes tecnologias e abordagens, com base na conexão entre as coisas físicas e a Internet. Os objetos inteligentes são a base da IoT, uma vez que esse novo paradigma consiste em dotar os objetos do cotidiano com inteligência, permitindo-lhes não apenas coletar informações e interagir com seu ambiente, mas também estar interconectado com outros objetos, trocando dados e acionando ações através da Internet (PEREIRA; ROMERO, 2017).

O conceito de IoS, surgiu recentemente e trará novas oportunidades para a indústria de serviços, já que fornece uma base comercial e técnica para a criação de redes de negócios entre provedores de serviços e clientes. Esse conceito busca uma abordagem semelhante da IoT, porém aplicado a serviços ao invés de objetos físicos (PEREIRA; ROMERO, 2017).

Zhong *et al.* (2017) descrevem algumas tecnologias chaves para a I 4.0, entre elas, a IoT, a Computação em Nuvem, o *Big Data*, o CPS e outras TICs. A Internet das Coisas refere-se a um mundo integrado por redes, em que vários objetos são incorporados com sensores eletrônicos, atuadores ou outros dispositivos digitais para que possam ser ligados em rede e conectados com o objetivo de recolher e trocar dados.

O CPS é um sistema por meio do qual objetos físicos e *softwares* estão interligados, permitindo que diferentes componentes interajam uns com os outros, de maneiras variadas para trocar informações, em uma relação altamente coordenada e combinada. Um CPS envolve grande número de sensores e várias disciplinas, como a teoria da cibernética, engenharia mecânica e mecatrônica, ciência da computação, gestão de projeto e processos de sistemas de manufatura (ZHONG *et al.*, 2017).

A Computação em Nuvem é um termo geral que se refere ao envio de dados computacionais, por meio da internet de recursos escalonáveis. A escalabilidade dos recursos torna a Computação em Nuvem interessante para os empresários, pois permite que as organizações evoluam de acordo com a necessidade de mais recursos. As organizações de todos os tipos e tamanhos estão adotando a computação em nuvem para aumentar sua capacidade em tecnologia com um investimento mínimo em infraestrutura e pessoal capacitado e sem investir no licenciamento de novos *softwares* (ZHONG *et al.*, 2017).

Com o impulso da IoT, os dados, nas indústrias, estão se tornando cada vez mais acessíveis e ubíquos. Esses decorrem de vários canais, incluindo sensores, dispositivos, vídeo / áudio, redes, arquivos de log, aplicativos transacionais, a web, e feeds de mídia social. Nestas circunstâncias, um grande ambiente de dados, denominado *Big Data* foi gradualmente se formando para que eles pudessem ser processados adequadamente para fornecer informação correta para o propósito certo no momento certo. Em um ambiente de *Big Data*, os *softwares* de análise podem fornecer informações que não seriam possíveis de conseguir pelos meios convencionais como feedback e registros históricos (ZHONG *et al.*, 2017).

Zhong *et al.* (2017) também se referem às Tecnologias de Informação e Comunicação, como sendo uma área estendida da Tecnologia da Informação (TI). Eles destacam as comunicações unificadas e a integração de telecomunicações, bem como outras tecnologias capazes de armazenar, transmitir e manipular dados ou informações. As TICs concentram-se na transferência da informação por meio de vários meios eletrônicos, com ou sem fio, sendo crucial na fabricação inteligente, onde tanto as operações de produção como tomadas de decisões necessitam confiar completamente nos dados. Na Europa as TICs são consideradas como um dos fatores de sucesso para uma manufatura competitiva, já que ajudam as empresas a melhorarem a agilidade, a flexibilidade e a produtividade dos negócios.

A I 4.0 refere-se à integração de diversas tecnologias e agentes com o objetivo comum de melhorar a eficiência e capacidade de resposta de um sistema de produção. A fabricação inteligente nada mais é do que a implementação da I 4.0 no chão de fábrica. Algumas das tecnologias que estão associadas a essa revolução, e que habilitam a I 4.0 são: a IoT, *Big Data*, CPS, Máquinas que Aprendem, AM e *Cobots* (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

A IoT é uma das principais tecnologias para a I 4.0. Com o barateamento dos sensores e processadores e a geração de grande quantidade de dados, que agora são ubíquos, ou seja, onipresentes em todas as operações da produção, houve considerável diminuição nos custos. Por meio da IoT será possível a interoperabilidade da informação dentro de uma organização e com o mundo exterior. Esta tendência deverá mudar as relações entre clientes, fabricantes e fornecedores. Em complementação, a Computação em Nuvem será utilizada com o paradigma de borda ou computação de borda para alavancar o armazenamento e processamento de vários dispositivos conectados por meio da IoT, reduzindo a carga de trabalho na nuvem, descentralizando os dados na nuvem permitindo mais rapidez e escalabilidade (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

Os processos de AM têm um fluxo de dados digital que transforma as matérias-primas em peças finais. Um modelo 3D digital da peça que será fabricada, inicia o processo. A seguir, com utilização de *softwares* específicos para a AM, acrescentam-se estruturas de suporte, que evitam a utilização de ferramentas especiais. Na sequência o modelo digital é fatiado para criar instruções para a máquina fabricar o objeto. A AM

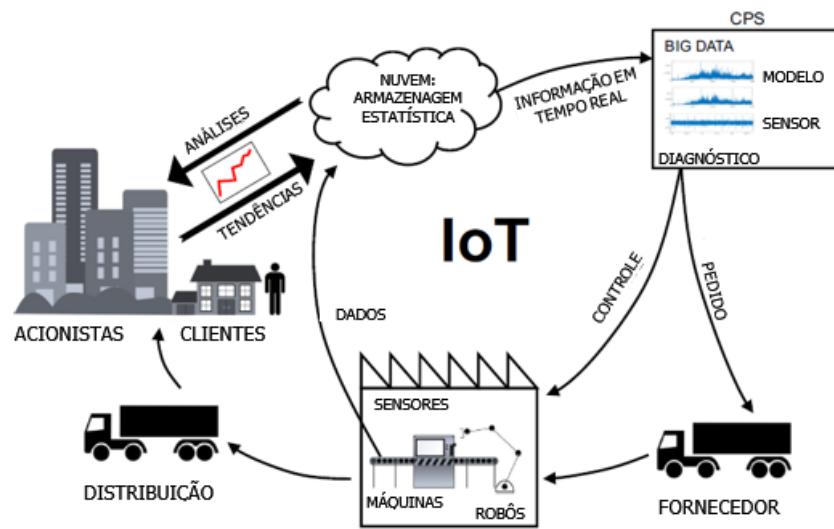
tem uma grande aplicabilidade em objetos com alto nível e personalização (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

No coração do ambiente da I 4.0 está a capacidade de medir e registrar parâmetros, dados, na elétrica e na mecânica, bem como, fenômenos químicos e magnéticos nos processos industriais. Máquinas que aprendem são um grupo de técnicas de computador que se concentram na extração do conhecimento tácito e tomar decisões apropriadas do *Big Data*, este último sendo um grande volume de dados, estruturados e não estruturados, que podem ser obtidos em uma fábrica a qualquer momento. Os CPS combinam estatísticas, modelagem computacional, e dados em tempo real extraídos de sistemas físicos, para modelar a resposta de um sistema sob vários cenários para tomar a melhor decisão no chão de fábrica, em tempo real (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

Ainda para Ahuett-Garza e Kurfess (2018), o objetivo final é melhorar a eficiência, em todos os níveis de um sistema industrial. Gêmeos digitais (*digital twins*), ou seja, simulações do ambiente físico em realidade virtual, são exemplos de CPS que modelam, monitoram e preveem o desempenho de uma máquina no nível mais simples. Em princípio, fábricas completas podem ter seu gêmeo digital, no entanto, a tarefa de desenvolver um CPS, para estas condições, é extremamente desafiadora. Finalizando, esses autores ainda citam a Robótica e o *Big Data* como tecnologias importantes para a I 4.0, porém não entram em nenhum detalhamento específico para essas tecnologias, a Figura 18 explicita a ideia dos autores com relação a I 4.0.

A I 4.0 está centrada na digitização de ponta a ponta de todos os ativos físicos, na integração com os sistemas digitais e com uma ampla gama de novas tecnologias para criar valor. A I 4.0 é impulsionada por: Digitização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal; Digitização de produtos e ofertas de serviços e Modelos de negócios digitais e acesso de cliente. Produtos e serviços digitais frequentemente procuram oferecer aos clientes soluções completas em um ecossistema digital distinto (GEISSBAUER; VEDSO; SCHRAUF, 2016).

Figura 18: Tecnologias habilitadoras e elementos da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Ahuett-Garza e Kurfess (2018)

Ela é impulsionada pelas tecnologias: IoT, Tecnologias de Localização, Cobots, Segurança Cibernética, AM, Sensores Inteligentes (RFID), *Big Data*, Integração Vertical e Horizontal, AR, Computação em Nuvem, Computação Móvel, conforme ilustra a Figura 19 (GEISSBAUER; VEDSO; SCHRAUF, 2016).

Geissbauer, Vedso e Schrauf (2016) não apresentam nenhuma explicação sobre detalhes das tecnologias apontadas para suportar a I 4.0.

Os conceitos da I 4.0 envolvem a integração das tecnologias físicas e digitais com as fases do produto. No que diz respeito a I 4.0, a Internet Móvel é uma das tecnologias vitais para um ambiente de produção conectado, por exemplo, em relação à captura e acessibilidade de dados em tempo real. A Computação em Nuvem descreve as soluções de aplicativos, plataforma e infraestrutura entregues como serviços através de redes públicas ou privadas, com base no pagamento de acordo com o uso (SANTOS *et al.*, 2017).

O CPS produzirá grandes quantidades de dados que precisam ser armazenados e processados. Os resultados da análise precisam estar acessíveis em qualquer lugar do mundo, a qualquer momento. Tanto o *Big Data* como a Computação em Nuvem

permitem esse fluxo sem fronteiras de dados como um aspecto vital da I 4.0 (SANTOS *et al.*, 2017).

Figura 19: Framework da Indústria 4.0 e Tecnologias Digitais



Fonte: Geissbauer, Vedso e Schrauf (2016)

A Comunicação Máquina a Máquina (M2M) é uma tecnologia que permite o intercâmbio automatizado de informações entre o CPS e o ambiente de produção, por meio da tecnologia avançada de aplicações embarcadas de sensor e atuador, todo o chão de fábrica pode retransmitir informação significativa, pela IoT, formando a interface entre os mundos físico e virtual. A tecnologia de AM, refere-se à produção de objetos tridimensionais diretamente de modelos virtuais, as recentes inovações têm possibilitado o seu uso industrial em maior escala, aumentando a velocidade e os materiais utilizados (SANTOS *et al.*, 2017).

As tecnologias habilitadoras da I 4.0, mostradas na Figura 20 são: o CPS que é uma nova geração de sistema automatizado que provê a integração do mundo físico (sistemas reais) com o ciberespaço (infraestrutura de computação e comunicação); a

IoT, uma conectividade avançada de dispositivos, sistemas e serviços, ou seja, uma interconexão de objetos físicos (sensores, máquinas, carros, edifícios e outros itens) que permite interação e cooperação desses objetos para coletar e trocar dados pela Internet; o *Big Data* que consiste em alto volume, alta veracidade e / ou alta variedade de dados, estruturados ou não-estruturados que são produzidos por sensores inteligentes, dispositivos, arquivos de log, vídeo e áudio em tempo real; a Computação em Nuvem, que possibilita arquivar grande quantidade de dados e disponibilizar em tempo real em qualquer lugar (Chhetri *et al.*, 2017).

Figura 20 – Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Chhetri *et al.* (2017)

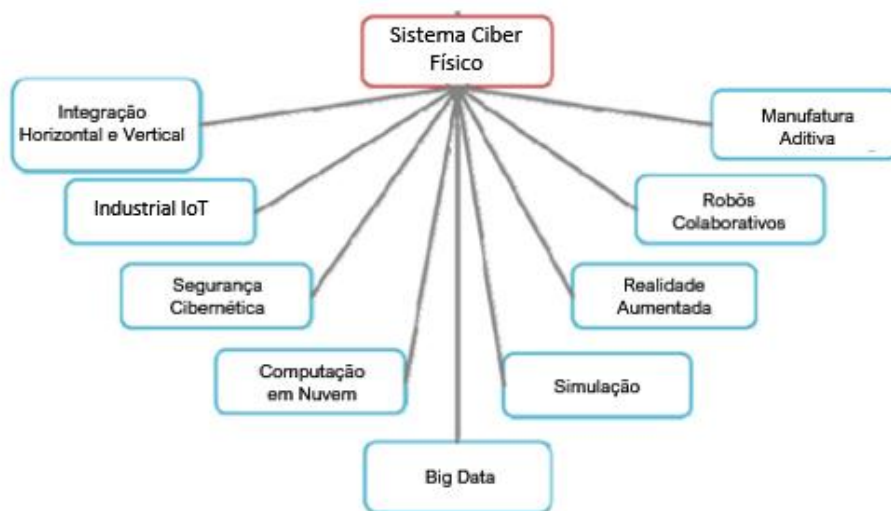
Além disso Chhetri *et al.* (2017), citaram a AM, cujo valor, na I 4.0, será a fabricação descentralizada e flexível com personalização e redução de energia; Sensores Inteligentes: que além de desempenharem o papel de medição, também têm seus próprios microcontroladores ou processadores de sinal digital para realizar processamento complexo de sinal; as máquinas que aprendem, uma evolução da automação, onde as máquinas se comunicam entre si e tomam suas próprias decisões sem a interferência humana; Robótica Avançada: nos últimos anos, há uma enorme quantidade de avanço no campo da robótica, robôs inteligentes foram propostos para não só lidar com as tarefas complicadas mas também aprender com os erros do outro

e melhorar seu desempenho e a AR, uma promessa tecnológica para I 4.0, proposta para melhorar a manutenção e suporte procedimento na fabricação de produtos de alta qualidade.

As tecnologias *Big Data*, Computação em Nuvem, Sensores e Atuadores, RFID, Veículos Autônomos, e AR. Além da IoT, CPS, M2M, são consideradas tecnologias habilitadoras da I 4.0 (DOMBROWSKI; RICHTER; KRENKEL, 2017).

As tecnologias que habilitam a implantação da I 4.0, ilustradas na Figura 21 são: CPS, Integração Vertical e Horizontal, IoT, Segurança Cibernética, AR, Cobots, Simulação, Computação em Nuvem e *Big Data* (LIU; XU, 2017).

Figura 21: Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Liu e Xu (2017)

O conceito do CPS, ainda suscita muitas discussões e caminha em muitas direções quanto a sua arquitetura. Enquanto, *Big Data* associado à análise desempenha um papel significativo no contexto da Indústria 4.0. A tecnologia da Computação em Nuvem pode ser amplamente utilizada na I 4.0 para aumentar o compartilhamento de dados entre as empresas, melhorar o desempenho do sistema (como maior agilidade e flexibilidade) e reduzir custos. Por meio da IoT, toda essa conexão é possível em tempo real (LIU; XU, 2017).

As principais tecnologias da I 4.0, são, o CPS, a Computação Móvel, a Computação em Nuvem, o *Big Data*, o IoT e o RFID, pois são capazes de fornecer dados e serviços poderosos e precisos para a I 4.0. Como uma tecnologia emergente, os Sistemas Físicos Cibernéticos, vão oferecer soluções promissoras para transformar a operação de muitos sistemas industriais existentes. CPS são sistemas de automação industrial, que integram funcionalidades inovadoras, por meio de redes para permitir a conexão das operações da realidade física com a computação. e infraestruturas de comunicação (LU, 2017).

O sistema de monitoramento preditivo é uma tendência do ambiente de fabricação inteligente. A abordagem para simplificar o problema de agendamento do trabalho do chão de fábrica, é utilizar o RFID para coletar dados de fabricação em tempo real. A IoT é utilizada para integrar estes dispositivos equipados com capacidades de detecção, identificação, processamento e comunicação. Um sistema IoT consiste em Redes Industriais sem fio e IoT. Isto inclui máquinas e equipamentos, redes, a nuvem e terminais (LU, 2017).

Na I 4.0 e *Made in China 2025*, muitas aplicações requerem uma combinação de novas tecnologias emergentes. Tais tecnologias são originárias de diferentes disciplinas, incluindo o CPS, IoT, Computação em Nuvem, Integração Industrial, Arquitetura Empresarial, Arquitetura Orientada a Serviços (SOA), Gerenciamento de Processos de Negócio, Integração da Informação Industrial e outras (XU; XU; LI, 2018).

Na Indústria 4.0, espera-se que a IoT ofereça soluções transformadoras, para a operação de muitos sistemas industriais existentes nas empresas digitais. Mais notavelmente, a IoT pode permitir a criação de redes virtuais para suportar a fábrica na I 4.0. Da mesma forma a fabricação baseada em nuvem é uma tecnologia que pode contribuir significativamente para a realização do I 4.0. Nela um grande volume de dados pode ser carregado em um centro de Computação em Nuvem para armazenamento e computação, o que facilita a fabricação e produção. A fabricação baseada em nuvem é uma tecnologia em ascensão que pode contribuir significativamente para a realização da I 4.0 (XU; XU; LI, 2018).

Os avanços no CPS permitirão capacidade, adaptabilidade, escalabilidade, resiliência, segurança, segurança e usabilidade que excederá em muito os sistemas embutidos simples de hoje. Os CPS são sistemas que dependem da integração

perfeita de algoritmos computacionais e componentes físicos. Seu desenvolvimento impulsionará inovações em setores como manufatura, energia, transporte, agricultura, automação e saúde (XU; XU; LI, 2018).

A SOA é uma tendência predominante na integração de sistemas heterogêneos. Ela recebeu uma ótima atenção de empresas interessadas em implementar a I 4.0. A I 4.0 cria um ambiente físico cibernético de produção, que permite a comunicação e interação entre todos os envolvidos na criação de valor cadeia (XU; XU; LI, 2018).

Apesar de existirem várias listas de tecnologias, produzidas pelas mais diversas fontes, Schwab (2016), fez sua seleção de tecnologias, as quais ele chamou de Impulsionadores, baseada, nas diversas discussões no Fórum Econômico Mundial de 2016. Ele dividiu os Impulsionadores tecnológicos da I 4.0 em três categorias: a física, a digital e a biológica.

A categoria física contempla: os Veículos Autônomos, que vão melhorando à medida que a AI, vai se desenvolvendo. A Impressão 3D, ou AM, que imprime um objeto físico em três dimensões camada por camada a partir de um desenho em 3D. A Robótica Avançada ou Cobots, máquinas que trabalham com segurança, lado a lado com os humanos, os avanços dos sensores vêm proporcionando uma melhor resposta e compreensão dos Cobots. Novos materiais, algo inimaginável há alguns anos, já é uma realidade, são materiais inteligentes, tais como, metais que retornam a sua forma original, outros que transformam pressão em energia e, por aí afora. É difícil prever até onde irá o desenvolvimento destes nano materiais (SCHWAB, 2016).

A categoria digital contempla: a IoT, que pode ser entendida como a ligação entre coisas e pessoas. Hoje já existem bilhões de dispositivos, ao redor do mundo, *tablets*, computadores, celulares, conectados à internet. RFID, sensores identificados por radiofrequência, o que irão impactar o gerenciamento da cadeia de suprimentos, entre outras aplicações no chão de fábrica (SCHWAB, 2016). Ao longo do livro o autor cita o Big Data e a Computação em Nuvem como tecnologias que fazem parte da I 4.0. A categoria biológica não foi analisada por não fazer parte do escopo deste estudo, tampouco os Bitcoins, classificado pelo autor como uma tecnologia digital.


Um sumário dos artigos analisados e das respectivas tecnologias habilitadoras mencionadas em cada um dos artigos, está mostrado na Tabela 1. Como se observa, há uma grande dissimilaridade entre os diversos autores na indicação das tecnologias

habilitadoras para a implantação da I 4.0. Há uma predominância na recomendação do *Big Data*, da IoT e da Computação em Nuvem, que são mencionados por quase todos os autores avaliados, como pode ser observado na Figura 22. Em contrapartida, tecnologias como fábrica inteligente e tecnologias de localização, foram destacadas somente por um artigo cada. Como selecionar dentre todas essas tecnologias as mais relevantes?

Tabela 1 – Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0

TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0																					
SEQ.	AUTORES	TECNOLOGIAS																			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Ahuett-Garza.; Kurfess (2018)	X	X			X			X		X		X								
2	Berger (2016)	X	X		X	X	X	X	X	X		X									
3	Bortolini et al. (2017)	X	X	X		X		X	X	X	X	X									
4	Chhetri et al. (2017)	X	X			X		X	X	X	X	X	X								
5	CNI (2016)	X	X			X		X	X	X			X			X					
6	Coelho (2016)	X				X					X			X							
7	Dombrowski; Richter; Krenkel (2017)	X			X	X		X		X	X	X							X	X	
8	Gerbert et al. (2015)	X	X	X	X	X	X	X	X	X											
9	Geissbauer; Vedso; Schrauf (2016)	X	X		X	X	X	X	X	X		X			X				X		
10	Guoping; Yun; Aizhi (2017)	X				X		X	X			X									
11	Liu; Xu (2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
12	Lu (2017)	X			X	X		X		X	X			X							
13	Pereira; Romero (2017)	X	X			X		X		X	X		X								
14	Roblek; Meško; Krapež (2016)	X				X		X		X			X	X		X					
15	Santos et al. (2017)	X	X			X		X	X	X			X	X						X	
16	Schimidt et al. (2015)	X				X		X		X				X							
17	Schwab (2016)	X	X			X		X	X			X	X			X				X	
18	Xu; Xu; Li (2018)				X	X		X			X							X			
19	Zhong et al. (2017)	X				X		X			X							X			
TOTAL		18	11	3	7	19	4	17	11	8	13	6	6	4	5	2	1	2	1	2	2

LEGENDA													
A	BIG DATA	D	INTEGRAÇÃO VERT. HOR.	G	COMPUTAÇÃO EM NUVEM	J	SISTEMA FÍSICO CIBERNÉTICO	M	INTERNET DE SERVIÇOS	P	FÁBRICA INTELIGENTE	S	VEÍCULOS AUTÔNOMOS
B	ROBÔ COLABORATIVO	E	INTERNET DAS COISAS	H	MANUFATURA ADITIVA	K	RFID	N	COMPUTAÇÃO MÓVEL	Q	TECN. DE INF. E COM.	T	M2M
C	SIMULAÇÃO	F	SEGURANÇA CIBERNÉTICA	I	REALIDADE AUMENTADA	L	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	O	MATERIAL INTELIGENTE	R	TECNOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO		

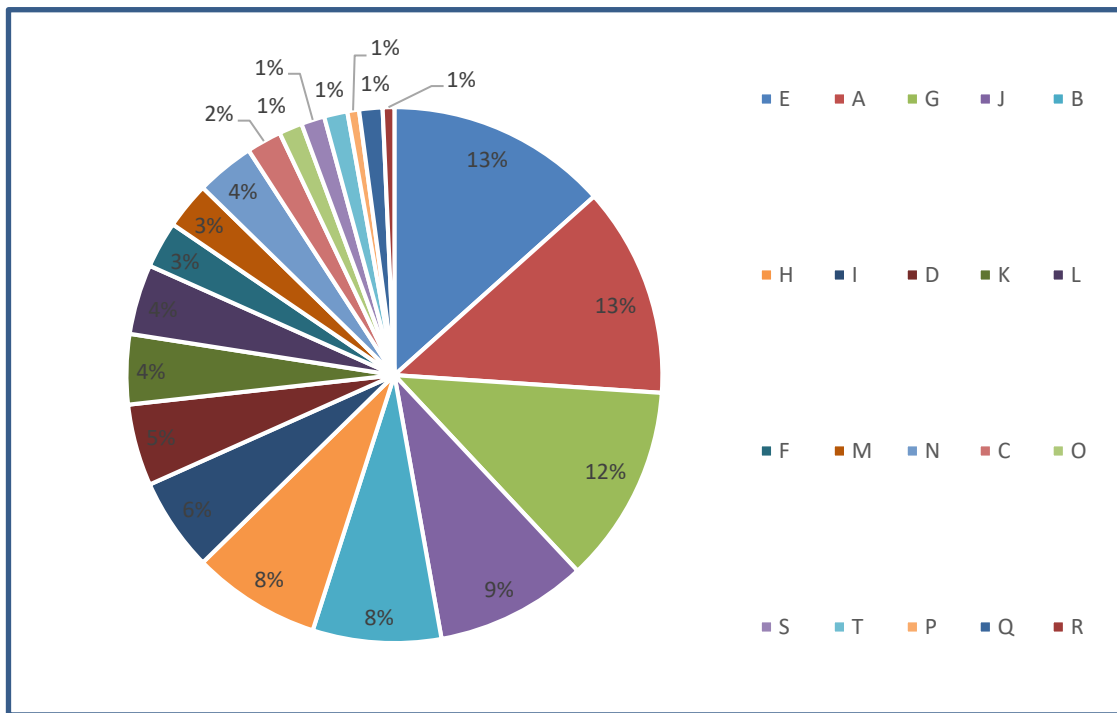
 Tecnologias habilitadoras adotadas

Fonte: Elaborada pelo autor

Para isso recorreu-se a Ballou (1993), segundo o qual o conceito da curva ABC é muito utilizado em diversas empresas para classificação de diversas informações. Nesses casos, os itens de maior relevância são classificados como A, os de média relevância são B e os de baixa C. Para Alvarenga e Novaes (2000), tanto na vida

profissional como na vida pessoal é frequente o uso do conceito de classificação ABC em diversas aplicações.

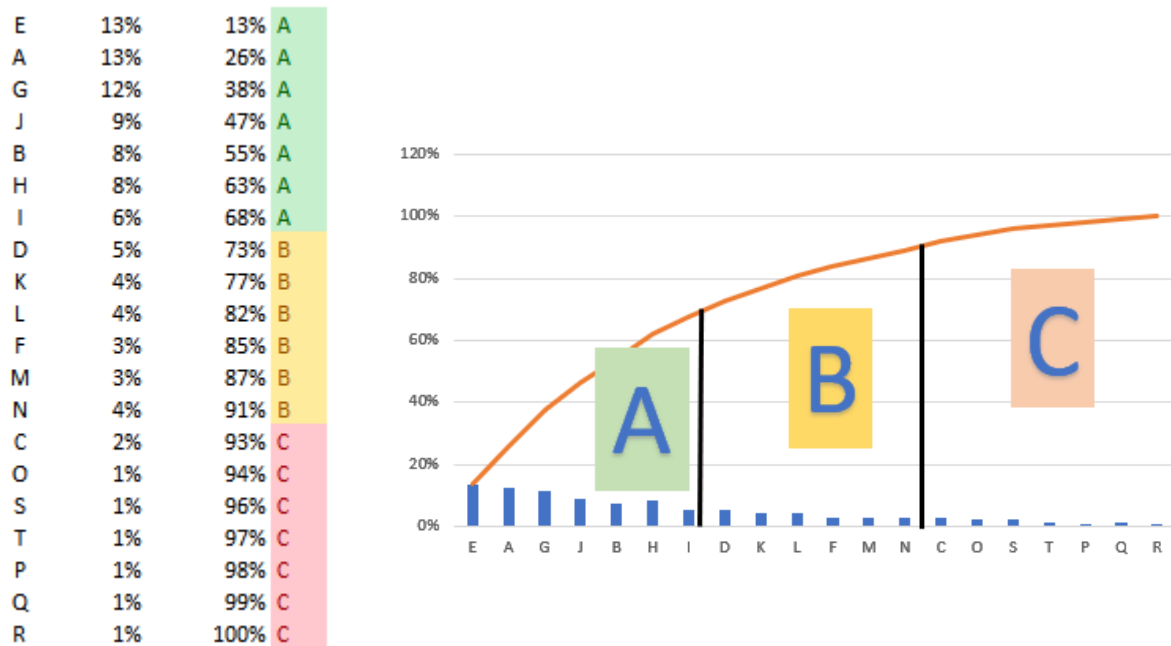
Figura 22 – Distribuição percentual das tecnologias habilitadoras



Fonte: Elaborada pelo autor

Porém, os percentuais para classificação não seguem uma regra matemática fixa para todos os casos, os valores de corte para cada uma das faixas de classificação (A, B e C), são variados. Diante dessa falta de uniformidade e da ausência de referências sobre o tema na literatura, o seguinte critério de classificação foi utilizado: 70% das citações compõem os itens A, 20% os B e 10% os C, o que levou a um resultado de sete tecnologias mais relevantes, classificadas como A, com representatividade de 68% do total pesquisado, conforme verificado na Figura 23. Portanto, para efeito desta tese e com base no critério de seleção adotado, as tecnologias consideradas como mais relevantes foram: *Big Data*, Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Robô Colaborativo, Manufatura Aditiva, Sistema Físico Cibernético, Realidade Aumentada. Essas estão grifadas em verde na legenda da Tabela 1.

Figura 23: Curva ABC das Tecnologias Habilitadoras

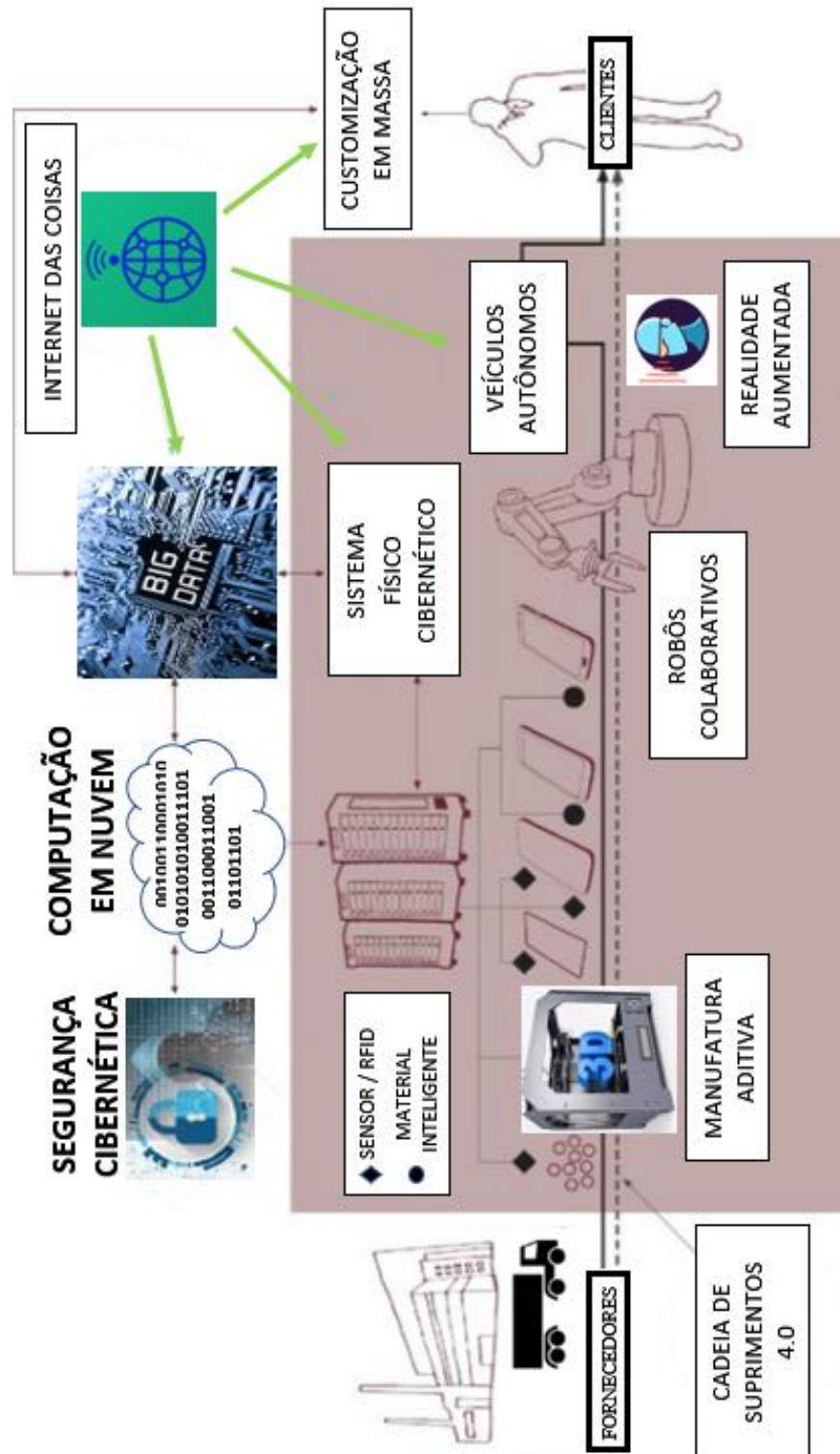


Fonte: do autor

A Figura 24 mostra, por meio de uma ilustração, como essas tecnologias e mais alguns elementos compõem a I 4.0. Como pôde ser observado na revisão da literatura e ainda por se tratar de um tema muito recente, ainda não existe um consenso quanto as definições de cada uma das tecnologias habilitadoras entre os diversos autores que trataram desse tema. Por isso, a seguir faz-se um resumo dos conceitos de cada uma das tecnologias selecionadas, com base nos artigos pesquisados na revisão de literatura.

A Inteligência Artificial (AI), não foi considerada como uma das tecnologias habilitadoras significativas, para avaliar o grau de prontidão para implantação da I 4.0, pelo critério da curva ABC adotado nesta tese, conforme Figura 23. Porém por sugestão dos especialistas consultados, destacados no capítulo 4 que aborda a metodologia desta tese, a AI foi acrescentada, totalizando oito tecnologias que comporão o modelo para medir o grau de prontidão das empresas industriais para implantação da I 4.0.

Figura 24: Tecnologias e elementos da Indústria 4.0



Fonte: Adaptada pelo autor de Berger (2016)

Em 1956, no Dartmouth College, nos EUA, um grupo de estudiosos estabeleceram por primeira vez o conceito de "inteligência artificial". A definição de AI referia-se à capacidade das máquinas de entender, pensar e aprender de maneira semelhante aos seres humanos, indicando a possibilidade de usar computadores para simular a inteligência humana. A partir da década de 1970, a AI expandiu-se para campos de pesquisa, incluindo teorema mecânico, tradução automática, sistemas especialistas, teoria dos jogos, reconhecimento de padrões, aprendizado de máquina, robótica e controle inteligente (PAN, 2017).

Com base na pesquisa sobre as aplicações da tecnologia AI nas empresas industriais, nos últimos anos, pode-se observar o rápido desenvolvimento de tecnologias, que está provocando uma grande mudança nos modelos, meios e ecossistemas das empresas industriais, bem como no desenvolvimento da AI (LI *et al.*, 2016).

Segundo Li *et al.*(2016), a fabricação inteligente é um novo modelo de fabricação, pelo qual, as novas tecnologias de informação e comunicação, ciência e tecnologia inteligentes, a tecnologia de manufatura, a tecnologia de engenharia de sistemas e a tecnologia de produtos relacionados são integrados a todo o sistema e ao ciclo de vida do desenvolvimento do produto.

A AI é uma tecnologia para representar, raciocinar e gerenciar o conhecimento. Com o seu uso pode-se alcançar vários serviços inteligentes. Para ser inteligente, os serviços devem ser capazes de reconhecer o contexto do ambiente onde estão implantados, e decidir em tempo real o que fazer na situação dada para alcançar o objetivo proposto. Os tópicos principais da AI estão aprimorando a base de conhecimento por símbolos e abordagens estatísticas, raciocinando conhecimento implícito da base de conhecimento e tornando os serviços inteligentes (CHUN; KIM; LEE, 2019).

Assim define-se para esta tese as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 como:

Internet das Coisas – Tecnologia que permite a conectividade entre sensores, máquinas, dispositivos móveis e humanos, permitindo a interoperabilidade das organizações, interna e externamente, tornando os dados mais acessíveis e ubíquos (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

Big Data – Ambiente no qual é armazenada uma grande quantidade de dados, não estruturados, estruturados e semiestruturados, advindo de várias fontes (OUSSOUS *et al.* 2017) e conectados por meio da Internet das Coisas, que fornecem informações

precisas, com rapidez, que servirão para tomada de decisões em tempo real (GERBERT *et al.*, 2015).

Computação em Nuvem – É um termo genérico que significa o acesso remoto, com extrema rapidez de resposta, por meio da Internet das Coisas, aos dados armazenados em um ambiente externo à empresa (ZHONG *et al.*, 2017).

Sistema Físico Cibernético – Sistemas que combinam estatísticas, e modelagem computacional, com os dados em tempo real, extraídos de sistemas físicos, para modelar a resposta de um sistema sob vários cenários para indicar a melhor decisão. Na verdade, são tecnologias transformadoras para gerenciar sistemas interligados entre seus recursos físicos e computacionais, alavancando a interconectividade das máquinas inteligentes, resilientes e auto adaptáveis (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018; WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015).

Robô Colaborativo – São robôs inteligentes, flexíveis e cooperativos. Eventualmente, eles vão interagir uns com os outros e trabalhar em segurança lado a lado com os humanos aprendendo com eles e decidindo por si mesmos (GERBERT *et al.*, 2015).

Manufatura Aditiva – Essa tecnologia, também conhecida como a impressão 3D, pode produzir pequenos lotes de produtos personalizados que oferecem vantagens de construção, como em peças de designs complexos (GERBERT *et al.*, 2015), depositando o material, camada sobre camada (GUOPING; YUN; AIZHI, 2017).

Realidade Aumentada – Essa tecnologia amplia as informações no ambiente circundante de um humano, interagindo o ambiente físico com objetos virtuais, objetos estes que coexistem simultaneamente, de forma virtual, no mesmo espaço do ambiente real (GERBERT *et al.*, 2015).

Inteligência Artificial – Essa tecnologia representa, raciocina e gerencia o conhecimento. Para ser inteligente, os sistemas devem ser capazes de reconhecer o contexto do ambiente onde estão implantados, e decidir em tempo real o que fazer na situação dada para alcançar o objetivo proposto (CHUN; KIM; LEE, 2019).

2.4 PRÉ-REQUISITOS PARA A IMPLANTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0.

Neste subcapítulo serão pesquisados os pré-requisitos necessários para a implementação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Com base nestes pré-requisitos serão identificadas as questões que formarão o instrumento de avaliação, servirão de base de dados para o modelo aqui proposto, para a medição do grau de prontidão para implantação da indústria 4.0 nas empresas industriais.

Entender e preencher os pré-requisitos específicos de cada tecnologia é fundamental para que as empresas tenham uma medida, a ser proposta no modelo, com relação ao grau de prontidão para a implantação da Indústria 4.0, para que elas possam direcionar os seus esforços no sentido de se prepararem de maneira mais adequada para a efetiva implementação da I 4.0.

2.4.1 Pré-requisitos para a Tecnologia Internet das Coisas (t₁)

Para Atzori, Iera e Morabito (2017), as novas tecnologias vêm permeando todas as atividades do dia a dia e estão estimulando a crença que para qualquer novo desafio societal há sempre uma solução associada as Tecnologias de Informação e Comunicação. Recentemente, a solução que é proposta quase a qualquer momento é a IoT. Por conta disso, muitos confundem a IoT com RFID. Outros que IoT se refere às redes de sensores, e ainda outros consideram que a IoT são comunicações máquina-a-máquina. Como a literatura científica traz muitas definições para a IoT e na maioria das vezes discordantes, tem-se uma definição difusa do conceito.

Os primeiros passos em direção à IoT foram conduzidos pelos esforços para criar um padrão global para apoiar o uso do Código Eletrônico do Produto e do RFID, a tecnologia de identificação por radiofrequência que tem um papel fundamental para a IoT. O Código Eletrônico do Produto supera as limitações do código de barras e são armazenados em *tags* diretamente ligados aos objetos (ATZORI; IERA; MORABITO, 2017).

Ashton (2009, p.1), faz também referência ao RFID, como sendo: “a tecnologia de sensores que permitem aos computadores observarem, identificarem e entenderem o mundo - sem as limitações dos dados inseridos pelo ser humano”.

Os custos associados a implementação da IoT vêm diminuindo drasticamente. Os custos com equipamentos técnicos, como computadores e sensores, ficaram menores, utilizando a energia de forma mais eficiente. Os valores cobrados pelo tráfego de dados diminuíram com as infraestruturas de redes sem fio de alta velocidade, com uma expansão de sua capacidade (SAARIKKO; WESTERGREN; BLOMQUIST, 2017; LU, 2017).

Para Ouaddaha *et al.* (2017) um inibidor da aplicação da IoT é a falta de confiança na privacidade. Segundo esses autores, um estudo recente sobre o futuro da confiança digital, revelou que 78% dos consumidores acham que é difícil confiar em empresas quando se trata de usar seus dados pessoais. Estudos demonstraram de uma forma clara que existe uma necessidade urgente de medidas de segurança para minimizar o impacto de um ataque cibernético.

A conectividade é um requisito para o *Big Data* e a IoT, sendo evidente a evolução para a ubiquidade das redes de informação e comunicação, devido à presença crescente do WiFi e acesso à internet sem fio 4G-LTE. Ainda, existe um grande espectro de fontes de dados da IoT, incluindo dados de sensores, smartphones e mídias sociais que são modelados de maneiras diferentes e usam vários protocolos de comunicação e interfaces. A maioria das aplicações de IoT é baseada em protocolos de comunicação M2M (Máquina com Máquina), que lidam com um grande fluxo de dados, impactando a capacidade de armazenamento e a infraestrutura da Computação em Nuvem (AHMEDA *et al.*, 2017).

De acordo com Ahmeda *et al.* (2017), uma das grandes características da IoT é a sua comunicação em tempo real. Portanto é exigido um *streaming* de eventos *on-the-fly*, para a captura das informações. Esses dados não estruturados são levados pela IoT para o *Big Data* que deve executar análises, decidindo e interagindo com pessoas ou outros objetos em tempo real.

As tecnologias que viabilizam o *Big Data* com o uso da IoT estão relacionadas a comunicação sem fio ubíqua, análises em tempo real, aprendizado de máquina e elementos de captura de dados, como sensores e sistemas embarcados. As principais

tecnologias de comunicação sem fio e ubíquas são usadas para transportar esses grandes volumes de dados utilizando a IoT. Elas incluem IEEE 802.15.4, IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 e IEEE 802.16 (AHMEDA *et al.*, 2017).

Com base na literatura pesquisada, este trabalho vai considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia da Internet das Coisas, os seguintes:

- A empresa deve possuir e utilizar a tecnologia RFID.
- A empresa deve utilizar o Código Eletrônico do Produto.
- A empresa deve ter rede sem fio de alta velocidade e capacidade.
- A empresa deve ter protocolo de comunicação M2M.
- A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os ataques cibernéticos.
- A empresa deve ter *streaming* de eventos *on-the-fly*.

2.4.2 Pré-requisitos para a tecnologia *Big Data* (t₂)

Cada vez mais o *Big Data* é visto como o recurso mais estratégico do século XXI. Para a adoção e utilização dessa tecnologia, eles identificaram barreiras que precisam ser superadas pelas empresas. Estas seriam: a infraestrutura de tecnologia, a segurança, as habilidades das pessoas e a visão organizacional relacionada a dados (ALHARTHI; KROTOV; OWMAN, 2017).

Segundo Mazzei e Noble (2017), o *Big Data* chamou a atenção de quase todos na indústria. O fato de o *Big Data* abranger todas as áreas funcionais de uma organização, o seu potencial disruptivo exige envolvimento das empresas em um nível estratégico, pois sem dúvida, sua implementação terá efeito significativo sobre a estratégia corporativa, com investimentos maciços na coleta e análise dos dados.

Os dados gerados por vários sistemas, devem ser coletados de maneira organizada ou metódica e estarem identificados. Além disso, a questão mais importante relacionada a implantação do *Big Data*, é saber qual o problema que a empresa está tentando resolver, ou seja, planejar o que pretende fazer com os dados, para aqueles apurados possam ser úteis (CERVONE, 2016).

Günther *et al.* (2017), mostraram que é importante que as organizações percebam o valor do *Big Data*, na prática de trabalho, nos níveis organizacionais e supra organizacionais, dispondo ainda de infraestrutura informacional com rede de comunicação para tráfego de grandes quantidades de dados.

Com base na literatura acima pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia do *Big Data*, os seguintes:

- A empresa deve ter todas os seus dados/informações, organizados e mantidos em sistemas digitais.
- A empresa deve ter rede de comunicação para tráfego de grandes quantidade de dados.
- A empresa deve ter pessoal habilitado para organizar e coletar dados.
- A empresa deve tratar o *Big Data* no nível estratégico.
- A empresa deve saber os problemas que deseja resolver com os dados obtidos.
- A empresa deve ter segurança da informação, tais como, gestão de acesso, proteção de dados, plano de continuidade.

2.4.3 Pré-requisitos para a Tecnologia de Computação em Nuvem (t₃)

Para que a computação em nuvem atinja seu potencial, é necessário que haja uma compreensão clara dos diversos problemas envolvidos, tanto do ponto de vista dos provedores quanto dos consumidores da tecnologia. Há uma necessidade igualmente urgente de entender os problemas relacionados ao negócio que envolvem a computação em nuvem (MARSTON *et al.*, 2011).

Serviços de nuvem hoje são hospedados e oferecidos em grandes *datacenters* operados por empresas como Amazon, Apple, Google, Microsoft e Facebook. Usando vários paradigmas de provisão de serviços, tais como, plataforma e infraestrutura como serviços. Os recursos de *hardware* e serviços de *software* em *datacenters* são virtualizados, e são alugados em um modelo “pague conforme o uso” (GEORGAKOPOULOS *et al.*, 2016).

Avram (2014) afirma que o rápido desenvolvimento das tecnologias de processamento e armazenamento de dados e o sucesso da Internet, vão tornando os recursos

computacionais mais baratos, mais poderosos e mais disponíveis. Neste rastro veio uma tendência tecnológica de um novo modelo de computação chamado computação em nuvem, no qual os recursos são fornecidos como utilitários gerais que podem ser alugados e liberados pelos usuários por meio da Internet, sob demanda. Porém as organizações estão encontrando alguns obstáculos tais como custo, dificuldades no gerenciamento de dados, integração de sistemas e gerenciamento dos provedores de nuvem, além das questões de segurança e infraestrutura do TI existente.

Confiabilidade, estabilidade e segurança dos sistemas informações e respostas abrangentes precisam ser fornecidas, para que a computação em nuvem possa se tornar uma opção viável para os clientes corporativos (MARSTON *et al.*, 2011).

Alguns pré-requisitos para a implementação da computação em nuvem envolvem, a cultura da empresa quanto a externar sua privacidade de dados. É importante ter conectividade em alta velocidade para todos, histórico de confiabilidade devido aos riscos de uma falha do sistema, sistemas ERPs (*Enterprise Resource Planning*), implantados para padronização dos processos e informações para facilitar a interoperabilidade e a portabilidade de informações entre nuvens privadas e nuvens públicas. Além de pessoal de TI preparado para aplicar as novas tecnologias e com os custos envolvidos no processo (AVRAM, 2014).

Segundo Ramachandra, Iftikhar e Khan (2017), o relatório de 2017 da Forbes diz que enquanto 80% de todos os orçamentos de TI estarão comprometidos com a solução em nuvem, 49% das empresas estão atrasando a implantação da nuvem, pois não estão preparadas para mitigar as falhas de segurança. Este problema parece ter outras dimensões, com falta de recursos qualificados, falta de maturidade, complexidade de estrutura comercial.

Com base na literatura pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia da computação em nuvem, os seguintes:

- A empresa deve ter firewall para segurança dos dados.
- A empresa deve ter pessoal de TI preparado para novas tecnologias para computação em nuvem.
- A empresa deve ter uma cultura voltada a externar a privacidade de seus dados.

- A empresa deve ter sistemas integrados para garantia de interoperabilidade de seus processos.
- A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos em nuvem.
- A empresa deve ter conectividade com internet de alta velocidade e capacidade.

2.4.4 Pré-requisitos para o Sistema Físico Cibernético (t₄)

O rápido desenvolvimento em TIC e engenharia de produção e a subsequente junção de ambos os campos resultam atualmente na criação de CPS de produção. O termo “Sistema Físico Cibernético” descreve uma tecnologia contendo capacidades computacionais e físicas combinadas com a possibilidade de interação homem-máquina, por meio da conexão do mundo físico “real” com a representação cibernética “virtual”, o que corresponde a um grande potencial de aplicações possíveis (THIEDE; JURASCHEK; HERRMANN, 2016).

Mesmo com o crescente desenvolvimento do CPS, que já está sendo utilizado nos controles de processos, controles de veículos e simulações computacionais com usuários, ainda se encontram poucas publicações sobre sua aplicabilidade na I 4.0 (PISCHING *et al.*, 2017).

Segundo Garetti, Fumagalli e Negri (2015), no CPS, todos os tipos de equipamentos inteligentes (por exemplo, sensores, atuadores, dispositivos, máquinas, robôs) são interconectados, criando uma comunidade inteligente com captura de dados e capacidade de ação de / para o mundo físico com um grande potencial de inovação.

O CPS pode ser desenvolvido para gerenciar o *Big Data* e alavancar a interconectividade das máquinas, transformando-as em máquinas inteligentes, resilientes e auto adaptáveis. Além disso, integrando o CPS à produção, logística e serviços nas industriais atuais, transformaria as fábricas de hoje em uma fábrica inteligente da Indústria 4.0 (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Segundo Lee, Bagheri e Kao (2015), um CPS consiste em dois componentes funcionais principais: (1) a conectividade avançada que garante em tempo real aquisição de dados do mundo físico e feedback do espaço cibernético; e (2)

gerenciamento inteligente de dados, e capacidade computacional que constrói o espaço cibernético. No entanto, essa exigência é muito abstrata e não especifica o suficiente para fins de implementação em geral. Em contraste, com a arquitetura 5C que define claramente, por meio de uma maneira sequencial de fluxo de trabalho, como construir um CPS desde a aquisição inicial de dados até a sua análise, como ilustrado na Figura 25.

Figura 25: Arquitetura 5C para implantação do CPS



Fonte: Adaptado pelo autor de Lee, Bagheri e Kao (2015)

O CPS habilitado para IoT está fortemente acoplado à infraestrutura de comunicação, que deve suportar as interações entre os dispositivos conectados, portanto, os atributos de qualidade da rede afetam diretamente o desempenho e o comportamento do CPS (OCHOA; FORTINO; DI FATTA, 2017).

Nesse sentido, as Arquiteturas Orientadas a Serviços servem como um paradigma emergente para as empresas coordenarem-se perfeitamente no ambiente de sistemas de informações heterogêneos. Permitindo o compartilhamento oportuno de informações e aprimorando a integração. Comparando com arquiteturas corporativas hierárquicas, SOA é uma arquitetura para integração de plataformas, protocolo, e sistemas ligados e pode ser usado para melhorar a flexibilidade do sistema e a transição perfeita da reconfiguração. Algumas vantagens reconhecidas das infraestruturas do SOA são a simplicidade, adaptabilidade, escalabilidade, flexibilidade, confiabilidade e independência de localização (XU; XU; LIA, 2018).

Com base na literatura pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia do CPS, os seguintes:

- A empresa deve ter conectividade com internet de alta velocidade e capacidade.
- A empresa deve ter sensores instalados nos objetos a serem conectados.
- A empresa deve ter uma estrutura de análise de grandes quantidades de dados.
- A empresa deve ter acesso a dados na nuvem.
- A empresa deve ter uma estrutura física de computadores instalada.
- A empresa deve ter uma Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).

2.4.5 Pré-requisitos para o Robô Colaborativo (t_5)

O rápido desenvolvimento tecnológico, vem tornando os robôs cada vez mais inteligentes, mudando os conceitos de interação entre os humanos e os robôs. Todo esse avanço contínuo, fez com que o uso de robôs colaborativos crescesse consideravelmente (MASINGA; CAMPBELL; TRIMBLE, 2015).

Apesar toda a tecnologia, padrões de segurança apropriados para garantir a segurança aos humanos estão faltando e, representam uma das principais barreiras para a introdução da cooperação direta entre humanos e cobots (FABER; BÜTZLER; SCHLICK, 2015). Essa integração máquina/humano, segundo Masinga; Campbell e Trimble (2015), implica em vários riscos que devem ser considerados e evitados, de acordo com as normas de segurança exigidas pela ISO / TS15066. Ainda segundo os autores existirá um no nível de dependência

humana com os robôs, sendo necessária uma nova geração da força de trabalho com capacidade de interagir com essa tecnologia.

Ao alocar as tarefas para os Cobots deve ser analisado: a adequação de recursos, ou seja, se a capacidade de carga do robô é compatível com a carga do processo; disponibilidade de recurso, se os robos estarão disponíveis quando precisar executar uma tarefa e tempo de processamento, qual o tempo necessário para o robô executar uma tarefa. Quanto a interação entre um humano e um Cobot é obtida por meio de um sensor de profundidade e de uma ferramenta de *software* de captura de gestos (TSAROUCHI *et al.*, 2017). No caso das empresas de médio porte, a implantação dos robôs industriais é principalmente limitada pelo altos custos (KRUGER; LIEN; VERL, 2009).

Atualmente os Cobots já podem ser usados em produções de pequenos lotes com muita flexibilidade, permitindo a interação entre o humano e a máquina. Infelizmente, esses robôs têm limitações em termos de carga útil, velocidade, força que impedem seu uso generalizado. Alguns desses limites estão relacionados à necessidade de respeitar as Especificações Técnicas ISO / TS 15066, a fim de assegurar segurança do trabalhador humano (ANTONELLI; BRUNO, 2017).

O Cobot interagindo em uma célula de trabalho híbrido, necessita de um mapeamento de trajetória, o qual o sistema deve ser capaz de gerar para não colidir com obstáculos dinâmicos como humanos e componentes de montagem, que estejam movendo-se dentro do espaço de trabalho do robô (MEZIANE; OTIS; EZZAIDI, 2017).

De acordo com Boenzi *et al.* (2016), apesar da crescente robotização na indústria moderna, o trabalho humano ainda representa um elemento insubstituível em muitas operações que exigem variedade e flexibilidade, particularmente no caso de operações de montagem.

Os Cobots têm sido usados na interação com os operadores, no aspecto físico, para melhorar a produtividade da montagem na produção. Porém, a simples presença de um robô em torno de um operador humano, a sua velocidade, a sua distância, induz muito estresse aos humanos, porque eles precisam trabalhar de maneira coexistente e convincente com o robô. A norma ISO 12.100/2 tem regulamentado esta convivência (ARAI; KATO; FUJITA, 2010).

Com base na literatura pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia dos Cobots, os seguintes:

- A empresa deve ter mão de obra treinada em robótica.
- A empresa deve ter conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.
- A empresa deve ter capacidade financeira.
- A empresa deve fazer um mapeamento minuciosos do processo e da trajetória.
- A empresa deve fazer um trabalho psicológico com os humanos que trabalham com os robôs colaborativos.
- A empresa deve ter conhecimento das normas: ISO TS 15066; NBR 12110/2.

2.4.6 Pré-requisitos para a Manufatura Aditiva (t₆)

A implantação da AM é frequentemente utilizada em aplicações onde há necessidade de prototipagem, customização da peça, peças complexas, onde outras formas de manufatura não permitiriam a construção destes detalhes, processos de fabricação onde se deseja a descentralização, entre outras (CHHETRI *et al.* 2017).

O primeiro passo para implantação ou substituição de um processo de manufatura tradicional pela AM, deve ser uma avaliação do produto a ser fabricado, cliente a ser atendido (prazo de entrega, custo, qualidade, etc.), materiais a serem empregados (produto final e, alguns casos, suportes) na fabricação, sua estrutura química e propriedades e tecnologias disponíveis (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

É importante levar em conta o modelo de negócio a ser adotado, pois nesta área é possível comprar o serviço de impressão, por exemplo, sem precisar obter o maquinário necessário. O processo de AM, dependendo do nível de detalhamento da peça a ser fabricada e da qualidade que se deseja imprimir no objeto, pode levar horas, portanto ao optar por este modelo de manufatura é necessário levar esses detalhes em consideração (DUDA; RAGAHVAN, 2016).

Para implantação da AM é necessário que o processo possua um alto grau de digitização, uma vez que este tipo de produção requer construção de modelos digitais

em 3D antes da impressão. Outra evidência da necessidade da digitização, é que caso seja necessário, reproduzir a mesma peça em outras impressoras, os dados da peça devem estar em um arquivo digital acessível (MORAR; KEMPER, 2016; GUOPING; YUN; AIZHI, 2017). Juntamente com essa questão deve ser considerado como requisito importante a segurança da informação, uma vez que toda produção está em arquivos que podem ser vulneráveis a crimes cibernéticos (KHAN; TUROWSKI, 2016).

Deve-se verificar antes de implantar a AM quais são as regulamentações do mercado consumidor. A fabricação de peças para o mercado automotivo e aeroespacial, por exemplo, exigem que as peças atendam uma série de pré-requisitos que também devem ser garantidos em peças fabricadas por esse processo. Portanto um estudo detalhado do produto deve ser realizado para verificar o atendimento as certificações necessárias (AEA, 2018).

Para uma empresa implantar manufatura AM é necessário possuir mão de obra qualificada na equipe de desenvolvimento, projetistas, desenhistas e designers que estejam habilitados a projetar as peças. Esses profissionais são importantes, uma vez que, a AM, geralmente, é aplicada em processos que se deseja peças pequenas e variadas, portanto para atender o volume de produção, são necessários profissionais capazes de desenvolver de forma ágil e assertiva os modelos que serão utilizados. Também é importante garantir profissionais com conhecimento neste tipo de manufatura, operação e manutenção dos equipamentos que são distintos dos equipamentos e processos da manufatura subtrativa (MELLOR; HAO; ZAHNG, 2014).

Com base na literatura pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos para a adoção da AM, os seguintes:

- A empresa deve avaliar as características das peças a serem produzidas.
- A empresa deve levar em conta a sua capacidade técnica.
- A empresa deve levar em conta o tempo de fabricação.
- A empresa deve levar em conta a sua segurança contra ataques cibernéticos.
- A empresa deve possuir mão de obra capacitada.
- A empresa deve ter seus arquivos de peças digitalizados em 3D.

2.4.7 Pré-requisitos para a Realidade Aumentada (t7)

Simulação computacional usando CAD, ferramentas de modelagem e análise de elementos finitos, ajudaram engenheiros de manufatura a tomar decisões mais rapidamente e livres de erros por mais de uma década. A tecnologia da AR, amadureceu e provou ser uma solução inovadora e eficaz, para ajudar a resolver alguns dos problemas críticos para simular, auxiliar e melhorar os processos de fabricação antes que eles sejam executados. O desafio é projetar e implementar sistemas integrados de manufatura assistida por AR que poderiam melhorar os processos de fabricação, bem como, produtos e processo em desenvolvimento, com o menor tempo de entrega, redução de custos e melhor qualidade (NEE *et al.*, 2012).

Para a implementação da AR o rastreamento das informações em tempo real são cruciais, pois a sincronização entre o mundo real e o virtual deve ser alcançada no menor intervalo de tempo possível. Ferramentas comerciais de *hardware* e *software* estão amplamente disponíveis. Equipamentos como óculos, tablet, smartphone são alguns dos *hardwares* utilizados. Várias plataformas de *software* AR bem conhecidas foram desenvolvidos para facilitar o desenvolvimento de várias aplicações AR específicas (NEE *et al.*, 2012). Diversos *softwares* estão disponíveis, no mercado, em vários pacotes para a AR, tais como o Alvar e o Vuforia (CERUTI *et al.*, 2019).

Entender se os usuários trabalharão em um ambiente interno ou externo, ajuda a filtrar as técnicas de rastreamento para o desenvolvimento do sistema AR, externamente tem-se uma cobertura maior de GPS, enquanto internamente o *Wi-Fi* predomina. Outros fatores são o nível de ruído ambiente e o nível de iluminação, pois o brilho necessário para a visibilidade da tela, afeta a qualidade da imagem e a duração da bateria (GHEISARI; IRIZARRY, 2014).

A privacidade dos dados é outro fator importante, pois impacta no design das informações, nem todas as informações, podem ser compartilhadas, com todos os usuários. Além da posição do corpo, em pé, sentado, andando, as questões ergonômicas são importantes para o projeto da AR (GHEISARI; IRIZARRY, 2014).

As questões mais relevantes para a utilização da AR, a serem abordadas, dizem respeito à ergonomia. Permitir que os operadores tenham mãos livres e tenham uma visualização confortável, evitando o desconforto dos visores desgastados, é muito

importante. A projeção é afetada por muitos parâmetros, tais como, condições do ambiente, estilo de texto, material e forma da superfície alvo (DI DONATO *et al.*, 2015).

Com base na literatura pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia de AR, os seguintes:

- A empresa deve levar em conta o ambiente de trabalho do operador.
- A empresa deve ter seus arquivos digitalizados.
- A empresa deve ter um mapeamento detalhado do processo.
- A empresa deve ter um estudo ergonômico das funções do operador.
- A empresa deve ter um *software* adequado para a utilização do *hardware* da AR.
- A empresa deve planejar quais dados podem ser compartilhados.

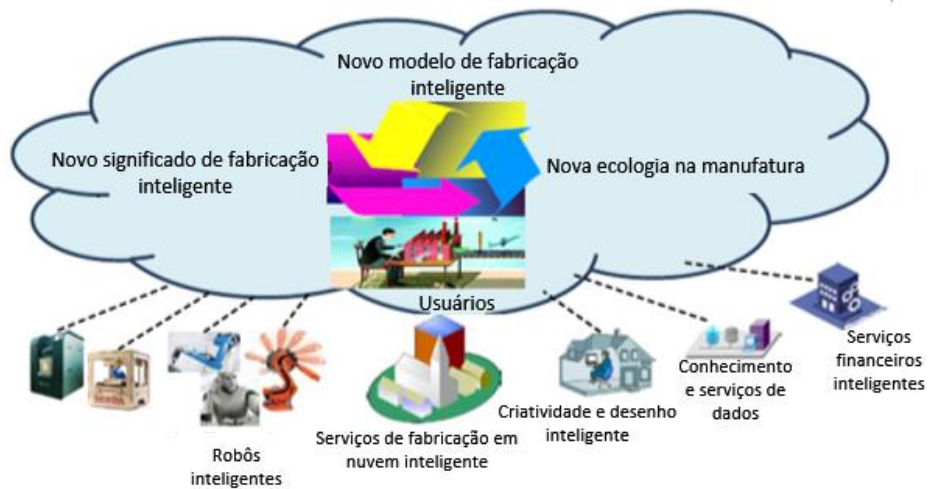
2.4.8 Pré-requisitos para a Inteligência Artificial (t₃)

A fabricação inteligente desempenha um papel importante na Indústria 4.0. Os recursos típicos são convertidos em objetos inteligentes para que possam sentir, agir e se comportar em um ambiente inteligente. As tecnologias, tais como, IoT, CPS, Computação em Nuvem, *Big Data* e as TICs, são incrementadas pela AI e proporcionam a produção, logística, marketing e demais setores da empresa em manufatura inteligente (ZHONG *et al.*, 2017).

O rápido desenvolvimento e fusão de novas tecnologias de AI com tecnologias da Internet, TI de nova geração, novas tecnologias de energia, tecnologia de materiais e biotecnologia são essenciais, para uma transformação revolucionária em termos de modelos de manufatura, abordagens de manufatura e seus ecossistemas (LI *et al.*, 2017). A profunda integração da aplicação desses modelos, meios e formas acabará por formar um ecossistema de manufatura inteligente, mostrado na Figura 26.

Ainda a conceituada agência em comunicação, com certificação Google Adwords desde 2006, WBI on life business, aponta três importantes pré-requisitos para a implantação da AI, que são: restrições orçamentárias, privacidade dos dados dos clientes e estratégias definidas para AI (WBI ON LIFE BUSINESS BRASIL, 2017).

Figura 26: Ecossistema da Manufatura Inteligente



Fonte: LI *et al.* (2017)

Com base na literatura pesquisada, este trabalho propõe considerar como pré requisitos, para a adoção da tecnologia de AI, os seguintes:

- A empresa deve ter capacidade financeira.
- A empresa deve ter estratégias e conhecimento prévio da AI.
- A empresa deve ter a comunicação M2M.
- A empresa deve ter sensores nos equipamentos.
- A empresa deve ter as tecnologias habilitadoras digitais implantadas.
- A empresa deve ter segurança cibernética.

O Quadro 3 resume as tecnologias adotadas nesta tese com os seus respectivos pré-requisitos, de acordo com a literatura. Os pré-requisitos mostrados neste quadro não contém as sugestões feitas pelas avaliações dos especialistas. No capítulo 4, desta tese, é mostrado o Quadro 6, na página 115, com os pré-requisitos que formaram o instrumento de avaliação, com as incorporações sugeridas pelos especialistas.

Quadro 3: Resumo dos pré-requisitos das tecnologias habilitadoras

TECNOLOGIAS HABILITADORAS	PRÉ-REQUISITOS	AUTORES
INTERNET DAS COISAS	A empresa deve possuir e utilizar a tecnologia RFID;	ATZORI; IERA; MORABITO, 2017; ASHTON, 2009
	A empresa deve utilizar o Código Eletrônico do Produto;	ATZORI; IERA; MORABITO, 2017
	A empresa deve ter rede sem fio de alta velocidade e capacidade;	SAARIKKO; WESTERGREN; BLOMQUIST, 2017; LU, 2017
	A empresa deve ter protocolo de comunicação M2M;	AHMEDA <i>et al.</i> , 2017
	A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os ataques cibernéticos;	OUADDAHA <i>et al.</i> , 2017
	A empresa deve ter <i>streaming</i> de eventos <i>on-the-fly</i> .	AHMEDA <i>et al.</i> , 2017
BIG DATA	A empresa deve ter todos os seus dados/informações, organizados e mantidos em sistemas digitais;	ALHARTHI; KROTOV; OWMAN, 2017
	A empresa deve ter rede de comunicação para tráfego de grandes quantidade de dados;	GUNTHER <i>et al.</i> , 2017
	A empresa deve ter pessoal habilitado para organizar e coletar dados;	ALHARTHI; KROTOV; OWMAN, 2017
	A empresa deve tratar o <i>Big Data</i> no nível estratégico;	MAZZEI; NOBLE, 2017
	A empresa deve saber os problemas que deseja resolver com os dados obtidos;	CERVONE, 2016
	A empresa deve ter segurança da informação, tais como, gestão de acesso, proteção de dados, plano de	ALHARTHI; KROTOV; OWMAN, 2017
COMPUTAÇÃO EM NUVEM	A empresa deve ter firewall para segurança dos dados	AVRAM, 2014; MARSTON <i>et al.</i> , 2011
	A empresa deve ter pessoal de TI preparado para novas tecnologias para computação em nuvem;	AVRAM, 2014
	A empresa deve ter uma cultura voltada a externar a privacidade de seus dados;	MARSTON <i>et al.</i> , 2011; AVRAM, 2014
	A empresa deve ter sistemas integrados para garantia de interoperabilidade de seus processos;	AVRAM, 2014
	A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos em nuvem;	RAMACHANDRA; IFTIKHAR; KHAN, 2017; GEORGAKOPOULOS <i>et al.</i> , 2016
	A empresa deve ter conectividade com internet de alta velocidade e capacidade;	AVRAM, 2014
SISTEMA FÍSICO CIBERNÉTICO	A empresa deve ter conectividade com internet de alta velocidade e capacidade;	OCHOA; FORTINO; DIFATTA, 2017
	A empresa deve ter sensores instalados nos objetos a serem conectados;	GARETTI; FUMAGALLI; NEGRI, 2015
	A empresa deve ter uma estrutura de análise de grandes quantidades de dados;	LEE; BAGHERI; KAO, 2015
	A empresa deve ter acesso a dados na nuvem;	LEE; BAGHERI; KAO, 2015
	A empresa deve ter uma estrutura física de computadores instalada.	THIEDE; JURASCHEK; HERRMANN, 2016; GARETTI; FUMAGALLI; NEGRI, 2015
	A empresa deve ter uma Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).	XU; XU; LIA, 2018

TECNOLOGIAS HABILITADORAS	PRÉ-REQUISITOS	AUTORES
ROBÔS COLABORATIVOS	A empresa deve ter mão de obra treinada em robótica;	MASINGA; CAMPBELL; TRIMBLE, 2015
	A empresa deve ter conhecimento das limitações dos robôs colaborativos;	TSAROUCHI <i>et al.</i> , 2017
	A empresa deve ter capacidade financeira;	KRUGER, J.; LIEN, T. K.; VERL, 2009
	A empresa deve fazer um mapeamento minuciosos do processo e da trajetória;	MEZIANE; OTIS; EZZAIDI, 2017
	A empresa deve fazer um trabalho psicológico com os humanos que trabalham com os robôs colaborativos;	BOENZI <i>et al.</i> , 2016; ARAI; KATO; FUJITA, 2010
	A empresa deve ter conhecimento das normas: ISO TS 15066; NBR 12110-2.	ARAI; KATO; FUJITA, 2010; ANTONELLI; BRUNO, 2017; MASINGA; CAMPBELL; TRIMBLE, 2015; FABER; BÜTZLER;
MANUFATURA ADITIVA	A empresa deve avaliar as características das peças a serem produzidas;	AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018; AEA, 2018
	A empresa deve levar em conta a sua capacidade técnica;	DUDA; RAGAHVAN, 2016
	A empresa deve levar em conta o tempo de fabricação;	AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018
	A empresa deve levar em conta a sua segurança contra ataques cibernéticos;	KHAN; TUROWSKI, 2016
	A empresa deve possuir mão de obra capacitada.	MELLOR; HAO; ZAHNG, 2014
	A empresa deve ter seus arquivos de peças digitalizados.	MORAR; KEMPER, 2016; GUOPING; YUN; AIZHI, 2017
REALIDADE AUMENTADA	A empresa deve levar em conta o ambiente de trabalho do operador	GHEISARI; IRIZARRY, 2014
	A empresa deve ter seus arquivos digitalizados	NEE <i>et al.</i> , 2012
	A empresa deve ter um mapeamento detalhado do processo	NEE <i>et al.</i> , 2012
	A empresa deve ter um estudo ergonômico das funções do operador	GHEISARI; IRIZARRY, 2014; DI DONATO <i>et al.</i> , 2015
	A empresa deve ter um software adequado para a utilização do hardware	CERUTI <i>et al.</i> , 2019
	A empresa deve planejar quais dados podem ser compartilhados.	GHEISARI; IRIZARRY, 2014
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	A empresa deve ter capacidade financeira.	WBI ON LIFE BUSINESS BRASIL, 2017
	A empresa deve ter estratégias e conhecimento prévio da AI.	WBI ON LIFE BUSINESS BRASIL, 2017
	A empresa deve ter a comunicação M2M.	LI <i>et al.</i> , 2017
	A empresa deve ter sensores nos equipamentos.	PAN, 2016
	A empresa deve ter as tecnologias habilitadoras digitais implantada.	ZHONG <i>et al.</i> , 2017
	A empresa deve ter segurança cibernética	WBI ON LIFE BUSINESS BRASIL, 2017

Fonte: Elaborado pelo autor

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO PARA MEDIÇÃO DO GRAU DE PRONTIDÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NAS EMPRESAS INDUSTRIAIS.

Neste capítulo esta tese apresenta o modelo proposto para medir o grau de prontidão das empresas industriais para a implantação da Indústria 4.0, o qual adotou o conceito do autor apresentado na página 34.

3.1 INTRODUÇÃO

Como já se mencionou, o objetivo central do estudo agora desenvolvido é propor um modelo que possa medir o grau de prontidão de uma indústria para a implantação efetiva da Indústria 4.0. Para isso, realizou-se inicialmente a revisão da literatura que identificou sete tecnologias habilitadoras, foi acrescentada mais uma, sugerida pelos especialistas, totalizando oito tecnologias com seus respectivos pré-requisitos, para que uma empresa industrial esteja devidamente pronta para adotar a I 4.0. Resta, portanto, propor o modelo que se busca.

O Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa (Ferreira, 2014) define a palavra modelo como *“aquilo que serve de exemplo ou norma”*. Assim, propõe-se que o modelo para medição do grau de prontidão de uma indústria para a implantação da Indústria 4.0, seja estabelecido como um padrão orientador, que permita às empresas industriais avaliar quão preparadas estão para alcançar aquele objetivo e, ao mesmo tempo, poder identificar áreas de oportunidade para o desenvolvimento de ações que as posicione de forma mais favorável para tal.

Portanto, o modelo a ser aqui proposto deverá estabelecer para uma empresa industrial, um grau de prontidão ideal para a I 4.0, baseado nas tecnologias habilitadoras identificadas e seus respectivos pré-requisitos. Ainda, esse modelo deverá permitir uma comparação das condições atuais de uma empresa analisada com aquele padrão ideal, gerando uma medida única que meça o grau de prontidão para a implantação da I 4.0 na empresa considerada. Finalmente, o modelo proposto deverá ainda permitir a identificação de ações gerenciais que melhorem o seu grau

de prontidão, com base na comparação entre o padrão ideal e a situação atual da empresa, levando em conta cada uma das tecnologias habilitadoras e seus pré-requisitos.

Para tanto, é proposta desta tese que se desenvolva o modelo pretendido inspirando-se em uma estrutura como a apresentada pela norma desenvolvida pela SAE – *Society of Automotive Engineers* (Sociedade dos Engenheiros Automotivos) – para identificar e medir as melhores práticas para a implementação da Manufatura Enxuta nas empresas.

Em 1999, a SAE emitiu as normas SAE J4000 – identificação e implementação de melhores práticas na implementação de uma operação enxuta e J4001 – manual do usuário para a implementação de uma operação enxuta – visando avaliar a adoção das melhores práticas na implementação das práticas enxutas em empresas do setor automotivo dos Estados Unidos da América (SAE, 2001a,b).

A norma SAE J4000 considera seis *elementos* para a implementação da Manufatura Enxuta, que representam áreas de uma empresa nas quais as práticas enxutas serão avaliadas. Assim, o elemento 4 dessa norma leva em conta aspectos relacionados à gerência e confiabilidade, o 5 ao pessoal, o 6 ao sistema de informações, o 7 aos fornecedores, à organização e aos clientes, o 8 ao produto e o 9 ao processo e ao fluxo.

Para estimar o grau de adoção de cada um desses elementos em uma empresa, a norma estabelece um conjunto de componentes para cada um. Estes são afirmações que procuram identificar aspectos relevantes da Manufatura Enxuta em relação a cada elemento considerado.

A norma J4000 estabelece para cada elemento, uma quantidade de afirmações ou de componentes que variam de acordo com o elemento considerado. Segundo a SAE, esse número de componentes deve refletir a importância relativa de cada um dos elementos, para a implantação da Manufatura Enxuta. Exemplifica-se, para maior compreensão: no elemento 9 – Processo e Fluxo – existem 13 componentes (afirmações) enquanto que no elemento 6 – Informação – há apenas 4. Isso mostra que a importância relativa do processo e do fluxo na implementação da Manufatura Enxuta é bem mais relevante do que as considerações relativas ao sistema de informações.

A análise completa da J4000 mostra que há ao todo 52 afirmações que são consideradas para se avaliar a implementação das práticas enxutas em uma empresa. Essa avaliação é feita por meio da identificação de quatro possíveis respostas a cada uma das afirmações quais sejam: Nível 0 (L0) – o componente não está presente ou há grandes inconsistências em sua implementação; Nível 1 (L1) – o componente está presente, mas há pequenas inconsistências em sua implementação; Nível 2 (L2) – o componente está totalmente presente e efetivamente implementado e Nível 3 (L3) – o componente está totalmente presente, efetivamente implementado e exibe melhoramentos na sua execução nos últimos 12 meses. Para cada componente, a norma SAE J4001 define aspectos específicos para cada um dos níveis de implementação considerados. Veja-se um exemplo no Quadro 4.

Quadro 4: Exemplo dos aspectos de cada componente

Elemento 8 - Produto

Componente 8.6: Os prazos para o projeto do produto e do processo são médios e estão continuamente sendo reduzidos.

Níveis de Implementação:

L0 – Os prazos de projeto não são medidos ou não são avaliados quanto à sua redução.

L1 – As atividades de projeto são medidas por meio de cronogramas.

L2 – Os prazos são medidos de maneira formal, com um processo de melhoria contínua sendo observado resultando em redução dos prazos de desenvolvimento.

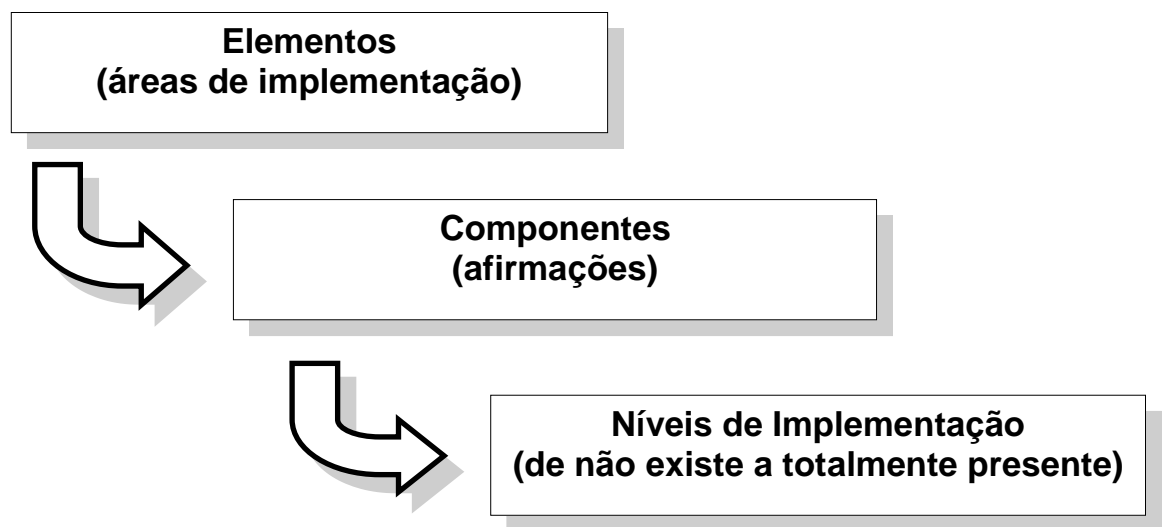
L3 – L2 mais evidência de melhoria na execução nos 12 meses passados.

Fonte: SAE (2001b)

Assim, para se aferir o grau de implementação desse componente (8.6) em uma empresa, determina-se, por meio de informações levantadas junto a ela, qual dos 4 níveis (L0, L1, L2 ou L3) melhor descreve a situação atual dessa empresa em relação aos prazos de projeto de produto e do processo. Portanto, se na avaliação do que ocorre na empresa se chegar à conclusão que L1 é a afirmação que melhor descreve a situação observada, pode-se afirmar que no componente 8.6 o grau de implementação será L1.

Esse mesmo procedimento é reproduzido para todos os 52 elementos que compõem a norma SAE J4000. Na Figura 27 está apresentado o resumo da estrutura da J4000, a qual será usada para estruturar o modelo que aqui se desenvolve.

Figura 27: A estrutura da norma SAE J4000.



Fonte: Adaptada de SAE (2001a).

A norma SAE J 4000, foi utilizada, no presente estudo, somente com relação a sua estrutura. Os elementos e componentes, utilizados no modelo, desenvolvido neste estudo, para medir o grau de prontidão de uma empresa industrial, não tem nenhuma relação com os utilizados pela norma J 4000, para medir as melhores práticas na implementação de uma operação enxuta (*lean manufacturing*).

3.2 O MODELO PARA MEDIDA DO GRAU DE PRONTIDÃO

Neste item faz-se o desenvolvimento do modelo que será utilizado para medir o grau de prontidão de uma empresa industrial para a implantação plena da Indústria 4.0. Inicia-se apresentando um conjunto de pré-requisitos de cada uma das tecnologias habilitadoras selecionadas por este trabalho, seguindo-se uma proposta de procedimento para a medição do grau de prontidão respectivo.

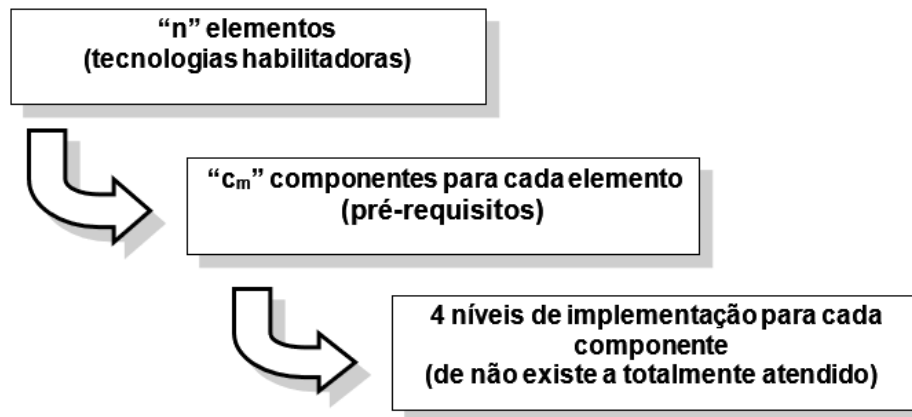
3.2.1. Os pré-requisitos para a implementação das tecnologias habilitadoras

Como já se mencionou anteriormente, este trabalho irá utilizar como base do desenvolvimento do modelo para medida do grau de prontidão uma estrutura semelhante à utilizada pela SAE J4000 / 4001 para caracterizar o conjunto de pré-requisitos para as tecnologias habilitadoras previamente definidas.

Para tanto, a cada *elemento* da norma original SAE se associará uma das tecnologias habilitadoras identificadas. Assim, esse conjunto de tecnologias será composto de “n” elementos. Para caracterizar o atendimento a esses elementos, os pré-requisitos identificados na literatura serão usados como *componentes* “ c_m ” afirmações para cada um dos “n” elementos, que caracterizarão os pré-requisitos necessários de cada tecnologia habilitadora para que a empresa esteja preparada para a implantação da I 4.0. A estrutura aqui sugerida está mostrada na Figura 28.

A observação válida nesta estrutura é que ela é flexível quanto ao número de tecnologias adotadas, bem como, à quantidade de pré-requisitos por tecnologia. Tanto assim, que foi acrescentada uma tecnologia à relação inicial, como foram adaptados alguns pré-requisitos encontrados na literatura, devido às sugestões dos especialistas aos quais foram submetidos.

Figura 28: A estrutura básica do modelo proposto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda em linha com o que estabelece a SAE J4000, para medir o grau de disponibilidade desses pré-requisitos serão utilizados 4 níveis de adoção, como segue: Nível 0 (L0) – o pré-requisito não está presente na empresa analisada; Nível 1 (L1) – o pré-requisito existe, mas é atendido de maneira incompleta; Nível 2 (L2) – o pré-requisito existe e é quase totalmente atendido e Nível 3 (L3) – o pré-requisito é integralmente atendido. Conforme resumido no Quadro 5.

Quadro 5: Avaliação dos pré-requisitos

NÍVEL	AVALIAÇÃO DO PRÉ-REQUISSITO	NOTA
L0	A empresa não tem este pré-requisito	0
L1	A empresa tem conhecimento do pré-requisito, porém de forma superficial	1
L2	A empresa tem este pré-requisito praticamente adotado	2
L3	A empresa tem este pré-requisito totalmente adotado	3

Elaborado pelo autor

Dessa forma e em consonância com o que se determinou na revisão bibliográfica, e pela opinião dos especialistas indicados na metodologia, desta tese, os pré-requisitos da I 4.0 associados a cada tecnologia habilitadora foram verificados, em cada empresa pesquisada, por meio de entrevistas semiestruturadas, *in loco*, utilizando-se o instrumento de avaliação apresentado no Apêndice. No Quadro 6, tem-se um exemplo da tecnologia *Big Data* com um dos seus pré-requisitos e os níveis de avaliação.

Quadro 6: Exemplo do Instrumento de Avaliação da entrevista semiestruturada

Elemento 1 / Tecnologia 1 – *Big Data*

1.1. A empresa deve ter infraestrutura para sistemas digitais.

L0. A empresa não tem infraestrutura para sistemas digitais.

L1. A empresa tem uma pequena infraestrutura para sistemas digitais.

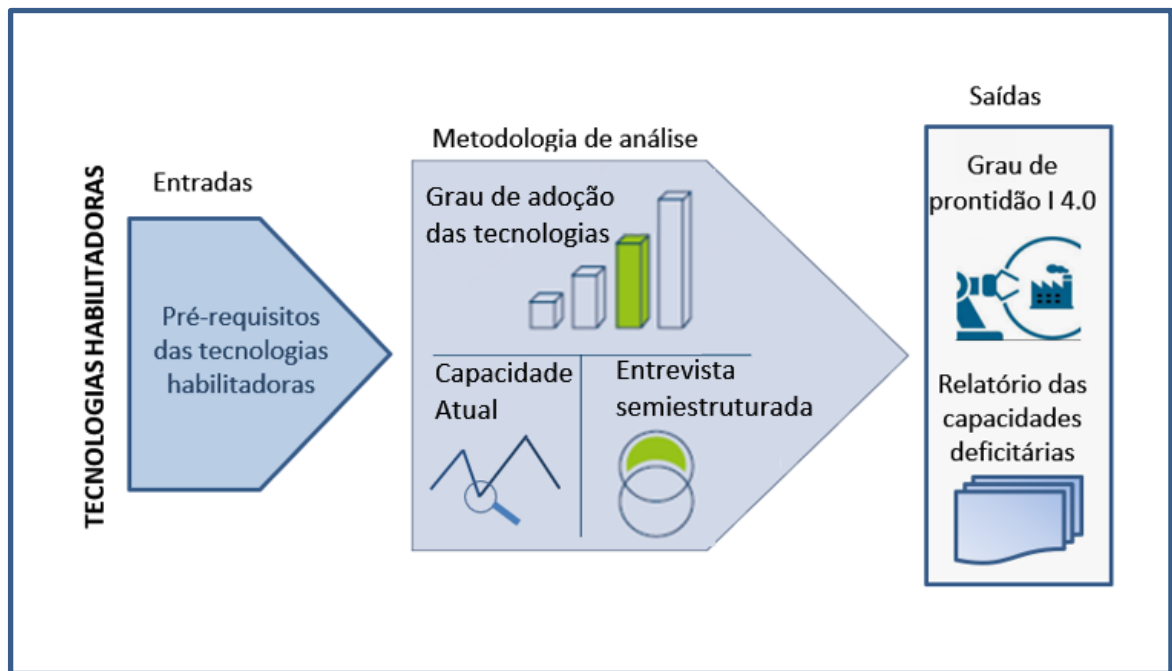
L2. A empresa tem uma infraestrutura mediana para sistemas digitais.

L3. A empresa tem completa infraestrutura para sistemas digitais.

Fonte : Elaborado pelo autor

A Figura 29 mostra o modelo conceitual deste estudo. As variáveis de entradas são os pré-requisitos de cada tecnologia habilitadora, selecionados da literatura, e sugeridos pelos especialistas consultados. A metodologia de análise, é por meio de entrevistas semiestruturadas, seguindo o roteiro do instrumento de avaliação, constante no apêndice, desta tese. As entrevistas são feitas com funcionários da empresa, em nível de gerência ou diretoria, comprometidos com o desenvolvimento da I 4.0. Com base nos dados obtidos nas entrevistas é feito o levantamento da capacidade atual da empresa, que é o cálculo do nível médio de adoção de cada tecnologia, cujo conjunto dos resultados formará o grau de prontidão. As saídas do modelo conceitual, são o nível de prontidão da empresa em percentual, classificando-a na dimensão correspondente à métrica definida e um relatório das capacidades das tecnologias, apresentando quais precisam ser alavancadas, para a empresa chegar ao grau de prontidão ideal (100%).

Figura 29: Modelo conceitual do estudo



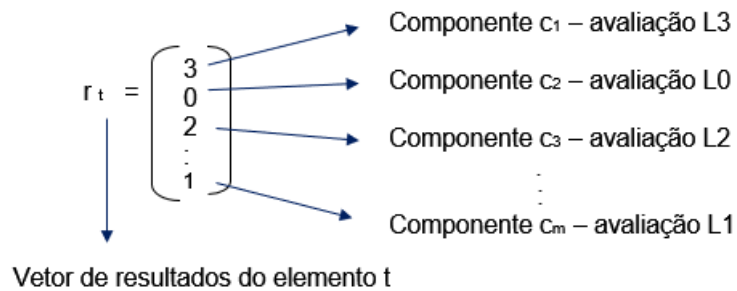
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2. A medida do grau de adoção de um elemento (tecnologia)

Para medir o grau de prontidão de uma empresa em relação a uma determinada tecnologia habilitadora (t), propõe-se determinar o nível de disponibilidade dos respectivos pré-requisitos (componentes), utilizando-se o desenvolvimento proposto por Lucato *et al.* (2012) que empregou abordagem semelhante para determinar o grau de competitividade de empresas de autopeças. Baseando-se nesse trabalho anterior, associou-se inicialmente a cada nível de adoção de determinado componente um dado número de pontos: L0 – 0 pontos; L1 – 1 ponto; L2 – 2 pontos e L3 – 3 pontos.

Então, para cada elemento " t " haverá um conjunto de " p " níveis de adoção, um para cada componente, que Lucato *et al.* (2012) sintetizam em um vetor de resultados, conforme Figura 30, tomando-se como exemplo um elemento genérico " t ".

Figura 30: Representação do vetor resultado



Fonte: Adaptado pelo autor de Lucato *et al.* (2012)

Para maior facilidade de tratamento, pode-se seguir a indicação de Johnson e Wichern (2014) que também representam um vetor pela sua forma transposta:

$$r_t = [3, 0, 2, \dots, 1]$$

Ainda segundo Lucato *et al.* (2012), para se determinar o nível médio de adoção de um elemento (tecnologia) (d_t), basta dividir a somatória dos pontos obtidos na avaliação dos componentes desse elemento pela somatória do máximo de pontos possíveis para essa mesma avaliação, ou seja:

$$d_t = \frac{(\Sigma \text{ dos pontos obtidos na avaliação dos componentes do elemento "t"})}{(\Sigma \text{ dos pontos máximos possíveis p/ os componentes do elemento "t"})}$$

Para maior clareza, cite-se um exemplo. Imagine-se que na avaliação dos pré-requisitos para a implantação da I 4.0 para determinada tecnologia habilitadora (t_3) (elemento 3) o vetor de resultados tenha sido:

$$r_{t_3} = [2, 1, 2, 1, 1, 1]$$

Então, pela abordagem aqui proposta o grau de adoção da tecnologia t_3 poderá ser calculado como:

$$d_{t_3} = \frac{2 + 1 + 2 + 1 + 1 + 1}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{8}{18} = 0,444 \text{ ou } 44,4\%$$

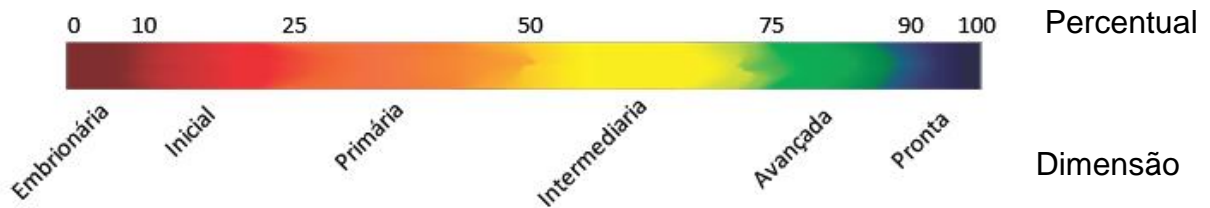
Nesse caso, diz-se que, em relação à tecnologia t_3 , a empresa analisada atende a 44,4% dos pré-requisitos dessa tecnologia habilitadora.

No entanto, o que se pode afirmar em relação a esse grau de adoção da tecnologia t_3 ? Ele é alto, médio ou baixo?

Para poder estabelecer uma classificação em relação a esse aspecto, recorreu-se à Norma ISO/IEC 15504-5, voltada para as boas práticas da Engenharia de *Software*. Os seis níveis de capacidade, sequenciais e cumulativos da norma, serão utilizados como métrica, para avaliar como uma organização, está realizando um determinado processo (ABNT, 2004). Porém para fazer a adaptação desses conceitos para a presente tese e por falta de referência na literatura sobre o tema, decidiu-se estabelecer, como parte do modelo aqui desenvolvido as dimensões do grau de adoção conforme mostrados na Figura 31, as quais ficam definidas da seguinte forma:

- Embrionária: 0 — 10%, nesta dimensão os pré-requisitos não estão implementados. Existe pouca ou nenhuma evidência de que haja algum interesse pelas tecnologias habilitadoras da I 4.0.
- Inicial: 10 — 25%, poucos pré-requisitos começam a aparecer nesta dimensão da tecnologia, caso haja algum pré-requisito atendido integralmente (L3), os demais devem estar no nível de implementação inexistente (L0).
- Primária: 25 — 50%, a empresa começa a ter sua atenção voltada para as tecnologias habilitadoras da I 4.0, nesta dimensão alguns pré-requisitos de algumas tecnologias, começam a ser considerados pela empresa. Ela já deve ter no mínimo cinco dos seis pré-requisitos no nível de implantação L1.
- Intermediária: 50 — 75%, a empresa já percebeu a importância da digitalização. As tecnologias necessárias para a I 4.0 já estão identificadas, começa-se estudos mais profundos para o desenvolvimento das tecnologias no conjunto organizacional. Mais da metade dos pré-requisitos das tecnologias habilitadoras devem estar no nível L2.
- Avançada : 75 — 90%, a alta administração da empresa já está consciente que deve estar pronta para I 4.0, nesta dimensão as tecnologias estão bem avançadas, no mínimo um dos pré-requisitos deve estar no nível de implementação máximo (L3) e os demais praticamente implementados (L2).
- Pronta: 90 — 100%, nesta dimensão as tecnologias são consideradas prontas, pelo menos cinco dos seis pré-requisitos devem estar totalmente atendidos (L 3) e o outro deve estar no mínimo no nível L2.

Figura 31: Dimensões do grau de adoção



Fonte: Elaborado pelo autor

Estes níveis, estipulados na norma, serão utilizados como métrica para determinar as dimensões da adoção das tecnologias. O mesmo critério também, será adotado como métrica para determinar a dimensão do grau de prontidão, na qual se encontra a empresa analisada para implementação da I 4.0.

No exemplo mostrado, com relação a tecnologia t_3 , que apresentou um grau de adoção de 44,4% pode-se dizer que essa tecnologia está na dimensão primária.

3.2.3. A medida do grau de prontidão de uma empresa

Até o presente o modelo que aqui se propõe desenvolver mediu o grau de adoção das tecnologias, com relação aos seus pré-requisitos, resta agora, para alcançar o objetivo deste estudo, propor uma forma para medir o grau de prontidão de uma empresa.

Para tanto, suponha-se uma empresa industrial para a qual se deseja determinar o grau de prontidão para a implantação da I 4.0. Sejam $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n$ as “n” tecnologias habilitadoras consideradas. Admita-se que para cada uma dessas tecnologias tenham sido determinados os respectivos os graus de adoção com relação aos seus pré-requisitos. Sejam eles: $d_{t1}, d_{t2}, d_{t3}, d_{t4}, \dots, d_{tn}$.

Na revisão bibliográfica realizada se identificou somente um modelo de avaliação do grau de prontidão para a implantação da I 4.0, no qual se utilizou uma ponderação que traduzisse a relevância, não em relação as tecnologias, mas para seis áreas da empresa propostas no referido artigo. No entanto, essa ponderação baseou-se no

modelo IMPULS, explicado na revisão de literatura desta tese, que apesar do nome (grau de prontidão), mede o grau de maturidade e não efetivamente o de prontidão, razão pela qual tal avaliação não foi considerada. O estudo aqui proposto não contemplou esse tipo de avaliação ponderada (fica como sugestão de estudos futuros), de sorte que foi considerado que todas essas tecnologias tivessem o mesmo grau de relevância no cálculo do grau de prontidão para a implementação da I 4.0. Diante disso, pode-se considerar que a contribuição do grau de adoção de uma determinada tecnologia (d_i) para o grau de prontidão da empresa como um todo seja:

$$Dt_i = \frac{d_i}{n} \quad (1)$$

Tal condição se repete para todas as tecnologias, cada uma dando a sua respectiva contribuição para a formação do grau de prontidão da empresa como um todo, ou seja:

$$D_R = Dt_1 + Dt_2 + Dt_3 + Dt_4 + \dots + Dt_n \quad (2)$$

ou

$$D_R = \frac{d_1}{n} + \frac{d_2}{n} + \frac{d_3}{n} + \frac{d_4}{n} + \dots + \frac{d_n}{n} \quad (3)$$

Ou, ainda:

$$D_R = \frac{d_1+d_2+d_3+d_4+\dots+d_n}{n} = \frac{\sum_1^n d_i}{n} \quad (4)$$

onde:

D_R – Grau de prontidão para a implantação da I 4.0 em uma empresa industrial

d_i – Grau de adoção da tecnologia t_i

n – número de tecnologias habilitadoras consideradas

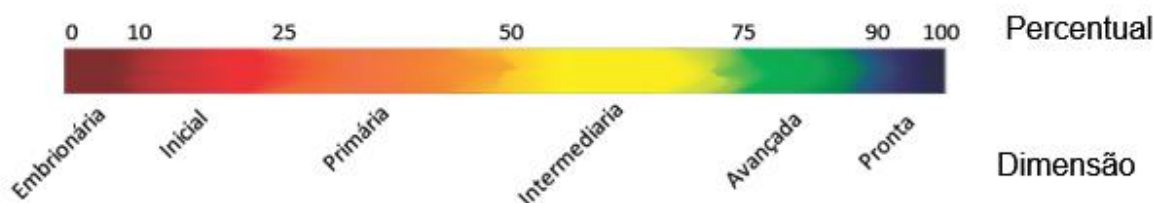
Utilizando o mesmo critério de classificação das tecnologias, para a análise da dimensão do grau de prontidão. Decidiu-se estabelecer, como parte do modelo aqui desenvolvido, as dimensões do grau de prontidão, semelhantes aos adotados para as tecnologias, conforme mostrados na Figura 32, as quais ficam definidas com as características apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7: Características das dimensões do grau de prontidão

Grau de Prontidão (Dr) %	Dimensão	Características
0 — 10	Embrionária	A empresa tem algum conhecimento de apenas uma tecnologia, desconhece as demais
10 — 25	Inicial	A empresa tem algum conhecimento das tecnologias, porém pode desconhecer algumas delas
25 — 50	Primária	A empresa tem conhecimento de todas as tecnologias, porém nem todas já começaram a ser adotadas
50 — 75	Intermediária	A empresa tem conhecimento de todas as tecnologias e todas já começaram a ser adotadas
75 — 90	Avançada	A empresa tem conhecimento de todas as tecnologias e todas devem apresentar um alto grau de adoção
90 — 100	Pronta	A empresa deve ter praticamente todas as suas tecnologias no grau de adoção máximo

Elaborado pelo autor

Figura 32: Dimensões do grau de prontidão

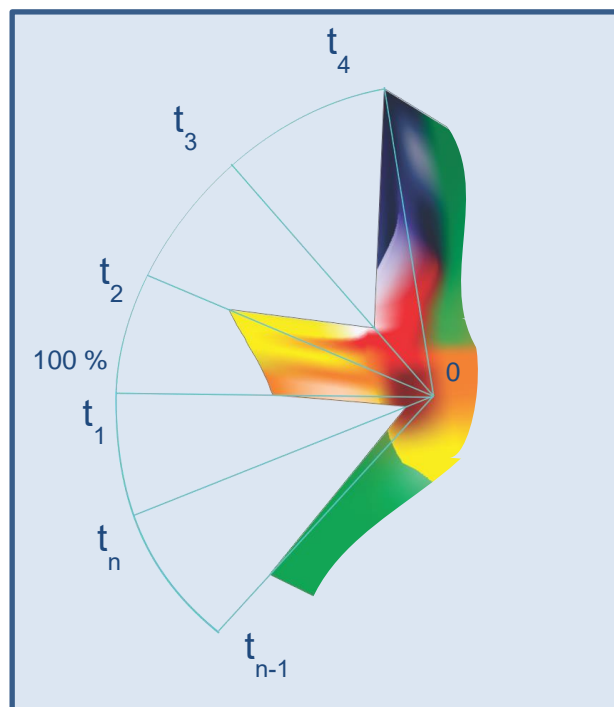


Elaborado pelo autor

O grau de prontidão de uma empresa, pode ser representado no plano por meio de um gráfico radar no qual cada eixo representa uma tecnologia (t_n), sendo $n \geq 1$, os eixos partem do ponto central do círculo e têm uma escala de 0 a 100%.

Ligando-se os pontos com os valores dos graus de adoção das tecnologias, define-se no plano do gráfico um polígono irregular, cuja área A , será a representação gráfica do grau de prontidão da empresa analisada, o que pode ser observado na Figura 33.

Figura 33: Representação gráfica do grau de prontidão



Fonte: Elaborado pelo autor

Para ilustrar a aplicação do conceito aqui definido, cite-se mais um exemplo. Considere-se uma empresa industrial para a qual foram identificadas 6 tecnologias habilitadoras. Suponha-se que para cada uma tenham sido definidos quatro pré-requisitos (componentes). Finalmente, suponha que, uma análise das condições da empresa em cada uma dessas tecnologias, mostrou os seguintes graus de adoção:

$$\begin{aligned}
 r_{t1} = [1,0,2,0] & \rightarrow d_1 = 0,250 \text{ ou } 25,0\% \\
 r_{t2} = [1,3,1,2] & \rightarrow d_2 = 0,583 \text{ ou } 58,3\% \\
 r_{t3} = [3,2,2,1] & \rightarrow d_3 = 0,667 \text{ ou } 66,7\% \\
 r_{t4} = [1,1,2,0] & \rightarrow d_4 = 0,333 \text{ ou } 33,3\% \\
 r_{t5} = [2,2,2,3] & \rightarrow d_5 = 0,750 \text{ ou } 75,0\% \\
 r_{t6} = [1,2,3,0] & \rightarrow d_6 = 0,500 \text{ ou } 50,0\%
 \end{aligned}$$

Com base nesse exemplo, o grau de prontidão dessa empresa para a implantação da I 4.0 pode ser determinada pela aplicação da Equação 4, ou seja:

$$D_R = \frac{d_1+d_2+d_3+d_4+d_5+d_6}{6} = \frac{0,250+0,583+0,667+0,333+0,750+0,500}{6}$$

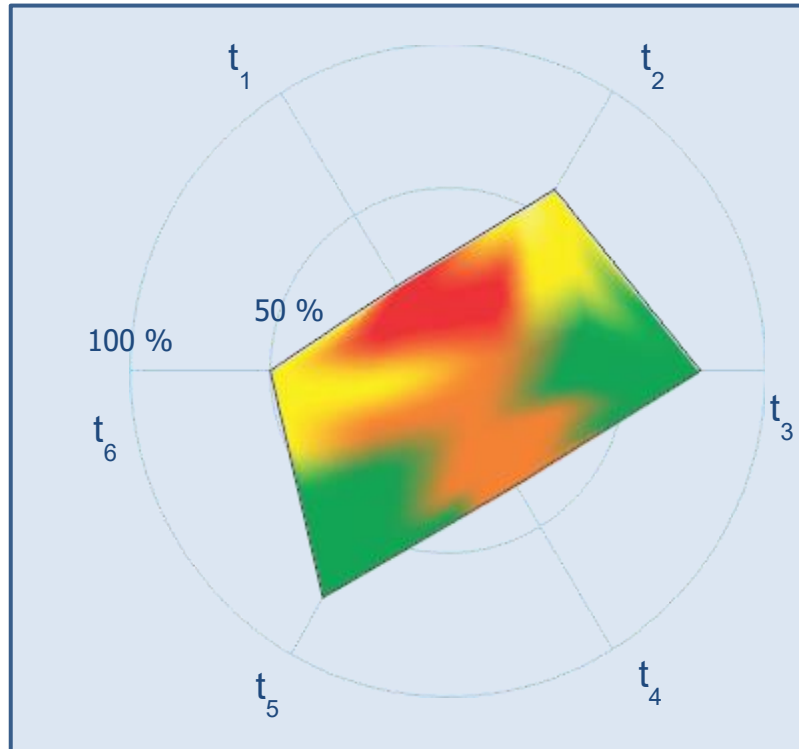
ou:

$$D_R = \frac{3,083}{6} = 0,5138 \text{ ou } 51,4\%$$

Assim, nesse exemplo, a empresa considerada tem um grau de prontidão de 51,4%, podendo-se entender que no seu processo de prontidão para implantação da I 4.0, ela completou 51,4% do total necessário.

A Figura 34 é a representação gráfica da área do grau de prontidão da empresa deste exemplo. Assim, adotando a métrica definida para classificar as dimensões do grau de prontidão (Figura 32), pode-se dizer que a empresa do exemplo se encontra na dimensão intermediária.

Figura 34: Representação da área do grau de prontidão



Fonte: Elaborado pelo autor

Como também definido nos objetivos para este desenvolvimento, o modelo proposto deveria permitir aos gestores da empresa identificar ações gerenciais que possam ser implantadas com a finalidade de melhorar o grau de prontidão da empresa. Isso pode ser realizado por meio da análise dos resultados obtidos no atendimento dos pré-requisitos em cada tecnologia. Voltando ao exemplo acima, fica claro que a tecnologia que neste momento mais afeta o grau de prontidão da empresa é a tecnologia t_1 , para a qual o grau de adoção foi o menor dentre todos os avaliados (apenas 25%). É evidente que uma maneira de aumentar o grau de prontidão da empresa como um todo seria definir ações gerenciais em relação àquela tecnologia de sorte a ir progressivamente aumentando esse grau de adoção. O mesmo procedimento poderia ser adotado em relação às demais cinco tecnologias consideradas no exemplo.

4. METODOLOGIA DE PESQUISA

A presente tese tem por objetivo trazer respostas às questões propostas por meio de um procedimento racional e sistemático. Segundo Gil (2010), obter essas respostas à pesquisa é importante, pois será o meio de colher informações suficientes, possibilitando uma relação direta com o problema a ser estudado.

Até o momento mostrou-se como foram estabelecidos os princípios conceituais que suportam e fazem parte do modelo proposto por esta tese. Neste capítulo, será mostrado no subcapítulo 4.1 a estrutura do desenvolvimento da tese, no subcapítulo 4.2 serão apresentados os critérios da revisão da literatura no subcapítulo 4.3 a validação pelos especialistas dos pré-requisitos e no subcapítulo 4.4 a metodologia da pesquisa de campo para verificação da validade do modelo, às situações do mundo real.

4.1 DESENVOLVIMENTO DA TESE

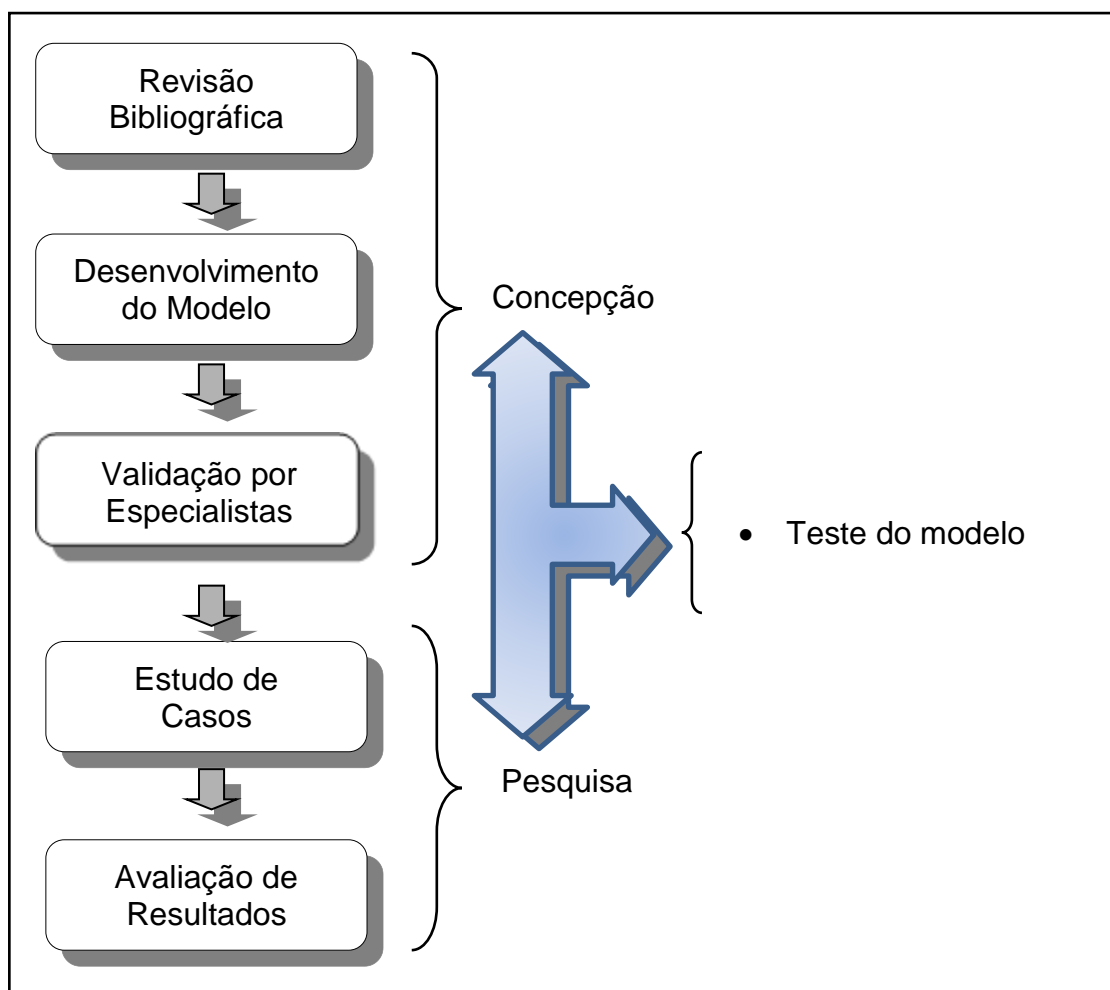
A estrutura do desenvolvimento desta tese está destacada na Figura 35.

Esta tese foi dividida em duas fases:

- a primeira, que foi da concepção, envolveu a revisão da literatura, o desenvolvimento do modelo e a validação das tecnologias e pré-requisitos pelos especialistas.
- a segunda fase que foi da pesquisa de campo envolveu o estudo de casos e a avaliação dos resultados.

Após a avaliação, em função dos resultados obtidos, obteve-se a validação do modelo proposto.

Figura 35: A estrutura do trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 CRITÉRIOS PARA A REVISÃO DA LITERATURA

Para pesquisar como a literatura aborda as tecnologias habilitadoras para implantação da Indústria 4.0, os modelos de maturidade ou prontidão e os pré-requisitos necessários para que a empresa adote as tecnologias habilitadoras necessárias, fez-se uma revisão da literatura de artigos científicos, e publicações de consultorias conceituadas no cenário internacional, nas seguintes bases de artigos acadêmicos: Emerald, Science Direct, Taylor & Francis, ProQuest, Scopus, Compendex, SAGE,

Web of Science, Scielo (com os termos acima traduzidos para o Português) e Google Scholar. Estas bases foram utilizadas nas três seleções mostradas a seguir, alterando-se somente o conjunto de palavras-chaves, de acordo com o propósito da pesquisa de cada seleção.

4.2.1 Seleção dos artigos para identificar os modelos de maturidade ou prontidão.

Para se identificar artigos que identificassem os modelos de maturidade ou prontidão, utilizou-se as seguintes combinações de palavras chaves: *“maturity model” “industry 4.0”*; *“readiness model” “industry 4.0”*; *“maturity model” “industrie 4.0”*; *“readiness model” “industrie 4.0”*; *“maturity model” “smart factory”*; *“readiness model” “smart factory”*.

Como resultado desta busca, foram encontrados, na literatura, entre artigos e publicações de conceituadas consultorias, 44 publicações, destas 11 eram repetidas e foram descartadas, 23 artigos não foram considerados, seja por serem superficiais, ou por não trazerem novidade quanto aos modelos. No final, foram considerados 10 artigos, correspondentes a 9 modelos, considerados relevantes, que estão detalhados na revisão bibliográfica deste estudo, no capítulo 2.

4.2.2 Seleção dos artigos para identificar as tecnologias habilitadoras relevantes

Inicialmente, para se identificar artigos que identificassem as tecnologias habilitadoras utilizou-se as seguintes combinações de palavras chaves: *“Industrie 4.0” “technologies”*; *“Industry 4.0” “technologies”*; *“Smart Factory” “technologies”*; *“Industrie 4.0” “pillars”*; *“Industry 4.0” “pillars”*; *“Smart Factory” “pillars”*; *“IIoT” “technologies”*; *“IIoT” “pillars”*; *“Industrie 4.0” “enabling technologies”*; *“Industry 4.0” “enabling technologies”*; *“Smart Factory” “enabling technologies”*; *“IIoT” “enabling technologies”*.

Como resultado dessa busca foram identificados 332 artigos dos quais 45 apareceram repetidos nas bases pesquisadas. 268 não tratavam do relacionamento entre as tecnologias habilitadoras e a implantação da Indústria 4.0 ou se referiam a outras

áreas que não indústrias. Restaram, assim, 19 artigos que são comentados em relação ao seu conteúdo no capítulo 2 deste trabalho.

Destaque-se que nesses 19 artigos selecionados, foram mencionadas 20 tecnologias habilitadoras diferentes, das quais foram selecionadas 7, pelo critério da curva ABC, e uma por sugestão dos especialistas, totalizando oito tecnologias habilitadoras para a I 4.0, como já mencionado no capítulo 2. A Tabela 2, mostra as oito tecnologias selecionadas com a quantidade de citações encontradas na literatura.

Tabela 2: Tecnologias habilitadoras selecionadas

Tecnologias Habilitadoras	Citações
Internet das Coisas	19
Big Data	18
Computação em Nuvem	17
Sistema Físico Cibernético	13
Robos Colaborativos	11
Manufatura Aditiva	11
Realidade Aumentada	8
Inteligencia Artificial	6

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Seleção dos artigos para identificar os pré-requisitos de cada tecnologia habilitadora

Nesta etapa da revisão da literatura, para se verificar os pré-requisitos de cada tecnologia habilitadora, utilizou-se um conjunto de palavras chaves devidamente adaptado a cada uma das tecnologias habilitadoras. A seleção dos pré-requisitos, foi feita em duas etapas. Com a inclusão da AI pelos especialistas, foi necessário pesquisar para esta tecnologia habilitadora, seus respectivos pré-requisitos, e enviar em uma segunda etapa para apreciação dos especialistas.

O exemplo a seguir ilustra o conjunto das palavras chaves empregadas para a pesquisa de pré-requisitos do *Big Data*: “*big data*” “*pre-requirements*” “*implementation*”; “*big data*” “*road map*” “*implementation*”; “*big data*” “*barriers*” “*implementation*”.

Nas demais tecnologias foi alterado o nome de cada uma, permanecendo inalterado os demais termos e combinações de busca.

Como resultado dessa pesquisa na literatura, foram identificados 132 artigos. 13 apareceram repetidos nas diversas bases pesquisadas. 79 não tratavam dos pré-requisitos necessários para a implantação das tecnologias ou se referiam a outras áreas que não indústrias. Restaram, assim, 40 artigos que são comentados em relação ao seu conteúdo no capítulo 2 deste estudo. Estes artigos estão distribuídos em cada tecnologia habilitadora de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Quantidade de artigos dos pré-requisitos

Tecnologias Habilitadoras	Quant. Artigos
Internet das Coisas	6
Big Data	4
Computação em Nuvem	4
Sistema Físico Cibernético	4
Robos Colaborativos	8
Manufatura Aditiva	6
Realidade Aumentada	4
Inteligencia Artificial	4

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma síntese destes pré-requisitos, já incluídos os da AI, está mostrada no Quadro 3 na página 89 da revisão da literatura. No entanto, após serem apreciados pelos especialistas, em duas etapas, algumas sugestões foram incorporadas aos pré-requisitos. O instrumento de avaliação utilizado, bem como as entrevistas semiestruturadas, nos estudos de caso, para medir o grau de prontidão das empresas industriais, estão baseados nestas modificações. portanto a configuração final dos pré-requisitos, está mostrada no subcapítulo 4.3.

4.3 A VALIDAÇÃO DAS TECNOLOGIAS E SEUS PRÉ-REQUISITOS POR ESPECIALISTAS

Um fato que se observou na análise da literatura, realizada como parte desta tese, diz respeito à falta de consolidação do conhecimento relativo à Indústria 4.0, o que, de certa forma, já era de se esperar em função do pouco tempo em que esses conceitos estão sendo discutidos na Academia. Lembre-se que a I 4.0 como tal, iniciou-se apenas em 2011. Por isso, para se evitar um eventual distanciamento entre os conceitos teóricos da I 4.0 e a sua efetiva aplicação no mundo real, decidiu-se submeter a avaliação de especialistas.

O critério de escolha foi aleatório, conciliando a facilidade de acesso aos especialistas, seus envolvimento com a I 4.0 e buscando a diversidade dos setores de atuação de cada um deles.

A análise submetida aos especialistas, feita entre os meses de fevereiro e março de 2019, restringiu-se a opinarem sobre a validade das tecnologias habilitadoras, quanto a sua representatividade com relação à I 4.0 e, se os pré-requisitos encontrados na literatura, seriam expressivos para cada tecnologia. A análise feita pelos especialistas foi em duas etapas, na primeira eles receberam as sete tecnologias com os seus respectivos pré-requisitos, após sugerirem a inclusão da tecnologia da AI, fez-se uma pesquisa literatura para se encontrar os pré-requisitos desta tecnologia. Após serem selecionados foram enviados, em uma segunda etapa, aos especialistas que concordaram com os pré-requisitos apresentados.

Os quatro especialistas selecionados foram dos seguintes setores: empresa de consultoria, governo, indústria e academia. Dispostos nesta ordem não por grau de importância, mas por sequência cronológica das respostas.

- Especialista 1 da área de consultoria, é doutorando em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Mestre em Engenharia Industrial pela Universidade de Stanford, Engenheiro de Produção pela Escola Politécnica da USP com mais de 30 anos de experiência no desenho e implementação de projetos com impacto estratégico otimizando *supply chain* e transporte. Atualmente tem atuado no segmento agroindustrial com foco

também na biotecnologia, preparando indústrias brasileiras para substanciais aumentos de produtividade com a implantação da Indústria 4.0.

O especialista 1 destacou a importância de se colocar a AI como uma das tecnologias habilitadoras da I 4.0 e concordou com todos os pré-requisitos. Sugeriu a unificação dos pré-requisitos e a codificação, pois além de facilitar as entrevistas semiestruturadas, poderia amanhã facilitar um aplicativo para utilização em um universo de respondentes maior. Destacou a importância do desenvolvimento da AI nos robôs colaborativos, classificando os Veículos Guiados Automaticamente (AGVs), nesta categoria. As sugestões de padronizar e codificar os pré-requisitos foram incorporadas no instrumento de avaliação.

- Especialista 2 da área governamental, é formado em administração de empresas com mestrado em ciência da informação aplicada aos processos decisórios. Atuou como consultor de inteligência e estratégia no setor industrial, varejo e serviços por mais de dez anos. Em 2009 ingressou no quadro técnico de uma área ligada ao Ministério de Desenvolvimento Indústria e Comércio - MDIC, onde coordenou o programa do setor automotivo na formulação e implementação do programa Inovar Auto. Em 2016, assumiu o projeto indústria 4.0, desenvolvendo mapeamentos tecnológicos nacionais e internacionais e projetos de plataformas demonstradoras.

O especialista 2 achou interessante a unificação dos pré-requisitos com as respectivas codificações. Concordou com as tecnologias escolhidas e destacou a importância de AI para caracterizar a I 4.0. Sugeriu que no pré-requisito da tecnologia *Big Data*, “a empresa deve ter todos os seus dados/informações, organizados e mantidos em sistemas digitais”, fosse acrescentado o texto, a origem confiáveis dos dados, sugestão que foi incorporada, deixando o pré-requisito codificado com BD1 com a seguinte redação: “a empresa deve ter todos os seus dados/informações, confiáveis, organizados e mantidos em sistemas digitais”. Reforçou que isto deveria estar na tecnologia de AI, o que após explicações concordou que isto já estava implícito em um dos pré-requisitos da AI. Quanto aos demais pré-requisitos não houve questionamentos nem sugestões.

- Especialista 3 da área industrial, é engenheiro mecânico formado pela FEI, com pós-graduação em comércio exterior e administração de empresas pela USP. Tem 20 anos de experiência em empresas multinacionais, atuou tanto no Brasil

como no exterior. Desde de 2011 é diretor de negócios de uma grande empresa do setor de autopeças, diretor responsável pela divisão Industrial *Technique* para o setor automobilístico e especialista na difusão dos conceitos da indústria 4.0, digitalização e *Smart Connected Assembly Systems* para as indústrias de manufatura do Brasil.

O especialista 3 deu algumas sugestões. Uma delas foi não especificar somente RFID, no pré-requisito, da tecnologia IoT, “a empresa deve ter sensores instalados nos equipamentos com a tecnologia RFID”, sugerindo incluir a palavra similares, esta sugestão foi incorporada no pré-requisito, codificado como IC1, que ficou com a seguinte redação: “a empresa deve ter sensores instalados nos equipamentos com a tecnologia RFID ou similar”. Outras duas sugestões, também da tecnologia da IoT, foram quanto as exigências iniciais, comunicação M2M e *streaming* de eventos *on the fly*, nos seguintes pré-requisitos: “a empresa deve ter protocolo de comunicação M2M” e “a empresa deve ter streaming de eventos *on the fly*”. O especialista argumentou que essas exigências seriam muito difíceis de serem alcançadas por pequenas e médias empresas ou por aquelas que estariam no início dos estudos para a implantação da I 4.0. Essas considerações foram incorporadas nos pré-requisitos codificados como IC4 e do IC6, deixando, respectivamente, as seguintes redações: “a empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade de seus processos” e “a empresa deve ter streaming de eventos”, sendo que as exigências retiradas, foram colocadas nos níveis L3 de cada pré-requisito. Concordou com a padronização dos pré-requisitos e sua codificação e entende que a AI é um longo caminho a ser percorrido pelas empresas, mas concorda que é uma importante tecnologia para a I 4.0.

- Especialista 4 da área acadêmica, é desde 2015 até o momento Professor Adjunto de Logística industrial para o curso de graduação em Engenharia Logística para a Alimentação, gerido por uma grande Universidade na Itália. Seus campos de pesquisa incluem os paradigmas da Indústria 4.0, com particular referência à Logística Sustentável e a modelos de simulação baseados em Redes Neurais Artificiais. É membro do comitê científico da Conferência Conjunta sobre Engenharia Industrial e Gestão de Operações e do comitê organizacional da Conferência Internacional da Indústria. 4.0 e *Smart*

Manufacturing. A partir de 2017, ele é membro do Internacional Workgroup SC4: *Supply Chain Management* no contexto da 4ª Revolução Industrial.

O especialista 4 sugeriu incluir segurança cibernética na tecnologia do Sistema Cyber Físico, porém foi mostrado que isto já está implícito nesta tecnologia. Outra sugestão foi a inclusão de uma nona tecnologia, a integração vertical e horizontal, que é uma tecnologia habilitadora que apareceu na revisão da literatura entre as relacionadas, mas ficou fora da linha de corte adotada nesta tese, como foi uma opinião isolada esta tecnologia poderá ser incluída em estudos futuros. Concordou com os demais pré-requisitos.

Foram considerados somente os quatro especialistas, uma vez que houve uma unanimidade entre eles nos principais aspectos das questões propostas. Resumindo, como resultado dessa apreciação, foram incorporadas as seguintes sugestões nos pré-requisitos:

- ✓ Foi feita a padronização do texto, dos pré-requisitos que apareciam em mais de uma tecnologia e incluído um código de três dígitos, para identificar cada pré-requisito, composto por duas letras associadas a tecnologia e um número sequencial.
- ✓ Na tecnologia de IoT, foi acrescentado no pré-requisito IC1 “ou similar” após o termo “tecnologia RFID”, uma vez que existem alguns outros tipos de tecnologia para essas aplicações.
- ✓ Na tecnologia de IoT, foi retirado do pré-requisito IC4 o termo “M2M”, deixando somente protocolo de comunicação no seu descritivo.
- ✓ Ainda na tecnologia de IoT, foi retirado o termo “on the fly” do pré-requisito IC6.
- ✓ Na tecnologia *Big Data*, foi acrescentada a palavra “confiáveis” no pré-requisito BD1.

No Quadro 8, encontram-se os pré-requisitos os quais compõe o instrumento de avaliação, mostrado no Apêndice desta tese.

Por razões de confidencialidade das informações, as identidades dos especialistas, serão mantidas em sigilo. No entanto, se necessário e para possibilitar a confirmação das avaliações feitas, a identificação dos seus nomes será dada a conhecer à banca examinadora, que terá a liberdade de fazer as verificações que forem julgadas necessárias.

Quadro 8: Resumo revisado dos pré-requisitos das tecnologias habilitadoras

TECNOLOGIAS HABILITADORAS	PRÉ-REQUISITOS REVISADOS
INTERNET DAS COISAS	IC1 A empresa deve ter sensores instalados nos equipamentos com a tecnologia RFID ou similar.
	IC2 A empresa deve ter o Código Eletrônico do Produto.
	IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.
	IC4 A empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade de seus processos
	IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.
	IC6 A empresa deve ter <i>streaming</i> de eventos.
BIG DATA	BD1 A empresa deve ter seus dados/informações, confiáveis, organizados e mantidos em sistemas digitais.
	IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.
	BD2. A empresa deve ter pessoal habilitado para coletar e analisar os dados
	BD3 A empresa deve tratar essa tecnologia no nível estratégico.
	BD4 A empresa deve ter definido o que deseja resolver com os dados coletados.
	IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.
COMPUTAÇÃO EM NUVEM	IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.
	CN1. A empresa deve ter pessoal preparado para essa tecnologia.
	CN2 A empresa deve ter uma cultura voltada a externar a privacidade de seus dados.
	IC4 A empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade de seus processos.
	CN3. A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos nesta tecnologia.
	IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.
SISTEMA FÍSICO CIBERNÉTICO	IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.
	IC1 A empresa deve ter sensores instalados nos equipamentos com a tecnologia RFID ou similar.
	CF1 A empresa deve ter estrutura para análise de grandes quantidades de dados (Big Data).
	CF2 A empresa deve ter acesso a dados na nuvem.
	CF3 A empresa deve ter uma estrutura física de grande porte computadores instalada.
	CF4 A empresa deve ter uma Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).
ROBÔS COLABORATIVOS	RC1. A empresa deve ter pessoal preparado para essa tecnologia.
	RC2 A empresa deve ter conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.
	CN3. A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos nesta tecnologia.
	RC3 A empresa deve fazer um mapeamento minuciosos do processo e da trajetória dos robôs.
	RC4 A empresa deve fazer um trabalho psicológico com os humanos que trabalham com os robôs colaborativos.
	RC5 A empresa deve ter conhecimento das normas: ISO TS 15066; NBR 12110-2.
MANUFATURA ADITIVA	MA1 A empresa deve avaliar as características das peças a serem produzidas.
	MA2 A empresa deve levar em conta a sua capacidade técnica.
	MA3 A empresa deve levar em conta o tempo de fabricação em 3D.
	IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.
	MA4. A empresa deve ter pessoal preparado para essa tecnologia.
	MA5 A empresa deve ter seus arquivos de peças digitalizados em 3D.

TECNOLOGIAS HABILITADORAS	PRÉ-REQUISITOS REVISADOS
REALIDADE AUMENTADA	RA1 A empresa deve levar em conta o ambiente de trabalho do operador.
	RA2 A empresa deve ter seus arquivos digitalizados.
	RA3 A empresa deve ter um mapeamento detalhado do processo.
	RA4 A empresa deve ter um estudo ergonômico das funções do operador.
	RA5 A empresa deve ter software e hardware adequados.
	RA6 A empresa deve planejar quais dados podem ser compartilhados.
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	CN3. A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos nesta tecnologia.
	IA1 A empresa deve ter estratégias e conhecimento prévio da AI.
	IC4 A empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade de seus processos
	IC1 A empresa deve ter sensores instalados nos equipamentos com a tecnologia RFID ou similar.
	IA2 A empresa deve ter as tecnologias habilitadoras digitais implantada.
	IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 PESQUISA DE CAMPO

Após serem submetidos à opinião dos especialistas, os pré-requisitos revisados e adequados, compuseram, o instrumento de avaliação, que pode ser encontrado no apêndice desta tese, utilizado nas entrevistas semiestruturadas para testar a proposta desta tese às situações do mundo real. Neste sentido, foi realizada uma pesquisa de campo por meio de quatro estudos de caso, o método de seleção e as empresas selecionadas estão descritos a seguir.

4.4.1 A seleção do método e da técnica de coleta de dados

Assim, para poder levantar informações do mundo real sobre o grau de prontidão das empresas para a implantação da I 4.0, decidiu-se realizar uma pesquisa qualitativa do tipo exploratória em função de que, este tipo de investigação:

- a) Permite que o pesquisador aumente a sua familiaridade com o assunto – como destacam Marconi e Lakatos (2010, p.188), uma vez que os estudos exploratórios, têm como finalidade *“aumentar a familiaridade do pesquisador*

com o ambiente, fato ou fenômeno para a realização de uma pesquisa futura mais precisa”.

- b) Em função da complexidade do conhecimento sobre o fenômeno estudado e o fato de ser um assunto muito novo, com o crescente e rápido desenvolvimento de novas tecnologias, apesar de inúmeros trabalhos terem sido recentemente publicados (GERBERT *et al.* (2015); GUOPING; YUN; AIZHI (2017); ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ (2016); BORTOLINI *et al.* (2017)), o conhecimento sobre esse assunto está longe de permitir o estabelecimento de conclusões definitivas. Por isso, Voss *et al.* (2002) sugerem que pesquisas sobre o tema sejam desenvolvidas utilizando-se estudos exploratórios.
- c) O trabalho aqui proposto não pretende ser um estudo definitivo. Nesse sentido, o modelo proposto aplicado a situações do mundo real sugere a utilização de um estudo exploratório como um passo inicial como recomenda Voss *et al.* (2002).

De acordo com a pesquisa que este trabalho propõe, estabelecer que a ideia é desenvolver uma investigação exploratória não é suficiente para se determinar o método mais adequado. Cauchick Miguel (2012) estabelece um conjunto de possíveis métodos de pesquisa, enquanto Marconi e Lakatos (2010) identificam, para cada método, um conjunto de possíveis técnicas de coleta de dados. Detalhes são ilustrados no Quadro 9.

De acordo com Yin (2009), para se escolher o método de pesquisa a ser adotado, uma condição primordial e importante é o tipo de questão que se busca responder. O autor indica o estudo de caso como o método de pesquisa ideal, se as questões que envolvem a identificação do tipo “como” e “porque” certos fenômenos ocorrem. O estudo do grau de prontidão das empresas irá procurar verificar em que ponto essas empresas se encontram nos segmentos de mercado onde atuam e *como* elas poderão se equiparar nesta jornada rumo a I 4.0.

Quadro 9: Métodos de pesquisa e técnicas de coleta de dados

Métodos de Pesquisa	Técnicas de Coleta de Dados
Experimentos	Questionário
<i>Survey</i>	Formulário
Pesquisa de campo	Observação
Estudo de caso	Entrevistas
Pesquisa-ação	Pesquisa documental
Modelagem e simulação	Pesquisa bibliográfica

Fonte: Adaptado de Cauchick Miguel (2012), Marconi e Lakatos (2010).

Cauchick Miguel e Sousa (2012) esclarecem que, dentre outras razões, o estudo de caso também pode ser empregado quando se pretende testar teorias, o que é um dos objetivos desta tese, já que se buscará verificar a adequação do modelo para medição do grau de prontidão aqui proposto a situações do mundo real.

Ainda para corroborar esses pontos, segundo Yin (2009) pode-se aplicar o estudo de caso como uma pesquisa empírica, quando esta investiga, dentro de um contexto do mundo real, um fenômeno contemporâneo, caso não haja fronteiras claras e evidentes entre o fenômeno e o contexto, e na qual onde são usadas múltiplas fontes de evidências. Para Collins e Hussey (2005), com relação a um fenômeno que se investigue em áreas nas quais tem-se conjunto deficiente de conhecimentos, ou ainda haja poucas teorias disponíveis, o estudo de caso é um exame consistente.

Pelas razões mencionadas, pode-se estabelecer que o estudo de caso é o método de pesquisa mais adequado ao estudo empírico que esta tese propõe desenvolver.

Com relação à técnica de coleta de dados, deve-se considerar que os estudos de casos que se propõe analisar irão verificar como se encontra o grau de prontidão com relação à I 4.0, de determinada empresa investigada.

A análise da estrutura do instrumento de verificação do grau de prontidão proposto por este trabalho, representado pelo conjunto das tecnologias habilitadoras selecionadas e seus respectivos pré-requisitos, poderia sugerir o questionário auto preenchido como forma mais adequada para obtenção dos dados necessários. No entanto, essa alternativa não se mostra adequada, como se poderia supor em uma análise superficial, pois ela apresenta algumas limitações. De fato, Marconi e Lakatos (2010) destacam algumas desvantagens apresentadas pelo questionário auto preenchido: (1) não é possível garantir que seu preenchimento será efetivamente realizado, (2) a possibilidade dos informantes não terem a compreensão adequada das questões formuladas e por, conseguinte darem respostas inadequadas, (3) não é possível se conhecer as circunstâncias em que foram preenchidos os questionários, o que torna difícil o controle e a verificação e (4) não há como se garantir que o escolhido para a pesquisa foi quem a respondeu, o que pode levar a um falso resultado obtido.

Por outro lado, do ponto de vista prático, o grau de prontidão como proposto pelo modelo aqui desenvolvido, além de abordar um tema ainda não muito claro, envolve detalhes operacionais e técnicos, que abrangem diversas áreas funcionais da empresa, tais como RH, Produção, Logística, TI, Marketing, etc. Portanto é muito difícil que uma única pessoa na empresa pesquisada possa ter conhecimentos suficientes para responder com clareza todos os requisitos abordados no modelo. Assim fica difícil identificar as pessoas para as quais seriam enviados os questionários para preenchimento. Além disso, pelo já exposto, não seria possível controlar a circulação do questionário na empresa pesquisada, sendo mais um fator que prejudicaria o seu preenchimento adequado, implicando em uma má qualidade do levantamento feito.

Há, ainda, a questão da interpretação do conteúdo das afirmações existentes na norma. Para responder, por exemplo, se a empresa tem “*streaming* de eventos *on-the-fly*”, um informante, que não é da área de TI poderá ter dúvidas sobre do que se trata, uma vez que não existe uma tradução adequada para esses termos. Nesse caso, o respondente invariavelmente optará pela resposta que melhor posicionaria a sua

empresa na pesquisa, o que não traduziria a sua real forma de atuação, levando, possivelmente, a investigação feita a um resultado falso.

Finalmente, resta um ponto bastante relevante: o instrumento de avaliação aqui proposto deverá idealmente basear-se, para quantificar o grau de prontidão, em evidências que comprovem as afirmações feitas. Um questionário auto preenchido não permitiria ao pesquisador assegurar-se de que as evidências que sustentam determinada afirmação realmente existem na empresa pesquisada.

Pelas limitações apontadas, na pesquisa de campo que se pretende desenvolver, propõe-se utilizar como técnica de coleta de dados a entrevista semiestruturada que permite contornar adequadamente todas as limitações acima referidas. Segundo Cauchick Miguel e Sousa (2012) na entrevista semiestruturada o pesquisador elabora um roteiro contendo as questões que pretende abordar durante a entrevista. No entanto, esse roteiro é apenas um guia para o pesquisador não deixar de abordar aspectos relevantes de sua pesquisa, uma vez que ele tem a liberdade de desenvolver o tema com o entrevistado na direção que achar mais conveniente. Trata-se quase de uma conversa informal entre entrevistado e entrevistador na qual as questões relevantes para a pesquisa vão sendo desenvolvidas na medida em que a entrevista flui naturalmente.

Bryman (1995), confirma essas considerações destacando que é importante o pesquisador produzir um *aide-mémoire*, um tipo de anotações para orientar o pesquisador, para garantir que não sejam esquecidas nenhuma das questões importantes, mesmo que a entrevista semiestruturada, não exija a elaboração prévia de um questionário. Para tanto utilizar-se-á o texto proposto para o instrumento de avaliação para medir o grau de prontidão, desenvolvido nesta tese, como o guia para direcionar as entrevistas não estruturadas, que serão realizadas com os diversos contatos nas empresas pesquisadas.

Ainda, Bryman (1995) atesta que a utilização da entrevista semiestruturada é um método de coleta de dados preferido para as pesquisas do tipo qualitativo. Segundo o autor, o seu propósito é deixar a entrevista transcorrer de modo mais natural, permitindo ao entrevistado abordar as questões em discussão, com mais tranquilidade, minimizando as restrições às suas considerações. Já Patton (1990) complementa dizendo que a entrevista semiestruturada é, principalmente, indicada,

para se obter informações em qualquer direção, de acordo com o andamento da entrevista, devido ela permitir máxima flexibilização no decorrer da entrevista.

Marconi e Lakatos (2010) ainda reconhecem como sendo vantagens da utilização da entrevista semiestruturada o fato de que o pesquisador: (1) pode repetir questões em qualquer momento da entrevista, sempre que tiver dúvida sobre alguma informação, (2) pode abordar o entrevistado com perguntas sobre um mesmo assunto, de maneiras distintas, garantindo assim uma melhor compreensão de algum ponto que tenha ficado obscuro (3) o pesquisador pode formular perguntas adicionais, fora do *aide-mémoire*, citado por Bryman (1995), se considerar necessário aprofundar uma questão ou esclarecer pontos importantes para o assunto investigado.

É importante que o pesquisador, durante as entrevistas, não se limite a ler as alternativas propostas em cada componente do instrumento de avaliação mostrado no apêndice desta tese, para que o entrevistado simplesmente escolha uma que vier a se adequar à situação particular de sua empresa. Isso seria equivalente a fornecer a ele um questionário para autopreenchimento, o que não é o caso por todos os motivos já expostos. Dessa forma, o pesquisador deverá utilizar o texto do instrumento de avaliação, como um protocolo de pesquisa que servirá apenas como um *aide-mémoire* para orientar o contato pessoal nas entrevistas e permitir identificar evidências que permitam estabelecer, de maneira inequívoca, o nível de atuação da empresa pesquisada em todos os pré-requisitos que serão investigados.

4.4.2 A seleção das empresas para o estudo de caso

A questão inicial que sempre se coloca quando se pretende realizar uma pesquisa utilizando como método o estudo de caso, é a determinação de quantos casos necessitam ser considerados.

Segundo Yin (2009), a replicação lógica que é aplicada nos estudos de casos não deve ser igual da lógica amostral de levantamentos do tipo *survey* e, portanto, qualquer que seja, a utilização da lógica amostral para estudos de casos deve ser evitada. Portanto, a lógica da escolha deve ser a replicação, pois o estudo de caso não deve ser usado somente para avaliar a incidência do fenômeno, mas, também, para avaliar tanto o fenômeno quanto o seu contexto.

Yin (2009) apresenta duas estratégias, para a escolha dos casos a serem considerados em um estudo: (1) quando os resultados assumidos são similares para os diversos casos estudados, a estratégia deveria ser a “replicação literal”. Nessa condição, seria suficiente realizar o estudo com dois ou três casos; e (2) quando os resultados assumidos são contrários para os diversos casos estudados, mesmo antes da realização do estudo, a estratégia deveria ser a “replicação teórica”. Nessas situações, mais de quatro casos deverão ser considerados.

O estudo empírico que se desenvolveu neste trabalho, investigou o grau de prontidão de empresas industriais para a implantação da I 4.0. Espera-se que os resultados obtidos sejam similares, entre os níveis dos pré-requisitos identificados nas diferentes empresas a serem pesquisadas, mesmo que representem diferentes graus de prontidão para cada uma, isto chega a caracterizar o que Yin (2009), chama de replicação literal.

Ainda, a avaliação da adequação do modelo aqui proposto se fará comparando o grau de prontidão determinado pelo modelo com o grau de prontidão real observada pelo comportamento das empresas no mercado, comparações essas que se espera possam contribuir de maneira similar para validar e extrair conhecimentos que venham a aperfeiçoar o modelo aqui proposto. Por essa razão, a pesquisa que esse estudo se propõe desenvolver, irá utilizar a estratégia de “replicação literal”, conforme proposta por Yin (2009). Consequentemente seguindo essa estratégia, serão selecionadas quatro empresas industriais, para serem avaliadas segundo seu grau de prontidão para implantação da I 4.0.

De acordo Patton (1990), a recomendação para a escolha dessas empresas, é que se utilizem casos que sejam o que ele chama de “*purposeful sampling*”, ou seja, “amostras com conteúdo”, que representam casos dos quais o pesquisador possa retirar uma quantidade de informações relevantes sobre os problemas centrais para a pesquisa que se desenvolve. Dentre as diversas estratégias que o autor sugere para selecionar casos com conteúdo, a pesquisa aqui proposta irá considerar a amostragem de casos típicos. Nessa amostragem, as empresas a serem selecionadas para os estudos de casos deverão destacar situações bem tipificadas. Sob essa ótica serão consideradas quatro empresas com graus de prontidão bastante distintos e assim plenamente identificadas pelo pesquisador e pelo mercado.

Algo que é ressaltado por Bryman (1995), e que resulta em um dos problemas mais críticos enfrentados pelos pesquisadores, ao desenvolver pesquisas de campo, é a dificuldade de acesso às organizações, nas quais as informações a serem pesquisadas podem ser obtidas. Pois mesmo vencida essa barreira inicial e o acesso conseguido, há que se considerar os bloqueios normais das pessoas em contribuir de maneira voluntária com o pesquisador. Por essa razão, a acessibilidade às informações, é um sério obstáculo à obtenção das informações, portanto, será também um critério fundamental a ser adotado na identificação das quatro empresas a serem selecionadas para os estudos dos casos que serão desenvolvidos como parte da pesquisa que esta tese analisa.

Dentre todas as empresas industriais possíveis de serem consideradas, esta tese selecionou quatro empresas pertencentes ao setor automotivo brasileiro, em razão desse segmento industrial, a par de ser um setor bastante relevante na indústria brasileira (LUCATO *et al.* 2012), ter também como característica estar na vanguarda da adoção das novas tecnologias, (VANALLE; SALLES, 2011), dentre as quais a I 4.0 (PACCHINI, LUCATO, VANALLE, 2017), conforme justificado na introdução desta tese.

Assim, como critérios básicos de seleção para a realização dos estudos de caso foram estabelecidos: a) a escolha de quatro empresas que fizessem parte da cadeia automotiva na primeira ou no máximo na segunda camada desta cadeia; b) serem conhecidas no segmento automotivo brasileiro com relação à implantação ou não da I 4.0.

Nessas condições, deveriam ser selecionadas quatro empresas em situações bastante distintas em relação à implantação da I 4.0: uma empresa industrial bastante adiantada na utilização da I 4.0, outra na qual a adoção das tecnologias habilitadoras é praticamente inexistente e a terceira e a quarta situadas entre as duas primeiras.

Para essa seleção foram contatados inicialmente os sindicatos do setor automotivo, nos quais, não foi possível obter nenhuma indicação formal sobre qual a situação atualizada das empresas, com relação à implantação da I 4.0, no Brasil. Em uma segunda etapa, buscou-se nas publicações de jornais, revistas especializadas, e contatos nos seminários específicos do tema Indústria 4.0, informações sobre empresas que estivessem prontas ou não para a I 4.0. Nesta segunda etapa da

pesquisa, obteve-se algumas informações e indicações valiosas, que possibilitaram a escolha das empresas para a pesquisa de campo.

Uma das empresas selecionada, para se efetuar a entrevista, que será chamada de “Empresa A”, foi considerada, segundo o jornal o Estado de São Paulo uma das empresas, do setor automotivo brasileiro, com avanços significativos na implementação da I 4.0. Trata-se de uma companhia localizada, no município de São Bernardo do Campo, na grande São Paulo, tradicional fabricante de caminhões e ônibus. Com a inauguração da nova linha de montagem final de caminhões, a planta entrou na era da I 4.0 e, se torna uma das mais modernas unidades de produção de veículos comerciais do grupo.

A Empresa A, na linha 4.0, de São Bernardo, monta todos os caminhões sobre carrinhos autônomos (AGVs), que se movem sozinhos, seguindo uma faixa magnetizada no piso. Eles são dotados de AI e programados para partir, conhecendo todos os componentes e processos que serão necessários para a montagem de cada modelo, que carregarão por todo o trajeto da linha (KUTNEY, 2018). Neste ano de 2019, dá mais um passo na I 4.0, com a nova fábrica de cabines, planejada com os avanços dos processos produtivos. A inédita fábrica de cabines nasceu, dentro do conceito da I 4.0, conectada e incorporada com tecnologia de última geração, tais como, realidade virtual, internet das coisas, armazenamento de dados na nuvem, inteligência artificial e *Big Data*. Para tornar realidade a nova fábrica de cabines, a empresa investiu R\$ 100 milhões, parte do ciclo de investimentos da companhia para o país de R\$ 2,4 bilhões programados de 2018 a 2022. (COSTA, 2019).

Outra empresa selecionada para a pesquisa de campo, chamada de Empresa B, Pacchini, Lucato e Vanalle (2017, p. 35) informam que em visita feita na empresa fornecedora de primeira camada, da cadeia automotiva e importante fabricante de motores diesel para caminhões, pôde-se constatar, de acordo com o seu Gerente de Processos, que ela estava com uma boa parte da sua manufatura automatizada. Porém, não utilizava ainda no seu parque industrial todas as tecnologias habilitadoras da I 4.0, mas que este seria o futuro da empresa, segundo o entrevistado: *“Algumas exigências das montadoras nos obrigam a ter bastante tecnologia embarcada a caminho da Indústria 4.0, porém longe ainda de sua plena realização”*. Corroborando essas informações no próprio site da empresa, acessado em 22 de março de 2019 www.mwm.com.br/site.aspx/detalhe-releases/mwm-motores-parceria-staufen-taktica,

A empresa firmou parceria com uma consultoria internacional para a realização de eventos conjuntos, relacionados à Indústria 4.0.

Na prática, a parceria consiste na utilização de um espaço dentro da empresa pela consultoria, demonstrando conteúdo da Indústria 4.0 e com a possibilidade de apresentação de cases reais já implementados, para que a empresa tenha acesso a materiais exclusivos sobre o que há de mais inovador em relação à Indústria 4.0. A Empresa B será uma das empresas intermediárias desta pesquisa de campo

A terceira empresa selecionada, chamada de Empresa C, é um dos maiores fabricantes de juntas de vedação, fornecedor de primeira camada da cadeia automotiva, que segundo, Reis (2017), vem desde 2016 renovando a sua linha de produção, no interior de São Paulo, buscando a automação e com um elevado grau de conectividade, seguindo a tendência do Indústria 4.0 ou Manufatura 4.0. Incluindo processamento de dados em tempo real e interação máquina-máquina.

Por fim, por conveniência do pesquisador e com base nas informações obtidas em entrevista com o Diretor Industrial da empresa considerada, escolheu-se como Empresa D um fornecedor do setor automotivo de segunda camada do tecido automotivo brasileiro, sediada na Grande São Paulo, que tem pouco conhecimento das tecnologias habilitadoras necessárias para a I 4.0.

Por todas as razões expostas e para possibilitar a obtenção dos objetivos já mencionados, esta tese, tem definida, para a pesquisa de campo as seguintes empresas, colocadas em ordem decrescente quanto à dimensão do grau de prontidão, cujos perfis gerais são:

- ✓ **Empresa A** – Empresa situada, no município de São Bernardo do Campo, na grande São Paulo. Ela é uma das grandes indústrias na fabricação de ônibus e caminhões, dos leves aos extrapesados, disponibilizando para o mercado a mais completa linha de veículos comerciais. Iniciou sua produção no Brasil em 1956, na fábrica em São Bernardo, com o seu primeiro caminhão o L-312, apelidado de torpedo devido à forma característica do cofre do motor. No mesmo ano começou encaroçar, os primeiros ônibus nacionais, sobre chassis L-312. Em 1958 iniciou, pioneiramente, a produção de ônibus no país, lançando o O-321, que, por sua estrutura construtiva - monobloco -, revolucionou o transporte coletivo no Brasil. Suas versões urbanas e rodoviárias, cada vez

mais aperfeiçoadas, tornaram-se padrão de qualidade. Atualmente tem em torno de 10.000 colaboradores na sua planta de São Bernardo do Campo.

- ✓ **Empresa B** – Empresa afiliada a um grupo industrial norte-americano fabricante de motores a diesel para caminhões e aplicações correlatas com mais de 60 anos de história. Tem uma planta na cidade São Paulo para atender o Mercosul e conta hoje com aproximadamente 1.200 funcionários. Possui a maior e mais completa estrutura de engenharia, entre todos os fabricantes de motores a diesel do Brasil e, a partir daqui, atua em diversos mercados internacionais. Seus produtos atendem a vários segmentos, em especial o automotivo, sendo um fornecedor de primeira camada desta cadeia. Essa empresa iniciou o novo século com investimentos em tecnologia de ponta, dentro do princípio que não adianta ficar fechado às novas tendências, sob o risco de perder competitividade. A empresa caminha rumo a Indústria 4.0, mas não pode ainda ser considerada uma empresa pronta para a sua plena implantação.
- ✓ **Empresa C** – Empresa sediada no interior do Estado de São Paulo, com aproximadamente 1000 funcionários e um faturamento anual em torno dos R\$ 450 milhões. Trata-se de tradicional fornecedor de primeira camada na cadeia automotiva que é um dos líderes mundiais no desenvolvimento de soluções em vedação. É uma empresa brasileira espalhada estrategicamente junto aos principais centros de desenvolvimento de tecnologia e considerada um dos maiores fornecedores de vedação no setor automotivo global. Por meio do crescimento sustentado por uma estratégia de longo prazo, tem investido não só no desenvolvimento dos colaboradores como em novas tecnologias, promovendo a inovação constante, sendo a I 4.0 uma de suas mais recentes iniciativas nessa direção. A empresa vem desde 2016 investindo nos seus processos e renovou uma parte da linha de produção no interior de São Paulo.
- ✓ **Empresa D** – A quarta empresa escolhida é uma fundição e usinagem de peças não metálicas para os mais diversos setores, com forte penetração no setor automobilístico, com quase 60 anos de existência. Conta com aproximadamente 500 funcionários. Está instalada na Grande São Paulo em um complexo industrial de 45.000 m², com mais de 16.000 m² de área construída. É um fornecedor de segunda camada na cadeia automotiva e que,

de acordo com o seu Diretor Industrial, ainda está embrionária no desenvolvido para a Indústria 4.0. É uma empresa ágil com sólido crescimento que se solidificou no mercado nacional e internacional. Conta com um moderno parque fabril, com recursos avançados e que tem respondido com eficácia às necessidades de mercado, porém sem intenção imediata de caminhar ao encontro da I 4.0.

Note-se que a escolha dos casos procurou envolver empresas com características e atuações diferentes, porém bem conhecidas. Tal fato é proposital e tem como objetivo possibilitar a verificação da adequação do modelo proposto por esta tese a diferentes situações do mundo real.

Como procedimento de pesquisa, foram realizadas entrevistas semiestruturadas, com executivos das quatro empresas, nas quais foram recolhidas informações que permitiram completar plenamente os quesitos definidos no instrumento de avaliação desenvolvido por esta tese para medir o grau de prontidão para a implantação da I 4.0. Em função das observações feitas no campo, determinou-se o grau de adoção para cada uma das tecnologias do instrumento de avaliação e, por conseguinte, o grau de prontidão das empresas pesquisadas. Os resultados obtidos foram então comparados aos respectivos graus de prontidão como percebidos pelo mercado. Como se mostrará mais à frente, o alinhamento de resultados forneceu uma indicação da adequação do modelo para tratar situações do mundo real.

Além desse procedimento de validação, a aplicação do modelo também permitiu extrair conhecimentos das comparações feitas como forma de aperfeiçoar o modelo desenvolvido e elaborar recomendações de melhoria nos elementos que estão com um baixo grau de prontidão nas empresas pesquisadas.

Finalizando, é importante destacar que, por razões de confidencialidade das informações utilizadas na pesquisa, as identidades das empresas selecionadas serão mantidas em sigilo. No entanto, se necessário e para possibilitar a confirmação das pesquisas feitas, a identificação das empresas e dos respectivos entrevistados estão à disposição para fazer as verificações que forem necessárias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, vai-se mostrar a adequação do modelo conceitual, proposto para medir o grau de prontidão das empresas, por meio dos resultados obtidos na pesquisa de campo, apresentados no subcapítulo 5.1 e pela discussão desses resultados apresentada no subcapítulo 5.2.

5.1 RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo testou o modelo em um grupo de quatro empresas industriais do setor automotivo, apresentadas no capítulo quatro desta tese. Em cada empresa foi feita uma entrevista semiestruturada com os responsáveis diretos pela implantação da I 4.0, envolvendo diretores e gerentes industriais. O teor das entrevistas, bem como os resultados obtidos em cada empresa são mostrados a seguir.

- Empresa A

Foi feita uma entrevista semiestruturada, com o Diretor de TI da Empresa A e com o coordenador da equipe de inovação, de uma empresa de TI pertencente a um grupo alemão que fornece soluções completas de *Outsourcing* de Tecnologia da Informação e Comunicações. Esta empresa presta serviços para a Empresa A, com a alocação de 200 colaboradores na fábrica de São Bernardo do Campo. A entrevista foi realizada no dia 13 de março de 2019 e teve duração de aproximadamente duas horas. Ela iniciou-se às 10:20 horas e teve o seu término às 12:15 horas.

De acordo com os entrevistados, em 2008 já havia uma preocupação na empresa para encontrar uma solução que integrasse o nível operacional (*shop floor*) com o nível gerencial e de controle da empresa. Essa integração era importante, para que houvesse uma padronização, pois apesar das máquinas serem equipadas com os Controladores Lógicos Programáveis - PLC, elas trabalhavam isoladamente, entre os diversos setores, conforme mostra a Figura 36, elaborada pelo diretor de TI da

Empresa A. Nesta busca, em 2011, a empresa já pensava na digitização e, internamente, já se discutia o conceito de uma Fábrica Digital, mesmo sem ter conhecimento do que viria a ser conhecida como a I 4.0.

Figura 36: Esquema de comunicação da Empresa A



Fonte: Elaborado pelo diretor de TI da Empresa A

Na busca de um *software/hardware*, para padronizar os sistemas operacionais e integrá-los, com as informações do Sistema de Execução da Manufatura (*Manufacturing Execution Systems - MES*), a fim de que os tomadores de decisões no nível de controle e supervisão pudessem otimizar as condições de produção no nível operacional, encontrou-se um sistema na matriz chamado INTEGRA. Ele foi desenvolvido pela Siemens em parceria com a Empresa A e introduzido no Brasil em 2011, melhorando significativamente a produção.

Desde de então, a Empresa A, vem em uma digitização crescente e se estruturando nas chamadas tecnologias habilitadoras, ou pilares da I 4.0. Segundo o diretor da TI eles se basearam em nove tecnologias, seguindo a proposta de Gerbert *et al* (2015), que são, praticamente, as mesmas do modelo proposto neste estudo, acrescido do pilar dos colaboradores.

A tecnologia IoT é utilizada na Empresa A, desde 2011. É por onde trafegam os dados da inteligência artificial dos equipamentos, *mobiles*, realidade virtual, *andons boards*³, produtos, entre outros. Para suprir a deficiência da capacidade, de tráfego de dados, disponível na internet, os quais seriam necessários para que a IoT tivesse um desempenho esperado, eles optaram pela tecnologia LPWAN (*low power wide area network*) no padrão LoRa (*long range*). A rede IoT/LoRa já foi implantada nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Esta tecnologia, permite implantação de aplicações com custos muito baixos de conectividade e sensores com baixo consumo de energia, cuja bateria pode durar mais de cinco anos dependendo da intensidade do uso.

Com relação a tecnologia IoT a Empresa A atendeu todos os requisitos apresentados de forma satisfatória, portanto tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_1 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t1} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1 \text{ ou } 100\%$$

Com relação à tecnologia do *Big Data*, a Empresa A tem o envolvimento do nível estratégico em todas as decisões com relação à esta tecnologia. Ela tem todos os seus registros e dados digitalizados, e o seu pessoal está habilitado para coletar e analisar os dados, para utilizá-los da maneira correta e traçar estratégias sólidas a partir deles.

A Empresa A possuía um histórico de dados muito grande, que não eram utilizados para análises do dia a dia, e sim somente para estatísticas. Por exemplo, 98.000.000 de torques de parafusos armazenados durante 8 anos, o que tornava o carregamento de dados muito moroso, pois vinham em volumes que não eram necessários. Em

³ Ferramenta de gestão do *Lean Manufacturing*, que se utiliza de sinais luminosos e/ou sonoros para avisar que há algum defeito na cadeia de produção.

2016 a empresa adquiriu o *Azure Data Lake Analytics*, da Microsoft, o que permite trabalhar somente com os dados necessários para as tomadas de decisão *online*.

Para transformar os dados em informações a Empresa A utiliza o *software* HADOOP, uma plataforma de *software* em Java de computação distribuída voltada para clusters e processamento de grandes volumes de dados.

Com relação a tecnologia *Big Data* a Empresa A atendeu todos os requisitos apresentados de forma satisfatória, portanto tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_2 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t2} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1 \text{ ou } 100\%$$

Com relação a tecnologia da Computação em Nuvem, a Empresa A, atende os pré-requisitos do pessoal de TI capacitado, cuidados com a segurança cibernética, sistemas integrados e tem uma rede para tráfego de grandes quantidades de dados. Ela tem se utilizado mais comumente, dos serviços da Azure, da Microsoft, porém utiliza também a plataforma da nuvem da AWS da Amazon.

A Empresa A não tem todos os seus dados na nuvem. Quando o Diretor de TI foi questionado sobre o pré-requisito da cultura da empresa, com relação a externar seus dados, a resposta foi que a empresa não tem uma cultura para externar a privacidade dos seus dados. Isto vem ao encontro da pesquisa da PWC, que mostra que a única questão externa que leva preocupação às empresas brasileiras é a dos problemas não resolvidos de segurança e privacidade de dados, o Brasil ainda é um dos poucos países que enfrentam problemas com segurança de dados e, conseqüentemente, tem mais dificuldade para construir a confiança digital (GEISSBAUER; VEDSO; SCHRAUF, 2015).

Portanto, com relação a tecnologia da Computação em Nuvem, a Empresa A atendeu os pré-requisitos apresentados de forma satisfatória, deste modo tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_3 = [3,3,1,3,3,3]$$

$$d_{t3} = \frac{3 + 3 + 1 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{16}{18} = 0,8889 \text{ ou } 88,9\%$$

A Empresa A atende todos os pré-requisitos da tecnologia do CPS. A empresa possui uma Arquitetura Orientada para o Serviço (SOA), já faz simulações na linha de ônibus, e está terminando a digitalização do prédio da linha de caminhões.

O sistema operacional, utilizado pela Empresa A, o qual permite a conexão das máquinas e infraestruturas físicas ao mundo digital, é o MindSphere, da Siemens. Ele fornece poderosos aplicativos industriais e serviços digitais que podem garantir mais produtividade e eficiência em todo o processo, reduzindo o tempo de paradas, e aumentando a produção, propiciando o uso dos recursos de forma mais eficaz.

Portanto, com relação a tecnologia do CPS, a Empresa A atendeu todos os pré-requisitos apresentados de forma satisfatória, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_4 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t4} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1,000 \text{ ou } 100\%$$

A Empresa A, já utiliza dois robôs colaborativos no final da sua linha. Segundo o diretor de TI, a empresa deu treinamento intensivo aos seus funcionários, incluindo o trabalho psicológico, com aqueles que vão trabalhar junto com os robôs. Ela fez um minucioso estudo, para que as limitações dos robôs colaborativos, não impactasse no processo produtivo. A empresa segue as normas que regulamentam a utilização dos robôs.

Portanto, com relação a tecnologia dos Cobots, a Empresa A atendeu todos os pré-requisitos apresentados de forma satisfatória, deste modo tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_5 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t5} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1,000 \text{ ou } 100\%$$

Com relação a AM, a Empresa A possui duas impressoras de última geração, que inicialmente trabalhavam para a prototipagem e atualmente já fabricam peças, para a linha de montagem, pelo processo de adição de matéria prima.

As impressoras já estão com as suas programações completas até o final do ano. Existe todo um cuidado com a segurança cibernética, uma vez que todas as peças estão em arquivo digital, em 3D, aliás, a segurança cibernética é tratada a parte, permeando toda a digitização da empresa. Para a preservação dos dados no nível operacional, as redes são separadas e todos os controles, tais como, acesso, versionamento e processo, são controlados com segurança das senhas.

Portanto, com relação a tecnologia da AM, a Empresa A atendeu todos os pré-requisitos apresentados de forma satisfatória, deste modo tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_6 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t6} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1,000 \text{ ou } 100\%$$

A empresa também já utiliza a tecnologia da AR, eles já estão com a versão 2 do Hololens, da Microsoft. Com controle de acesso para proteção dos dados na rede. O

HoloLens 2, é mais confortável de usar, Figura 37, além de ser ainda mais poderoso em termos de processamento e AI, comentou o diretor de TI, da Empresa A.

O controle de segurança também é extremamente rígido com relação a esta tecnologia.

Figura 37: Realidade Aumentada



Fonte: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

Com relação a tecnologia da AR, a Empresa A atendeu todos os pré-requisitos apresentados de forma satisfatória, portanto tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_6 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t6} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1,000 \text{ ou } 100\%$$

Com relação a tecnologia AI, a Empresa A, atingiu todos os pré-requisitos necessários para este desenvolvimento. Segundo o seu diretor de TI, ela já vem aplicando a AI

nos equipamentos e em alguns processos da linha. São estudos recentes, porém já com grande repercussão na empresa.

Com relação a tecnologia da AI, a Empresa A atendeu todos os pré-requisitos apresentados de forma satisfatória, portanto tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_6 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t6} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1,000 \text{ ou } 100\%$$

Não foi possível visitar a fábrica, devido às fortes chuvas que atingiram a região naquela semana, e provocou a paralização da produção, porém ficou o convite para uma próxima oportunidade. A Tabela 4 resume o resultado dos pré-requisitos de cada tecnologia e o cálculo do grau de prontidão, de acordo com a fórmula desenvolvida no capítulo 3 deste estudo, cujo resultado calculado foi $D_r = 97,2\%$

Tabela 4: Resumo da avaliação da Empresa A

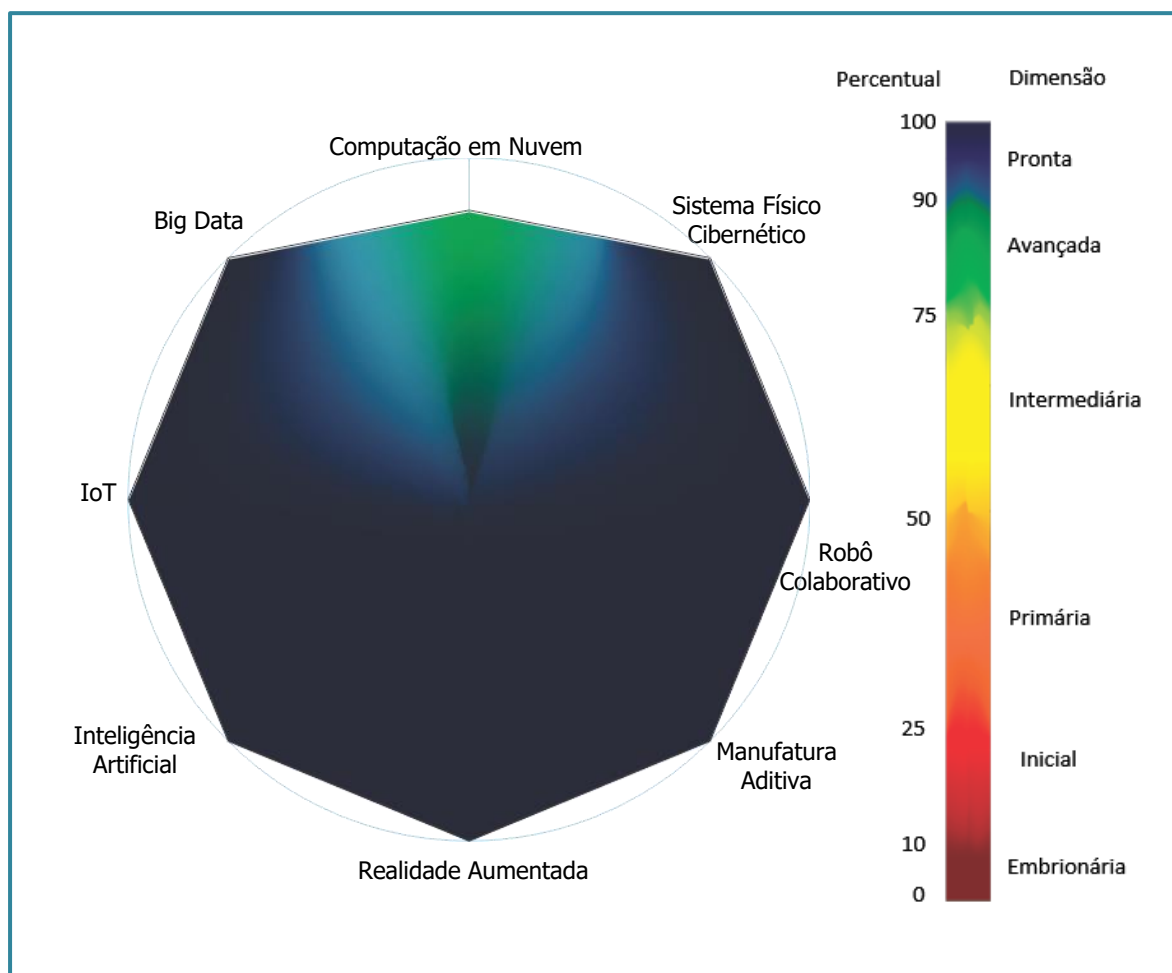
	Elementos / Tecnologias	Componentes / Pré-requisitos						Adoção
		1	2	3	4	5	6	
1	IoT	3	3	3	3	3	3	1,0000
2	Big Data	3	3	3	3	3	3	1,0000
3	Computação em Nuvem	3	3	1	3	3	3	0,8889
4	Sistema Físico Cibernético	3	3	3	3	3	3	1,0000
5	Robos Colaborativos	3	3	3	3	3	3	1,0000
6	Manufatura Aditiva	3	3	3	3	3	3	1,0000
7	Realidade Aumentada	3	3	3	3	3	3	1,0000
8	Inteligencia Artificial	3	3	3	3	3	3	1,0000
Grau de Prontidão (D_r)		Dr =		0,986		98,6%		

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nas dimensões do grau de prontidão definidas no modelo desta tese, a empresa está classificada na dimensão pronta para a I 4.0.

A Figura 38 mostra em um gráfico a área correspondente ao grau de prontidão da Empresa A. O modelo corroborou as informações obtidas em reportagens, sobre a I 4.0, mostrando que ela se encontra pronta para a I 4.0. O único pré-requisito não atendido, em 100%, foi a questão cultural da privacidade dos dados.

Figura 38: Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa A



Fonte: Elaborado pelo autor

- Empresa B

Foi feita uma entrevista semiestruturada, com o Gerente da Manufatura, Qualidade e *Lean* da Empresa B, que é responsável pela equipe de desenvolvimento e implementação da I 4.0. A empresa em questão fez parceria com uma empresa multinacional de consultoria, para trocas de tecnologia e informações. A entrevista foi realizada no dia 27 de março de 2019 e teve duração de aproximadamente uma hora e quarenta e cinco minutos, ela iniciou às 10: 00 horas e teve o seu término às 11: 45 horas. Além da entrevista foi possível visitar a área da fábrica, onde está sendo desenvolvida uma nova linha de fabricação voltada para a I 4.0. Participou da entrevista, para dar suporte um colega professor.

De acordo com o entrevistado, em junho de 2018, a empresa criou um grupo para iniciativa 4.0, fizeram um mapeamento para interligar os sistemas (qualidade, metrologia, manufatura) e unificaram os dados em um banco único. Baseando-se nas nove tecnologias e nos níveis de maturidade, do modelo Acatech elaboraram um roteiro para implementar a I 4.0.

O roteiro previa até 2022 a implementação das nove tecnologias, tão logo, os trabalhos começaram, esse roteiro foi reformulado, encurtando os prazos para 2020. Neste roteiro estão programadas 35 iniciativas associadas às nove tecnologias da I 4.0. As tecnologias são as adotadas no modelo desta tese, acrescida a segurança cibernética.

A IoT é uma tecnologia bem desenvolvida na empresa B. A conexão dos sensores é feita pela tecnologia Beacons, que utiliza o *bluetooth* para comunicação e possibilita a leitura por aplicativos nos celulares, o que não é possível pelo RFID. A empresa possui *streaming* de eventos estático e trabalha com rede sem fio de alta velocidade. Seu protocolo de comunicação é M2M. Ainda não tem o EPC para todas as suas peças.

Portanto, com relação a tecnologia da IoT, a Empresa B apresentou um equilíbrio entre o nível máximo e o nível 2 dos pré-requisitos, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_1 = [2,2,3,3,3,2]$$

$$d_{t1} = \frac{2 + 2 + 3 + 3 + 3 + 2}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{15}{18} = 0,8333 \text{ ou } 83,3\%$$

A empresa B, com relação a tecnologia do *Big Data* já tem uma boa parte dos seus dados organizados em sistemas digitais e considera as fontes confiáveis. A sua rede suporta os dados necessários para a sua realidade, mas anseia, como todos pela internet 5G. Ainda não tem pessoal capacitado para o *Big Data*, mas ele é tratado no nível estratégico da empresa, como todo o acompanhamento da implementação da I 4.0. A empresa tem muito claro o conceito do *Big Data* e os pontos a serem resolvidos com os dados obtidos. Ainda não optou pela aquisição de nenhum *software* relacionado ao *Big Data*. A segurança cibernética é uma grande preocupação, porém seu *firewall* é bem robusto com diversas camadas.

Portanto, com relação a tecnologia do *Big Data*, a Empresa C atendeu alguns dos pré-requisitos apresentados no nível máximo, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_2 = [2,3,3,0,2,3]$$

$$d_{t2} = \frac{2 + 3 + 3 + 0 + 2 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{13}{18} = 0,7222 \text{ ou } 72,2\%$$

A empresa B está com praticamente todos os pré-requisitos atendidos com relação à tecnologia de Computação em Nuvem. Existe a preocupação com os ataques cibernéticos, portanto ela tem uma forte segurança de informação, vem preparando os seus funcionários para esta tecnologia. Os seus sistemas estão integrados para a conectividade dos seus processos.

Com relação a tecnologia da Computação em Nuvem, a Empresa C atendeu a maioria dos pré-requisitos apresentados no nível máximo, sendo assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_3 = [3, 2, 2, 3, 3, 3]$$

$$d_{t3} = \frac{3 + 2 + 2 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{16}{18} = 0,8888 \text{ ou } 88,9\%$$

Na tecnologia do CPS a Empresa B tem a maioria dos seus pré-requisitos no nível 2, uma vez que ela vem caminhando para implantar as tecnologias digitais, tais como *Big Data* e Computação em Nuvem. A empresa possui sensores na maioria dos seus equipamentos, porém ainda existem alguns que ainda não estão conectados na rede. Seu pré-requisito com menor nível foi com relação a SOA.

Portanto, com relação a tecnologia do CPS, a Empresa B atendeu somente um dos pré-requisitos apresentados no nível máximo, ficando com o seguinte grau de adoção nesta tecnologia:

$$r_4 = [3, 2, 2, 2, 2, 1]$$

$$d_{t4} = \frac{3 + 2 + 2 + 2 + 2 + 1}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{12}{18} = 0,6666 \text{ ou } 66,7\%$$

Com base nos resultados da entrevista semiestruturada na empresa B, notou-se que a empresa ainda não evoluiu na tecnologia dos robôs colaborativos. A empresa possui alguns robôs na sua linha, porém não são colaborativos. Ela tem o conhecimento das limitações de velocidade e carga que existem nos robôs colaborativos, mas é uma tecnologia que está no roteiro da empresa.

Com relação a tecnologia do Cobots, a Empresa B ficou com o seguinte grau de adoção:

$$r_5 = [1, 3, 3, 1, 0, 0]$$

$$d_{t5} = \frac{1 + 3 + 3 + 1 + 0 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{8}{18} = 0,4444 \text{ ou } 44,4\%$$

A empresa B na tecnologia de AM, atingiu o nível máximo. Ela está utilizando esta tecnologia já há algum tempo. Tem mão de obra treinada e com relação ao produto tem todos os seus desenhos digitalizados e em 3D.

Portanto, com relação a tecnologia da AM, a Empresa B atendeu todos os pré-requisitos apresentados no nível máximo, ficando com o seguinte grau de adoção nesta tecnologia:

$$r_6 = [3,3,3,3,3,3]$$

$$d_{t6} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{18}{18} = 1,000 \text{ ou } 100\%$$

Outra tecnologia que a empresa B apresentou avanços foi na AR. Já está em estudos para aquisição de um *software* e fez progresso quanto a digitalização dos seus arquivos. Possui já uma boa parte dos seus processos mapeados e tem estudos ergonômicos sobre as funções dos operadores.

Com relação a tecnologia da AR, a Empresa B, obteve o seguinte grau de adoção:

$$r_7 = [3,2,2,3,1,3]$$

$$d_{t7} = \frac{3 + 2 + 2 + 3 + 1 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{14}{18} = 0,7777 \text{ ou } 77,8\%$$

Com relação a tecnologia da AI, a empresa B tem consciência da sua importância na I 4.0 e demonstrou um bom avanço neste campo. Apesar de ainda não ter definido quais serão as estratégias para a implantação da AI, ela vai avançando neste sentido.

Portanto, com relação a tecnologia da AI, a Empresa B teve um equilíbrio nos pré-requisitos apresentados, ficando com o seguinte grau de adoção nesta tecnologia:

$$r_8 = [3,1,2,2,2,3]$$

$$d_{t8} = \frac{3 + 1 + 2 + 2 + 2 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{13}{18} = 0,7222 \text{ ou } 72,2\%$$

A Tabela 5 resume o resultado dos pré-requisitos de cada tecnologia e o cálculo do grau de prontidão, de acordo com a fórmula desenvolvida no capítulo 3 deste estudo, cujo resultado calculado foi $D_r = 75,7\%$

Tabela 5: Resumo da avaliação da Empresa B

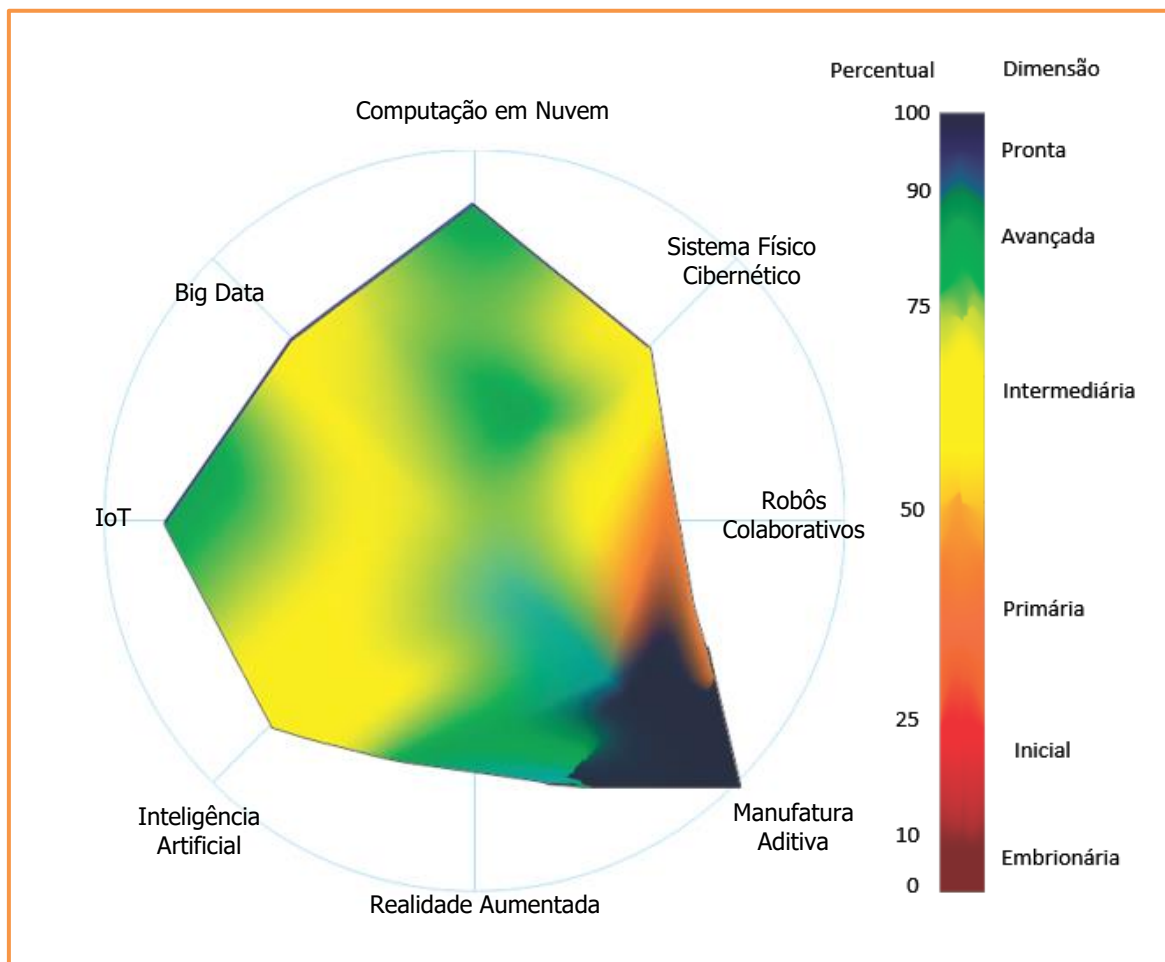
		Componentes / Pré-requisitos						Adoção	
		1	2	3	4	5	6		
1	Elementos / Tecnologias	IoT	2	2	3	3	3	2	0,83333
2	Big Data	1	3	3	0	3	3	0,72222	
3	Computação em Nuvem	3	2	2	3	3	3	0,88889	
4	Sistema Físico Cibernético	3	2	2	2	2	1	0,66667	
5	Robos Colaborativos	1	3	3	1	0	0	0,44444	
6	Manufatura Aditiva	3	3	3	3	3	3	1,00000	
7	Realidade Aumentada	3	2	2	3	1	3	0,77778	
8	Inteligencia Artificial	3	1	2	2	2	3	0,72222	
Grau de Prontidão (D_r)		$D_r =$	0,757				75,7%		

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nas dimensões do grau de prontidão definidas no modelo desta tese, a empresa está classificada na dimensão avançada, para a I 4.0.

A Figura 39 mostra em gráfico a área correspondente ao grau de prontidão da Empresa B. O modelo corroborou as informações obtidas no mercado, sobre a empresa, e, com a percepção do entrevistado, mostrando que ela já tem boa parte do caminho percorrida na jornada rumo a I 4.0.

Figura 39: Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa B



Fonte: Elaborado pelo autor

- Empresa C

Foi feita uma entrevista semiestruturada com o gerente de processos, projetos e serviços, que está gerindo, juntamente com o Diretor Industrial, o projeto da indústria 4.0. Também participou da reunião, quando foi abordado o tema manufatura aditiva, o engenheiro responsável por esse desenvolvimento. O Diretor Industrial não pode estar presente, porém participou brevemente por telefone, respondendo algumas

questões. A entrevista foi realizada no dia 15 de abril de 2019, na planta do interior de São Paulo, com duração de duas horas e meia, sendo uma parte deste tempo despendido na visita à fábrica, a entrevista foi iniciada as 15:00hs e terminou as 17:30 horas. Nesta visita pode-se observar todo o desenvolvimento da empresa desta jornada rumo a indústria 4.0 e como este desenvolvimento trouxe maior eficiência para a empresa. A empresa possui um laboratório de testes dos seus produtos que funciona 24 horas, sendo possível que os clientes tenham acesso, por meio de câmeras, das peças sendo testadas. Participou da entrevista um colega professor.

A Empresa C iniciou, o que ela chamou de projeto de melhoria, em 2013, basicamente esses projetos foram o desenvolvimento das técnicas do *lean manufacturing* e melhorias baseadas nas nove tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, apresentadas por Gerbert *et al.* (2015), com isso conseguiram nestes seis anos melhorar efetivamente a eficiência do processo, tendo atualmente um OEE - *Overall Equipment Effectiveness* (Eficiência geral de equipamento) de 85%, contra 65% em 2013 com uma diminuição significativa no quadro de funcionários por conta da automação implementada.

Com relação a tecnologia IoT a Empresa C, não tem ainda uma rede sem fio que seja suficiente para operar de maneira satisfatória, sua rede sem fio tem algumas limitações para grandes quantidades de dados. A empresa ainda não possui RFID, ou sensores similares, porém algumas máquinas conversam entre si e mandam informações para o MES, no entanto a interconectividade é limitada. Nem todos os seus produtos estão codificados com o EPC, no geral a Empresa C tem um sistema de segurança com várias camadas e *firewalls*. Os dados não são enviados por *streamings*, ou seja, as informações são por meio de operadores booleanos.

Portanto, a tecnologia da IoT, na Empresa C apresentou o nível máximo em apenas um pré-requisito, atingindo um nível de adoção médio, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_1 = [2,2,2,1,3,0]$$

$$d_{t1} = \frac{2 + 2 + 2 + 1 + 3 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{10}{18} = 0,5555 \text{ ou } 55,5\%$$

Na tecnologia *Big Data*, a Empresa C, tem coletado uma grande quantidade de dados e armazenando-os em servidores convencionais, está longe de ter um *Big Data*, porém está com alguns pré-requisitos já desenvolvidos e a alta administração está envolvida com os estudos necessários para a implantação desta tecnologia. A empresa ainda não possui um *software* de armazenamento de grande quantidade de dados, nem pessoal habilitado para trabalhar com os dados coletados. No planejamento da empresa o *Big Data* deve estar implantado até o início de 2020.

Com relação a tecnologia do *Big Data*, a Empresa C apresentou os níveis máximos em alguns pré-requisitos, porém foi insuficiente em outros, demonstrando que ainda tem um caminho a percorrer nesta tecnologia, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_2 = [3,2,0,3,2,3]$$

$$d_{t2} = \frac{3 + 2 + 0 + 3 + 2 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{13}{18} = 0,7222 \text{ ou } 72,2\%$$

A Empresa C, já tem alguns dos seus dados na nuvem, porém não é uma nuvem pública e sim interna. Devido a outras prioridades de investimento eles têm planos de ter todos os seus dados em nuvem para 2020, a empresa C tem um bom sistema para mitigar os ataques cibernéticos e uma boa parte do seu pessoal já está preparado para esta tecnologia. Para ter um bom aproveitamento dos dados em nuvem eles precisam melhorar a sua rede sem fio e trabalhar com a cultura da empresa, quanto à sua privacidade de dados. A Empresa C ainda não possui protocolo de comunicação M2M, porém como já implantou o MES ela já possui alguns equipamentos enviando sinais digitais para o sistema.

Com relação a tecnologia da Computação em Nuvem, a Empresa C apresentou os níveis máximos em dois pré-requisitos, com exceção de um pré-requisito, que é uma questão cultural, com relação à privacidade dos dados (L0), os outros três pré-requisitos estão no nível L2, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção:

$$r_3 = [3,2,0,2,2,3]$$

$$d_{t3} = \frac{3 + 2 + 0 + 2 + 2 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{12}{18} = 0,6666 \text{ ou } 66,7\%$$

Quanto à tecnologia do CPS a Empresa C não atingiu em nenhum dos pré-requisitos o nível máximo. Eles têm feito algumas simulações de produção, porém ainda muito restrito a uma linha e sem a utilização de softwares específicos para esse fim. A estrutura física de *hardware* precisa ser melhorada, bem como, a Empresa C precisa ter avanços no *Big Data* e na Computação em Nuvem, a empresa está em busca de uma evolução no que se refere a ter uma arquitetura voltada para serviços (SOA). O projeto de melhorias contempla instalar sensores em todas as linhas até o final de 2019.

Portanto com relação a tecnologia do CPS, a Empresa C não apresentou o nível L3 em nenhum dos pré-requisitos, obtendo nesta tecnologia um grau de adoção médio, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte resultado:

$$r_4 = [2,2,1,2,1,2]$$

$$d_{t4} = \frac{2 + 2 + 1 + 2 + 1 + 2}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{10}{18} = 0,5555 \text{ ou } 55,5\%$$

Quando se trata de Cobots a Empresa C está bem desenvolvida, pois já tem na sua linha alguns robôs colaborativos, executando funções juntamente com os humanos. As linhas, no entanto, são dedicadas e não conversam entre si, enviam sinais diretamente para o MES. Nesta tecnologia a Empresa C teve todos os seus pré-requisitos acima ou igual a dois, sendo que três deles atingiram o nível máximo. No seu *budget*, estão previstos investimentos em mais Cobots nos próximos anos, assim a empresa vem capacitando a sua mão de obra para trabalhar com as máquinas.

Na tecnologia dos Cobots, a Empresa C apresentou o nível máximo em três pré-requisitos, e nível L2 nos demais, demonstrando um bom desenvolvimento nesta tecnologia, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_5 = [2,3,2,3,2,3]$$

$$d_{t5} = \frac{2 + 3 + 2 + 3 + 2 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{15}{18} = 0,8333 \text{ ou } 83,3\%$$

Na tecnologia de AM foi onde a Empresa C apresentou a sua melhor performance, só não atingiu o nível máximo em dois pré-requisitos. Neste momento da entrevista foi chamado o engenheiro responsável pela manufatura aditiva, que mostrou várias peças elaboradas pela impressora 3D instalada na fábrica. A impressora é utilizada para prototipagem e segundo o engenheiro, muitos clientes foram conquistados, devido a apresentação de peças produzidas pela impressora 3D. A aquisição de uma segunda impressora em 3D já está autorizada pela diretoria da empresa.

Na tecnologia de Manufatura Aditiva, a Empresa C apresentou o nível máximo em quatro pré-requisitos, e nível L2 nos demais, demonstrando estar bem avançada nesta tecnologia, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_6 = [3,3,3,3,2,2]$$

$$d_{t6} = \frac{3 + 3 + 3 + 3 + 2 + 2}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{16}{18} = 0,8888 \text{ ou } 88,9\%$$

A tecnologia de AR está bem próxima de ter um grau de adoção pronta, já está no radar da Empresa C para este ano de 2019. A empresa já tem as peças digitalizadas e está bem avançada com relação aos estudos ergométricos e com o compartilhamento dos dados. A Empresa C não possui nem *software* nem *hardware* para a realidade aumentada o que fez com que o grau de adoção não tivesse o mesmo desempenho da tecnologia de manufatura aditiva.

Portanto na tecnologia de AR, a Empresa C apresentou nível de adoção dos pré-requisitos, próximos do máximo, com exceção de um pré-requisito que ficou no nível L0 , demonstrando estar bem avançada nesta tecnologia, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_7 = [3,3,2,2,0,2]$$

$$d_{t7} = \frac{3 + 3 + 2 + 2 + 0 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{12}{18} = 0,6666 \text{ ou } 66,7\%$$

Com relação a tecnologia de AI a Empresa C está um pouco acima da média, o grau de adoção desta tecnologia reflete o resultado das demais tecnologias digitais que estão diretamente relacionadas com a AI. A empresa ainda não criou estratégias claras e específicas para esta tecnologia e ainda não tem sensores em todos os equipamentos o que impede a comunicação M2M. Porém a empresa sabe da importância desta tecnologia e já tem alguns estudos a respeito.

Portanto na tecnologia de AI, a Empresa C apresentou nível médio de adoção dos pré-requisitos, com exceção de um pré-requisito que ficou no nível L1 , demonstrando estar bem evoluída nesta tecnologia, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_8 = [2,1,2,2,2,3]$$

$$d_{t8} = \frac{2 + 1 + 2 + 2 + 2 + 3}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{12}{18} = 0,6666 \text{ ou } 66,7\%$$

A Tabela 6 resume o resultado dos pré-requisitos de cada tecnologia e o cálculo do grau de prontidão, de acordo com a fórmula desenvolvida no capítulo 3 desta tese, cujo resultado calculado foi $D_r = 69,4\%$

Tabela 6: Resumo da avaliação da Empresa C

		Componentes / Pré-requisitos						
	Elementos / Tecnologias	1	2	3	4	5	6	Adoção
1	IoT	2	2	2	1	3	0	0,5556
2	Big Data	3	2	0	3	2	3	0,7222
3	Computação em Nuvem	3	2	0	2	2	3	0,6667
4	Sistema Físico Cibernético	2	2	1	2	1	2	0,5556
5	Robos Colaborativos	2	3	2	3	2	3	0,8333
6	Manufatura Aditiva	3	3	3	3	2	2	0,8889
7	Realidade Aumentada	3	3	2	2	0	2	0,6667
8	Inteligencia Artificial	2	1	2	2	2	3	0,6667

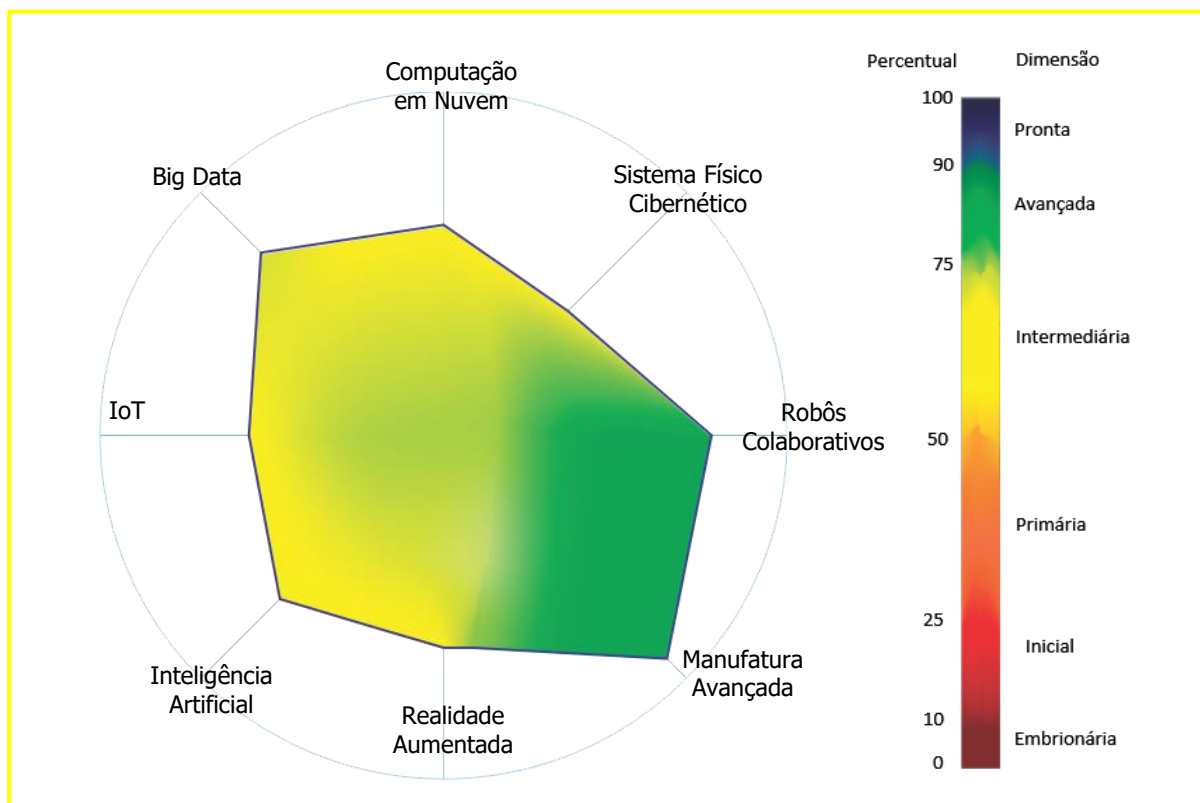
Grau de Prontidão (D_r)	$D_r =$	0,694	69,4%
-----------------------------	---------	-------	--------------

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nas dimensões do grau de prontidão definidas no modelo desta tese, a empresa está classificada na dimensão intermediária, para a I 4.0.

A Figura 40 mostra em gráfico a área correspondente ao grau de prontidão da Empresa C. O modelo corroborou com as informações sinalizadas pelo sindicato ao qual pertencem ambas as empresas, e pelas reportagens publicadas, mostrando, um equilíbrio entre os resultados obtidos com a Empresa B, e que ambas já têm boa parte do caminho percorrido na jornada rumo a I 4.0.

Figura 40: Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa C



Fonte: Elaborado pelo autor

- Empresa D

Foi feita uma entrevista semiestruturada, com o Diretor Industrial da Empresa D, que é responsável por toda a operação da empresa e novos projetos. Por falta de informações na literatura, tomou-se como referência a opinião do Diretor Industrial, quanto ao grau de prontidão da Empresa D, que segundo ele a empresa pouco havia desenvolvido qualquer tecnologia ligada a I 4.0. A entrevista foi realizada na fábrica localizada na Grande São Paulo no dia 03 de abril de 2019 e teve a duração de aproximadamente uma hora, ela iniciou às 10: 30 horas e teve o seu término às 11: 30 horas. Não foi possível visitar a área da fábrica, devido aos compromissos do Diretor Industrial.

A Empresa D tem rede sem fio, porém não tem objetos ligados à rede tampouco sensores nos equipamentos, não existe o MES para fazer a conectividade entre o chão de fábrica e o ERP. Por conta da pouca digitalização no processo os sistemas de segurança são os utilizados por *softwares* que não oferecem muita segurança.

Portanto na tecnologia de IoT, a Empresa D apresentou nível de adoção dos pré-requisitos, próximos ao mínimo, tendo a maioria dos seus pré-requisitos no nível L0, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_1 = [0,0,1,0,1,0]$$

$$d_{t1} = \frac{0 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{2}{18} = 0,11 \text{ ou } 11,1\%$$

Segundo o Diretor industrial a Empresa D tem uma boa parte dos seus dados digitalizados, mas não tem ainda estudos para implantar o *Big Data*, além de que sua rede sem fio não comporta grande quantidade de dados. Nenhum dos seus funcionários tem conhecimento relativo ao *Big Data*, também não tem por parte da alta administração incentivo para implantação desta tecnologia no momento. O sistema de segurança ainda não está em um nível para proteger grande quantidade de dados.

Portanto na tecnologia do *Big Data*, a Empresa D apresentou nível de adoção baixo, com a maioria dos seus pré-requisitos no nível L1, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_2 = [2,1,0,1,1,1]$$

$$d_{t2} = \frac{2 + 1 + 0 + 1 + 1 + 1}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{6}{18} = 0,3333 \text{ ou } 33,3\%$$

Com relação a Computação em Nuvem a Empresa D, a empresa utiliza redes internas com baixa quantidade de dados e sem que esses dados possam ser acessados com alta velocidade. Existem alguns limitadores para a utilização em nuvem, tais como: a velocidade da rede sem fio, os sistemas de segurança, a falta de sensores instaladas, além de outras prioridades nos investimentos.

Na tecnologia de Computação em Nuvem, a Empresa D apresentou todos os seus pré-requisitos com nível de adoção em L1, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_3 = [1,1,1,1,1,1]$$

$$d_{t3} = \frac{1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{6}{18} = 0,3333 \text{ ou } 33,3\%$$

O grau de adoção da tecnologia do CPS também é baixo pois a falta de alguns pré-requisitos básicos para esta tecnologia, bem como, não ter desenvolvidas as tecnologias de *Big Data*, IoT e Computação em Nuvem, impactam no seu resultado.

Na tecnologia CPS, a Empresa D apresentou quatro dos seus pré-requisitos com nível de adoção em L1, e os dois restantes no nível L0, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_4 = [1,0,1,1,1,0]$$

$$d_{t4} = \frac{1 + 0 + 1 + 1 + 1 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{4}{18} = 0,2222 \text{ ou } 22,2\%$$

Com relação aos robôs colaborativos a empresa D tem um baixo grau de adoção, pois segundo o Diretor Industrial, a empresa não desenvolveu nada neste sentido. A questão não é financeira, mas o fato de que, na avaliação da empresa, esta tecnologia

não traria nenhum impacto positivo na melhoria dos seus resultados. Portanto não existe nenhum estudo ou projeto para implantação dos Cobots no curto prazo.

Na tecnologia dos Cobots, a Empresa D apresentou praticamente todos os seus pré-requisitos com nível de adoção em L0, e um pré-requisito no nível L1, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_5 = [0,0,1,0,0,0]$$

$$d_{t5} = \frac{0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{1}{18} = 0,05555 \text{ ou } 5,56\%$$

Outra tecnologia que a Empresa D avaliou como não prioritária para melhorar seu desempenho foi a AM. A empresa ainda não tem suas peças digitalizadas em 3D e não fez até o momento nenhum estudo para a adoção desta tecnologia.

Portanto a tecnologia de AM na Empresa D apresentou quatro dos seus pré-requisitos com nível de adoção em L0, e os dois restantes no nível L1, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_6 = [0,0,0,1,1,0]$$

$$d_{t6} = \frac{0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{2}{18} = 0,1111 \text{ ou } 11,1\%$$

O mesmo ocorre com a tecnologia da AR, apesar da Empresa D tem uma boa parte dos seus processos mapeados, ela não tem previsão de utilizar a tecnologia de AR, seja na área de manutenção ou operacional. Alguns arquivos de processos de manutenção estão digitalizados.

Assim a tecnologia de AR na Empresa D apresentou três dos seus pré-requisitos com nível de adoção em L0, e os restantes no nível L1 e L2, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção.

$$r_7 = [0,1,2,1,0,0]$$

$$d_{t7} = \frac{0 + 1 + 2 + 1 + 0 + 0}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{4}{18} = 0,2222 \text{ ou } 22,2\%$$

Finalmente na tecnologia de AI, com exceção capacidade financeira e do sistema de firewall, os demais pré-requisitos com relação à adoção desta tecnologia apresentaram nível L0.

Portanto com relação à tecnologia de AI, a Empresa D apresentou quatro dos seus pré-requisitos com nível de adoção em L0, e os dois restantes no nível L1, assim tem-se com relação a essa tecnologia o seguinte grau de adoção

$$r_8 = [1,0,0,0,0,1]$$

$$d_{t8} = \frac{1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1}{3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{2}{18} = 0,11 \text{ ou } 11,1\%$$

A Tabela 7 resume o resultado dos pré-requisitos de cada tecnologia e o cálculo do grau de prontidão da Empresa D, de acordo com a fórmula desenvolvida no capítulo 3 desta tese, cujo resultado calculado foi $D_r = 18,8\%$

Com base nas dimensões do grau de prontidão definidas no modelo desta tese, a empresa está classificada na dimensão inicial, para a I 4.0.

A Figura 41 mostra em gráfico a área correspondente ao grau de prontidão da Empresa D. O modelo corroborou com a percepção do Diretor Industrial, com relação a adoção da I 4.0, ou seja, que empresa D ainda está na dimensão inicial quanto à sua jornada rumo a Indústria 4.0.

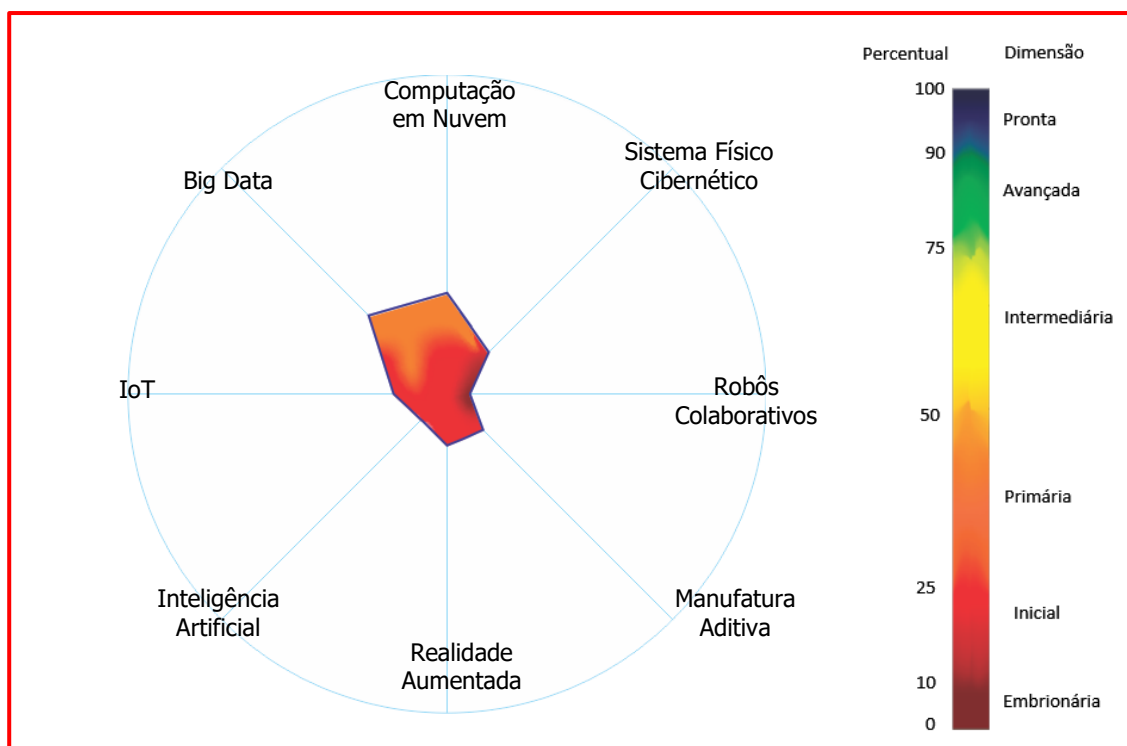
Tabela 7: Resumo da avaliação da Empresa D

	Elementos / Tecnologias	Componentes / Pré-requisitos						Adoção
		1	2	3	4	5	6	
1	IoT	0	0	1	0	1	0	0,1111
2	Big Data	2	1	0	1	1	1	0,3333
3	Computação em Nuvem	1	1	1	1	1	1	0,3333
4	Sistema Físico Cibernético	1	0	1	1	1	0	0,2222
5	Robos Colaborativos	0	0	1	0	0	0	0,0556
6	Manufatura Aditiva	0	0	0	1	1	0	0,1111
7	Realidade Aumentada	0	1	2	1	0	0	0,2222
8	Inteligencia Artificial	1	0	0	0	0	1	0,1111

Grau de Prontidão (D_r)	$D_r =$	0,188	18,8%
-----------------------------	---------	-------	--------------

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41: Gráfico da área do grau de prontidão da Empresa D



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO

O modelo proposto nesta tese, como instrumento de medição do grau de prontidão das empresas industriais no setor automotivo brasileiro foi testado em quatro empresas, cujos resultados demonstrados no subcapítulo 5.1 desta tese, estão sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados sintetizados do grau de prontidão

	Empresa A	Empresa B	Empresa C	Empresa D
Grau de Prontidão	98,60%	75,70%	69,40%	18,80%
Dimensão	PRONTA	AVANÇADA	INTERMEDIÁRIA	INICIAL

Fonte: Elaborado pelo autor

Foram selecionadas quatro empresas em situações bastante distintas em relação à implantação da I 4.0: uma empresa industrial bastante adiantada na utilização da I 4.0, outra na qual a adoção das tecnologias habilitadoras é praticamente inexistente e a terceira e a quarta situadas entre as duas primeiras.

As posições que as empresas escolhidas estão, em relação a implantação da Indústria 4.0, foram extraídas de publicações em jornais, outras mídias, em conversas com pessoas do setor automotivo e com informações obtidas em seminários ligados ao setor.

No caso da Empresa A as informações colhidas, nos meios de comunicação, indicam que ela já adotou a Indústria 4.0. O resultado obtido pela aplicação do modelo refletiu a sua situação no mundo real, mostrando que a empresa está pronta para a implantação da I 4.0.

Quanto as Empresas B e C, as informações obtidas demonstravam que elas estavam investindo em grande escala no desenvolvimento das tecnologias, principalmente nas novas linhas que vêm sendo instaladas. Nestes dois casos o modelo também mostrou

resultados compatíveis com as situações do mundo real, em ambas as empresas, bem como refletiu a percepção dos entrevistados. Os resultados mostram que elas estão bem próximas entre si, sendo que a Empresa B está no limite inferior da dimensão avançada e a Empresa C no limite superior da dimensão intermediária.

Tanto a Empresa A que já percorreu a jornada rumo ao grau de prontidão para a I 4.0, como as Empresas B e C que já têm uma boa parte desta jornada percorrida, fizeram seu planejamento rumo a I 4.0 baseados em nove tecnologias habilitadoras, praticamente as mesmas utilizadas pelo modelo proposto nesta tese (DAVIES, 2015; GEISSBAUER *et al.*, 2016; KHAN; TUROWSKI, 2016; BERGER, 2016).

Com relação a Empresa D a escolha foi feita por conveniência do pesquisador, pois deveria ser uma empresa pertencente a cadeia de suprimentos da indústria automotiva, porém com pouco conhecimento das tecnologias habilitadoras da I 4.0. A empresa escolhida foi uma fornecedora de peças fundidas, pertencente a segunda camada da cadeia de abastecimento da indústria automotiva.

Segundo o seu Diretor Industrial a empresa, no mundo real, tem pouco conhecimento das tecnologias habilitadoras da I 4.0. O resultado obtido com a aplicação do modelo demonstrou que ela realmente está no início da jornada rumo a prontidão da I 4.0, pois o grau de prontidão obtido foi 18,80%, classificando-a na dimensão inicial.

Todo o cuidado na construção do instrumento de pesquisa, e na forma de como foram conduzidas as entrevistas semiestruturadas, foi no intuito de minimizar o efeito “*halo*”. Conforme sugere Cooper (1981), este efeito pode produzir alguns tipos de erros tais como o “erro da generosidade”, onde o respondente superestima as qualidades desejadas do objeto que está sendo medido, e o “erro de contraste”, pois existe uma tendência dos respondentes em ver os outros como opostos.

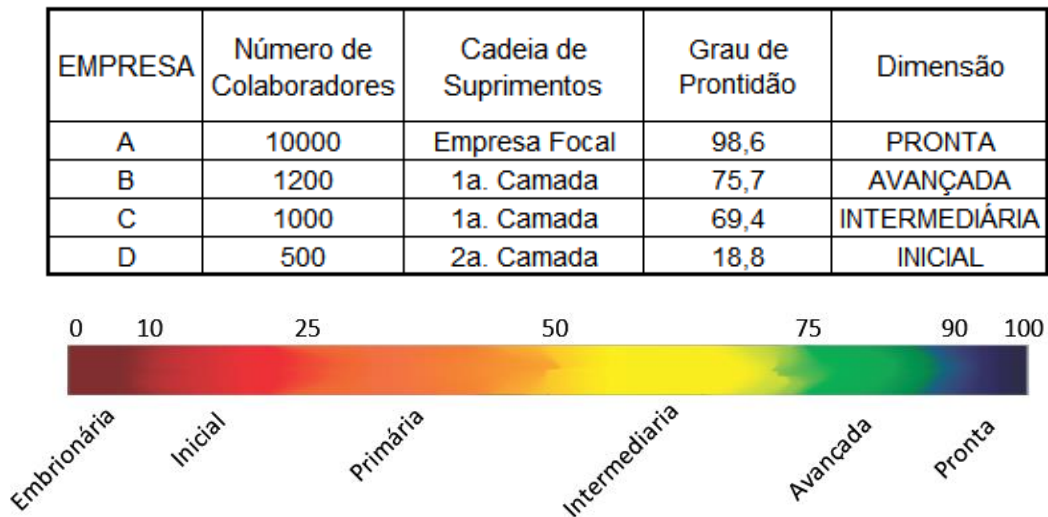
No entanto, os resultados obtidos na pesquisa de campo nas quatro empresas, quando comparados com as informações obtidas sobre as empresas no mundo real, mostraram-se compatíveis.

Estes resultados, apesar de não poderem ser generalizados, sugerem que o porte da empresa é diretamente proporcional ao grau de prontidão para implantação da Indústria 4.0 (SOMMER, 2015; MOEF *et al.*, 2017). Como também a posição da empresa nas camadas da cadeia de suprimentos impacta no grau de prontidão, quanto mais distante estiver a empresa analisada, com relação a empresa focal,

menor será o seu grau de prontidão (TJAHJONO *et al.*, 2017). Como pode ser observado na Tabela 9.

No entanto para generalizar esses resultados é necessária uma amostragem maior de empresas em uma determinada cadeia de suprimentos (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002; YIN, 2009). O que poderá ser uma futura pesquisa para aprimoramento do modelo aqui proposto.

Tabela 9: Comparativo do porte da empresa com o grau de prontidão



Elaborado pelo autor

Concluindo, analisando os resultados obtidos, o objetivo central desta tese, que foi desenvolver um modelo para diagnosticar o grau de prontidão das empresas industriais para implantação da Indústria 4.0, foi plenamente atingido, pois o modelo aqui proposto, denominado READYFOR4.0, cuja logomarca está mostrada na Figura 42, apresentou resultados na pesquisa de campo compatíveis com a realidade das empresas no mundo real. Ainda com base nos resultados, obtidos pela aplicação do modelo, pode-se auxiliar os gestores a definirem direcionadores de ações para elaboração de *roadmaps* (roteiros) para melhorar as tecnologias com baixo grau de adoção.

Por exemplo, na empresa C a tecnologia com menor grau de adoção é a IoT e CPS. Assim se essa empresa desejar aumentar o seu grau de prontidão, deverá atuar nestas tecnologias, que são as áreas de oportunidades mais relevantes esse fim. Com base nos pré-requisitos das tecnologias, os gestores poderão estabelecer áreas de atenção prioritárias, nas quais ações a serem oportunamente identificadas, poderão contribuir com o aumento do grau de adoção dessas tecnologias e, por consequência, o grau de prontidão da empresa como um todo.

Figura 42: Logomarca do modelo READYFOR4.0



Elaborado pelo autor

6. CONCLUSÕES

A presente tese buscou responder a uma lacuna identificada na literatura, segundo a qual não havia um modelo adequado para se avaliar o grau de prontidão das empresas para a implantação da I 4.0. Por meio do desenvolvimento aqui realizado foi possível estabelecer uma forma objetiva e simples de se medir quão preparada uma empresa industrial está com relação às tecnologias habilitadoras, para iniciar a jornada rumo ao desenvolvimento das práticas da I 4.0.

Além disso, a análise dos resultados obtidos com o teste do modelo poderá permitir aos gestores, das empresas analisadas, estabelecerem áreas de atenção prioritárias com a finalidade de melhorar o grau de prontidão.

Em contraste com outras abordagens, a principal contribuição desta pesquisa é a facilidade de manuseio do modelo para medir o grau de prontidão de uma empresa. Ressalte-se que vários autores propuseram medir o grau de maturidade na implementação daquele conjunto de tecnologias, mas, como já se discutiu anteriormente, tal conceito difere do que aqui se define como grau de prontidão, pois representa o desenvolvimento de um estágio posterior ao aqui proposto.

Esse trabalho trouxe, assim, contribuições tanto à Teoria como à Prática da Engenharia de Produção e da Gestão de Operações. Para a literatura que trata deste tema, esta tese traz uma contribuição inovadora ao propor uma abordagem conceitual que permite coletar dados sobre o estado de desenvolvimento das tecnologias habilitadoras nas empresas em diferente setores, e medir o grau de prontidão das empresas para a implantação da I 4.0, já que tal ferramenta não era, até o momento, disponível, além de criar uma métrica para classificar o grau de prontidão nas seis dimensões propostas.

Para a prática da Engenharia de Produção e da Gestão de Operações, o modelo aqui proposto contribui para a disseminação da I 4.0 e fornece às empresas uma compreensão e sugestões de implementações mais amplas para a I 4.0. Por outro lado, além do modelo ser descritivo, ele tem a finalidade de ser prescritivo, pois somente com uma boa compreensão das necessidades iniciais da I 4.0 (grau de prontidão), pode-se implantar melhorias substanciais nas tecnologias com baixo grau de adoção, da empresa em estudo.

Roteiros envolvendo a Tecnologia de Informações e a Tecnologia de Operações, para melhorar o desenvolvimento de itens específicos, com relação às tecnologias habilitadoras, baseados nos resultados obtidos pela aplicação do modelo, poderão permitir a determinação de programas estratégicos e projetos, para auxiliar as empresas nesta árdua jornada rumo a I 4.0.

Ainda, o modelo proposto, dada a sua flexibilidade com relação às tecnologias habilitadoras que o compõe, pode ser customizado para ser aplicado em empresas de qualquer porte e de diferentes segmentos da economia. O modelo foi desenvolvido de modo a ser transparente e de fácil entendimento, mesmo para aquelas empresas que ainda não têm nenhum conhecimento da I 4.0, como é a realidade da maioria das empresas brasileiras.

Como toda pesquisa, o trabalho aqui desenvolvido tem algumas limitações e deixa lacunas para serem exploradas em estudos futuros. Inicialmente, não foi levado em conta o grau de importância de cada tecnologia. Questionamento poderia ser feito em relação a se estabelecer um fator de ponderação para cada uma, pois elas, em princípio, poderiam ter pesos diferentes no cálculo do grau de prontidão, considerando-se a importância relativa de cada uma e a existência de precedência entre elas. Por isso, fica como sugestão de estudos futuros se realizar pesquisa para avaliar se há diferença na importância relativa entre as tecnologias, ou se há precedência entre elas, ou seja, para implementar uma tecnologia é necessário que outra esteja implantada, com o objetivo de se estabelecer uma ponderação que leve em conta tais diferenças.

Outro ponto refere-se ao fato de que a aplicação do modelo restringiu-se a estudo de casos em quatro empresas do setor automotivo. Também como sugestão de progressão nessa avaliação, sugere-se a aplicação em outros setores, considerando um número maior de empresas. Também se poderia, como sugestão, cruzar as informações entre setores para ter-se uma comparação do grau de prontidão entre eles. Nestes casos sugere-se delimitar a extensão de aplicação do modelo, para uma comparação equitativa, ou seja, as respostas devem referir-se a um mesmo escopo, seja um processo, um setor específico da empresa ou toda cadeia de valor.

Finalmente, outra sugestão seria comparar o grau de prontidão com os níveis de maturidade de modelos com o SINGAPORE, ACATECH ou IMPULS, para verificar

uma eventual relação, se é que existe, entre o grau de maturidade calculado pelos referidos modelos e o grau de prontidão aqui proposto.

A avaliação do grau de prontidão deve ser considerada apenas o primeiro passo de uma abordagem global. Os próximos passos serão o desenvolvimento de ações que as empresas deverão empreender, dentre as inúmeras oportunidades possibilitadas pela digitização, que trarão a melhoria e a eficiência dos processos ao longo da jornada rumo a I 4.0.

Em uma nota final, o modelo de prontidão não pretende ser uma ferramenta única para as empresas atingirem os seus objetivos com relação à I 4.0. Contudo, o modelo de prontidão pode ajudar com a difícil tarefa de percepção das capacidades atuais em relação à I 4.0 e a subsequente decisão sobre as respectivas estratégias e planos de ação para áreas de atenção prioritárias.

7. REFERÊNCIAS

ABELE, E.; CHRYSOLOURIS, G.; SIHN, W.; METTERNICH, J.; ELMARAGHY, H.; SELIGER, G.; SIVARD, G.; ELMARAGHY, W.; HUMMELG, V.; TISCH, M.; SEIFERMANN, S. Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, p. 803–826, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/IEC 15504-5:2004 - Part 5: An exemplar Process Assessment Model**, In: ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT catálogo. ISO/IEC 15404-5 – 4. Overview of the exemplar Process Assessment Model – Introduction, p. 2-3, 2004.

AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. **Indústria 4.0 no Brasil. Tecnologias Habilitadoras – Manufatura Aditiva** In: 2018, Seminário de Manufatura Automotiva, 2018. São Paulo: UNIP, 2018. Disponível em: <<https://www.industria40.ind.br/noticias/17166-aea-debate-manufatura-da-industria-automotiva-nacional>>. Acesso em: 02 mar 2019.

AHMEDA, E.; YAQOOBA, I.; HASHEMA, I. A. T.; KHANB, I.; AHMEDA, A. I. A.; IMRANC, M.; VASILAKOS, A. V. The role of big data analytics in Internet of Things. **Computer Networks**, v. 129, p. 459–471, 2017.

AHUETT-GARZA, H.; KURFESS, T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. **Manufacturing Letters**, in press, 2018. DOI: 10.1016/j.mfglet.2018.02.011.

ALHARTHI, A; KROTOV, V.; BOWMAN, M. Addressing barriers to big data. **Business Horizons**, v. 60, p. 285-292, 2017.

ALVARENGA, A. C.; NOVAES. A. G. N. **Logística aplicada: suprimento e distribuição**. São Paulo: Blucher, 2000.

ANTONELLI, D.; BRUNO, G. Human-Robot Collaboration Using Industrial Robots. In: 2nd EAME – International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering, 2017, Shanghai. **Annals...** Shanghai, China, 2017, p. 99-102

ARAI, T.; KATO, R.; FUJITA, M. Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, p. 5-8, 2010.

ASHTON, K. **That 'Internet of Things' thing**. Melville: RFID Journal, 2009. Disponível em <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Acesso em 16 abril 2018.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast-evolving paradigm. **Ad Hoc Networks**, v. 56, p. 122–140, 2017.

AVRAM, M. G. Advantages and challenges of adopting cloud computing from an enterprise perspective. **Procedia Technology**, v. 12, p. 529-534, 2014.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial**: transportes, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 1993.

BAUR, C.; WEE, D. **Manufacturing's next act**. Munich: Mckinsey, 2015. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>>. Acesso em 23 fev 2018.

BAUTERS, K.; COTTYN, J.; CLAEYS, D.; SLEMBROUCK, M.; VEELAERT, P.; LANDEGHEM, H. V. Automated work cycle classification and performance measurement for manual work stations. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 51, p. 139-157, 2018.

BERGER, R. **Indagine conoscitiva sul modello "Industry 4.0"**. Modena: EnergiaMedia, 2016.

_____. **Industry 4.0: The new industrial revolution—How Europe will succeed**, Roland Berger strategy consultants, 2014.

BERSSANETI, F. T.; CARVALHO, M. M. Identification of variables that impact project success in Brazilian companies. **International Journal of Project Management**, v. 33, p. 638–649, 2015.

BOENZI, F.; DIGIESI, S.; FACCHINI, F.; MUMMOLO, G. Ergonomic improvement through job rotations in repetitive manual tasks in case of limited specialization and differentiated ergonomic requirements. **IFAC- Papers Online**, v. 49, n.12, p.1667-1672, 2016.

BORTOLINI, M.; EMILIO FERRARI, E.; GAMBERI, M.; PILATI, F.; FACCIO, M. Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. **IFAC Papers Online**, v. 50, n. 1, p. 5700-5705, 2017.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an industry 4.0 perspective. **Engineering and Technology International Journal of Information and Communication Engineering**, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London, Routledge, 1995.

BUHR, D. **Industry 4.0 – New tasks for innovation policy**. Born: Friedrich-Ebert-Stiftung, 2015.

CARVALHO, J. M. C. DE. **Logística**. Lisboa: Edições Silabo, 2002.

CASTELO-BRANCO, I; CRUZ-JESUS, F.; OLIVEIRA, T. Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. **Computers in Industry**, v. 107, p. 22-32, 2019.

CAUCHICK MIGUEL, P.A. (Org.). **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CAUCHICK MIGUEL, P.A.; SOUSA, R. O método do estudo de caso na Engenharia de Produção. In: CAUCHICK MIGUEL, P.A. (Org.) **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CERUTI, A.; MARZOCCA, P.; LIVERANI, A.; BIL, C. Maintenance in Aeronautics in an Industry 4.0 Context: The Role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, in press, 2019.

CERVONE, H. F. Organizational considerations initiating a big data and analytics implementation, **Digital Library Perspectives**, v. 32, n. 3, p. 1-5, 2016

CIMINI, C.; PINTO, R.; CAVALIERI, S. The business transformation towards smart manufacturing: a literature overview about reference models and research agenda. **IFAC Papers Online**, v. 50, n. 1, p. 14952-14957, 2017.

CHHETRI, S. R.; RASHID, N.; FAEZI, S.; AL FARUQUE, M. A. Security Trends and Advances in Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0. **IEEE**, p. 1039-1045, 2017.

CHUKWUEKWE, D. O.; SCHJØLBERG, P.; RØDSETH, H.; STUBER, A. Reliable, Robust and Resilient Systems: Towards Development of a Predictive Maintenance Concept within the Industry 4.0 Environment. Atenas: **EFNMS Euro Maintenance Conference**, 2016.

CHUN, K. W.; KIM, H.; LEE, K. A Study on Research Trends of Technologies for Industry 4.0; 3D Printing, Artificial Intelligence, Big Data, Cloud Computing, and Internet of Things. **Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 518, p. 397- 403, 2019.

COELHO, P. M. N. **Rumo a Indústria 4.0**. 2016. 65 f. Tese (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

COOPER, W. H. Ubiquitous Halo. **Psychological Bulletin**, v. 90, n. 2, p. 218-244, 1981.

COSTA, D. **Mercedes-Benz dá mais um passo na Indústria 4.0**. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/mercedes-benz-da-mais-um-passo-na-industria-4-0/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. Gerência Executiva de Pesquisa e Competitividade – GPC. **Retratos da sociedade brasileira: a indústria brasileira na visão da população**. Brasília: CNI, 2014.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Sondagem Especial 66 - Indústria 4.0: novo desafio para a indústria brasileira**. Brasília: CNI, 2016.

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

COUTINHO, L. A. Terceira revolução industrial e tecnológica: as grandes tendências de mudança. **Economia e Sociedade**, v. 1, n. 1, p. 69-87, 1992.

DAVIES, R. **Industry 4.0: Digitalization for productivity and growth**. Brussels: European Parliamentary Research Service, p. 1 – 10, 2015.

DE CAROLIS, A.; MACCHI, M.; NEGRI, E.; TERZI, S. A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies. In: IFIP WG 5.7 International Conference, Part 1, APMS - Advances in Production Management Systems, 2017, **Annals...**, Hamburg, 2017, p.13-20.

DI DONATO, M.; FIORENTINO, M.; UVA, A. E.; GATTULLO, M.; MONNO, G. Text legibility for projected Augmented Reality on industrial workbenches. **Computers in Industry**, v. 70, p. 70–78, 2015.

DILBEROGLU, U. M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U.; DOLEN, M. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 545-554, 2017.

DOMBROWSKI, U.; RICHTER, T.; KRENKEL, P. Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems - a use cases analysis. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1061 – 1068, 2017

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or Hype? **IEEE Industrial Electronics Magazine**, June 2014, p. 56 – 58, 2014.

DUDA, T.; RAGAHVAN, L.V. 3D METAL PRINTING. **IFAC-Papers On-line**, v. 49, n. 29, p. 103-110, 2016.

DUTTON, W. H. Putting things to work social and policy challenges for the Internet of things. **Info**, v.16, n. 3, p.1-21, 2015.

EROL, S.; SCHUMACHER, A.; SIHN, W. Strategic guidance towards Industry 4.0 – a three stage process model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPETITIVE MANUFACTURING, COMA, 2016, Stellenbosch, South Africa. **Annals...** Stellenbosch: CIRP. 2016.

EVANS, P. C.; ANNUNZIATA, M. **Industrial internet: Pushing the boundaries of minds and machine**. Boston: General Electric Reports, 2012.

FABER, M; BÜTZLER, J.; M. SCHLICK, C. M. Human-robot cooperation in future production systems: Analysis of requirements for designing an ergonomic work system. **Procedia Manufacturing**, v. 3, p. 510 – 517, 2015.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário da língua portuguesa**. 5.ed. Curitiba: Positivo, 2014.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Indústria 4.0: Panorama da Inovação**. Rio de Janeiro: Firjam, 2016.

FMEAE - Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. **Platform Industrie 4.0**, 2018. Disponível em: <<http://www.plattform40.de/I40/Redaktion/EN/PressReleases/2016/2016-03-02-kooperation-iic.html;jsessionid=94B479DC52EF453C7CE614C7DF9DD785>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

GARETTI, M.; FUMAGALLI, L.; NEGRI E. Role of ontologies for CPS implementation in manufacturing. **Management and Production Engineering Review**, v. 6, n. 4, p. 26–32, 2015.

GEISSBAUER, R.; VEDSO, J.; SCHRAUF, S. **Industry 4.0: Building the digital enterprise**. Munich: PricewaterhouseCoopers, 2015

GEISSBAUER, R.; SCHRAUF, S.; BERTTRAM, P.; CHERAGHI, F. **Digital Factories 2020: Shaping the future of manufacturing**. Munich: PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (PwC), 2017.

GEORGAKOPOULOS, D.; JAYARAMAN, P.P.; FAZIA, M.; VILLARI, M.; RANJAN, R. Internet of Things and Edge Cloud Computing Roadmap for Manufacturing. **IEEE Cloud Computing**, v. 3, n. 4, p. 66-73, 2016.

GERBERT, P.; LORENZ, M.; RÜGMANN, M.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; HENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: the future of productivity growth in manufacturing industries**. Munich: The Boston Consulting Group, 2015.

GHEISARI, M.; IRIZARRY, J. Investigating human and technological requirements for successful implementation of a BIM-based mobile augmented reality environment in facility management practices. **Construction Innovation**, v. 14, n. 4, p. 453-476, 2014.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GRUNDSTEIN, S.; FREITAG, M.; SCHOLZ-REITER, B. A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 42, p. 11–28, 2017.

GÜNTHER, W. A.; MEHRIZI, M. H. R.; HUYSMAN, M.; FELDBERG, F. Debating big data: A literature review on realizing value from big data. **Journal of Strategic Information Systems**, v. 26, p. 191–209, 2017.

GUOPING, L.; YUN, H.; AIZHI, W. Fourth Industrial Revolution: Technological Drivers, Impacts and Coping Methods. **Chinese Geographic Science**, v. 27, n. 4, p. 626–637, 2017.

HANKEL, M. Digitizing Manufacturing 2016 RAMI 4.0 – Reference Architecture Model Industry 4.0, **Bosch Rexroth AG**, 2016

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49th, 2016, Hawaii. **Annals...Waikiki**, Hawaii: IEEE Computer Systems, 2016. p. 3928 – 3937.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23-34, 2017.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. 6th ed. **Applied multivariate statistical analysis**. Harlow, Essex, UK: Pearson Education, 2014.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. **VDI Nachrichten**, v. 13, n. 2, p. s/I, 2011.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**, Frankfurt: Industry-Science Research Alliance, 2013

KANG, H. S.; LEE, J. Y.; CHOI, S.; KIM, H.; PARK, J.H.; SON, J.Y.; KIM, B.H.; NOH, S.D. Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**. v. 3, n. 1, p. 111-128, 2016.

KESTER, R. **Demystifying the internet of things**: industry impact, standardization problems, and legal considerations. Elon, NC: Elon University, 2016. Disponível em: <www.elon.edu/e/CmsFile/GetFile?FileID=447>. Acesso em: 27 Abr 2018.

KIANG, L. K.; FEN, F. P.; TAH, A. C.; YINGHUI, X.; ONG, B.; FOO, C. **The Singapore Smart Industry Readiness Index: Catalysing the transformation of manufacturing**. Singapore: Singapore Economic Development Board, 2018.

KHAN, A.; TUROWSKI, K. A. Perspective on Industry 4.0: From Challenges to Opportunities in Production Systems. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNET OF THINGS AND BIG DATA - IoTBD 2016, Rome. **Annals...** Rome: IoTBD, 2016, p. 441-448, 2016.

KRUGER, J.; LIEN, T. K.; VERL, A. Cooperation of human and machines in assembly lines. **CIRP Annals**, v.58, n. 2, p. 628-646, 2009.

KUTNEY, P. **Mercedes-Benz entra na era da indústria 4.0 no Brasil**. Automotive Business, 2018. disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/notícia/27221/mercedes-benz-entra-na-era-da-industria-40-no-brasil>>. Acesso em: 13 mar 2019.

LANGMANN, R.; ROJAS-PEÑA, L. F. A PLC as an Industry 4.0 component. In 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, 2016, UNED Madrid. **Annals...** Madrid: IEEE, 2016, p. 10–15.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 4, p. 239-242, 2014.

LEE, J.; KAO, H-A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment, **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3 – 8, 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing system. **Society of Manufacturing Engineers (SME), Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18 – 23, 2015.

LEYH, C; SCHÄFFER, T; BLEY, K; SVEN FORSTENHÄUSLER, S. SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0. In: Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 11., 2016, Gdańsk, Poland. **Annals...** Gdańsk, Poland, 2016, v. 8, p. 1297-1302.

LI, B-H.; HOU, B-C.; YU, W-T.; LU, X-B.; YANG, C-W. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. **Frontiers of information technology & electronic engineering**, v. 18, n. 1, p. 86–96, 2017.

LICHTBLAU, K.; STICH, V.; BERTENRATH, R.; BLUM, M.; BLEIDER, M.; MILLACK, A.; SCHMITT, K.; SCHMITZ, E.; SCHRÖTER, M. “**IMPULS - Industrie 4.0-Readiness**,” Aachen-Köln: Impuls-Stiftung des VDMA, 2015.

LIU, Y.; XU, X. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 139, n. 3, p. 1-8, 2017

LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1–10, 2017.

LUCATO, W. C.; VIEIRA JÚNIOR, M.; VANALLE, R. M.; SALLES, J. A. A. Model to measure the degree of competitiveness for auto parts manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5508-5522, 2012.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARQUES, F. O Brasil da Internet das Coisas. **Pesquisa FAPESP**, v. 259, p. 19-27, 2017.

MARSTON, S.; LI, Z., BANDYOPADHYAY, S.; ZHANG, J.; GHALSASI, A. Cloud computing — The business perspective. **Decision Support Systems**, v.51, p. 176 - 189, 2011.

MASINGA, P.; CAMPBELL, H.; TRIMBLE, J. A. A Framework for Human Collaborative Robots, Operations in South African Automotive Industry. In: 2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, 2015, Singapore. **Annals ...** Singapore: IEEE, 2015. p. 1494-1497.

MAZZEI, M. J.; NOBLE, N. Big data dreams: A framework for corporate strategy. Kelley School of Business. **Business Horizons** v. 60, p. 405-414, 2017.

MEZIANE, R.; OTIS, M. J.-D.; EZZAIDI, H. Human-robot collaboration while sharing production activities in dynamic environment: SPADER system. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 48, p. 243–253, 2017.

MELLOR, S.; HAO, L.; ZAHNG, D. Additive manufacturing: a framework for implementation. **International Journal of Production Economics**, v. 149, p. 194-201, 2014.

- MIKOLOV, T.; JOULIN, A.; BARONI, M. A Roadmap Towards Machine Intelligence. In: CICALING - Computational Linguistics and Intelligent Text Processing, 17., 2016, Konya, Turkey. **Annals...**, Konya, Turkey, 2018, p. 29- 61.
- MITTAL, S.; KHAN, M. A.; ROMERO, D.; WUEST, T. Smart manufacturing: characteristics, technologies and enabling factors. **Journal of Engineering Manufacture**, In Press, p. 1-20, 2017.
- MOEUF, A.; PELLERIN, R.; LAMOURE, S.; TAMAYO-GIRALDO, S.; BARBARAY, R. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647, online, p. 1 – 19, 2017.
- MONOSTORI, L.; KA'DA'R, B.; BAUERNHANSL, T.; KONDOH, S.; KUMARA, S.; REINHART, G.; SAUER, O.; SCHUH, G.; SIHN, W.; UEDA, K. Cyber-physical systems in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, p. 621–641, 2016.
- MORAR, D.; KEMPER, H-G. Requirements of information systems in product development and production regarding additive manufacturing – a quantitative exploration. **Research Papers**, v. 83, p. 1 – 16, 2016.
- MOSTERMAN, P. J.; ZANDER, J. Industry 4.0 as a Cyber-Physical System study. **Springer-Verlag**, v. 15, p. 17-29, 2015.
- NEE, A. Y. C.; ONG, S. K.; CHRYSOLOURIS, G.; MOURTZIS, D. Augmented reality applications in design and manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, p. 657–679, 2012.
- OCHOA, S. F.; FORTINO, G.; DI FATTA, G. Cyber-physical systems, internet of things and big data. **Future Generation Computer Systems**, v. 75, p. 82-84, 2017.
- OUADDAHA, A.; MOUSANNIF, H.; ELKALAMA, A. A.; OUAHMAN, A. A. Access control in the Internet of Things: Big challenges and new opportunities. **Computer Networks**, v. 112, p. 237–262, 2017.
- OUSSOUS, A.; BENJELLOUN, F. H.; LAHCEN, A. A.; BELFKIH, S. Big Data technologies: A survey. **Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences**, In Press, p. 1 - 17, 2017.

PACCHINI, A. P. T.; LUCATO, W. C.; VANALLE, R. M. Barreiras à Implantação da Indústria 4.0 na Cadeia Automotiva Brasileira. In: SeTII – SEMINÁRIO EM TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO INTELIGENTE, 2017, São Paulo. **Anais...** São Paulo: UNINOVE, 2017, p. 34-45.

PAN, Y. Heading toward Artificial Intelligence 2.0. **Engineering**, v. 2, p. 409–413, 2016.

PATTON, M. Q. **Qualitative evaluation and research methods**. Newbury park, CA: Sage, 1990.

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

PESSL, E.; SORKO, S. R.; MAYER, B. **Roadmap Industry 4.0 – Implementation Guideline for Enterprises**. **International Journal of Science, Technology and Society**, v. 5, n. 6, p.193-202, 2017.

PISCHING, M. A.; PESSOA, M. A. O.; JUNQUEIRA, F.; DOS SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGIA, P. E. An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products. **Computers & Industrial Engineering**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.029>, 2017.

PFEIFFER, S. The Vision of “Industrie 4.0” in the Making – a Case of Future Told and Traded. **Nanoethics**, v. 11, n. 1, p. 107–121, 2017.

PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 - **RAMI4.0 – a reference framework for digitalization**. Berlin, 2018, disponível em: <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-anintroduction.pdf?_blob=publicationFile&v=14>. Acesso em: 18 fev. 2018.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 173 – 178, 2016.

RAMACHANDRA, G.; IFTIKHAR, M.; KHAN, F. A. A Comprehensive Survey on Security in Cloud Computing. **Procedia Computer Science**, v. 110, p. 465–472, 2017.

REIS, S. Sabó aproveita bom momento das exportações. **Automotive Business**, São Paulo, 27 abr. 2017. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/25704/sabo-aproveita-bom-momento-das-exportacoes>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A complex view of industry 4.0. **SAGE-Open**, April- June, p. 1-11, 2016.

RÜRMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. Boston, MA: Boston Consulting Group, 2015. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx>. Acesso em 23 fev. 2018.

SAARIKKO, T.; WESTERGRENN, U. H.; BLOMQUIST, T. The Internet of Things: Are you ready for what's coming? **Business Horizons**, v. 60, p. 667—676, 2017.

SAE – SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J4000 – Identification and measurement of best practice in implementation of lean operation**. In: SAE – SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE handbook – Volume 3 – On-highway vehicles (part II) and off-road machinery**. Warrendale, PA, Society of Automotive Engineers, 2001a, p. 43.01.

_____. **SAE J4001 – Implementation of lean operation user manual**. In: SAE – SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE handbook – Volume 3 – On-highway vehicles (part II) and off-road machinery**. Warrendale, PA, Society of Automotive Engineers, 2001b, p. 43.02.

SANTOS, K.; LOURES, E.; PIECHNICKI, F.; CANGIOLIERI, O. Opportunities Assessment of Product Development Process in Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1358 – 1365, 2017.

SCHMIDT, R.; MÖHRING, M.; HÄRTING, R. C.; REICHSTEIN, C.; NEUMAIER, P.; JOZINOVIĆ, P. Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUSINESS INFORMATION SYSTEMS, 18, 2015, Poznan, Poland. **Annals...** Frankfurt: Springer, 2015, p. 16–27.

SCHUH, G.; ANDERL, R.; JÜRGEN GAUSEMEIER, J.; MICHAEL TEN HOMPEL, M.; WAHLSTER, W. **Industrie 4.0 Maturity Index**. Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2017

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161 – 166, 2016.

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

SEGRE, L. M.; MARMOLEJO R. F.; DUMANS, G. Inovações tecnológicas no setor automobilístico: impactos e tendências. In: ENEGEP – ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 1998, Niterói, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 1998, p. 135-142.

SILVA, D. **Indústria 4.0: Iniciativas e evolução ao redor do mundo**. Natal, RN: Logique Sistemas, 2017. Disponível em: <<https://www.logiquesistemas.com.br/blog/industria-4-0-ao-redor-do-mundo/>>. Acesso em 20 fev. 2018.

SOMMER, L. Industrial Revolution - Industry 4.0: Are German Manufacturing SMEs the First Victims of this Revolution? **Journal of Industrial Engineering and Management - JIEM**, v. 8, n. 5, p. 1512-1532, 2015.

STEFAN, L.; WIENBRUCH, THOM, W.; KREIMEIER, L. D.; BERND, D. K. Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model. **51st CIRP Conference on Manufacturing Systems**, v. 72, p. 404 – 409, 2018.

STOJKIC, Z.; VEZA, L.; BOSNJAK, L. (2016). A Concept of Information System Implementation (CRM and ERP) within Industry 4.0. In: 26th DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENCE, MANUFACTURING AND AUTOMATION, 2016, Zadar, Croatia. **Annals...** Vienna: B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, 2016, p.912-919.

TEMUR, G. T.; BOLAT, H. B.; GOZLU, S. Evaluation of Industry 4.0 Readiness Level: Cases from Turkey. In: ISPR – *Proceedings of the International Symposium for Production Research, 2018*, Vienna, Austria. **Annals...**, 2019, p. 412-425.

TJAHJONO, B.; ESPLUGUES, C.; ARES, E.; PELAEZ, G. What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1175–1182, 2017.

TSAROUCHI, P.; MATTHAIAKIS, A.-S.; MAKRIS, S.; CHRYSOLOURIS, G. On a human-robot collaboration in an assembly cell. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 30, n. 6, p. 580–589, 2017.

- THIEDE, S.; JURASCHEK, M.; HERRMANN, C. Implementing cyber-physical production systems in learning factories. **Procedia CIRP**, v. 54, p. 7 – 12, 2016.
- VALINO, R.; SIMÕES, S. A.; TOMASINI, N. **Indústria 4.0: Digitização como vantagem competitiva no Brasil**. São Paulo: PricewaterhouseCoopers Brasil (PwC), 2016.
- VANALLE, R. M.; SALLES, J. A. A. Relação entre montadoras e fornecedores: modelos teóricos e estudos de caso na indústria automobilística brasileira. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 2, p. 237-250, 2011.
- VEZA, I.; MLADINEO, M.; GJELDUM, N. Selection of the basic lean tools for development of Croatian model of innovative smart enterprise. **Tehnički Vjesnik**, v. 23, n. 5, p. 1317-1324, 2016.
- VOGEL-HEUSER, B.; HESS, D. Guest Editorial Industry 4.0–Prerequisites and Visions. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 13, n. 2, p. 411-413, 2016.
- VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p.195-219, 2002.
- XU, L. D.; HE, W.; LI, S. Internet of Things in Industries: A Survey. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 4, p. 2233-2243, 2014.
- XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.
- WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 517–527, 2015.
- WBI ON LIFE BUSINESS BRASIL. **Desafios para implantação da Inteligência Artificial**, 2017. Disponível em: <<http://www.wbibrasil.com.br/noticias/desafios-para-implantacao-da-inteligencia-artificial/>>. Acesso em: 27 fev. 2019.
- YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. 4th ed. Newbury Park, CA: Sage, 2009.

ZÁVADSKÁ, Z.; ZÁVADSKÝ, J. Quality managers and their future technological expectations related to Industry 4.0. **Total Quality Management & Business Excellence**, DOI: 10.1080/14783363.2018.1444474, 2018.

ZEHL, S. **Implementation Strategy Industries 4.0**. Berlin: BitKom, 2016.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.

APÊNDICE – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO

Em linha com o que se determinou na revisão da literatura, nesta tese, os pré-requisitos da I 4.0 associados a cada tecnologia habilitadora, revisados pelos especialistas, serão verificados, por meio deste instrumento de avaliação, para medir o grau de prontidão de uma empresa industrial para implantação da I 4.0;

Em cada empresa escolhida, será feita a verificação, *in loco*, das seguintes tecnologias habilitadoras (elementos) e seus respectivos pré-requisitos (componentes), por meio de entrevistas semiestruturadas:

Elemento 1 / Tecnologia 1 – Internet das Coisas

IC1 A empresa deve ter sensores instalados com a tecnologia RFID ou similar.

- L0. A empresa não tem sensores instalados nem as tecnologias RFID ou similar.
- L1. A empresa está iniciando a instalação de sensores mas ainda não tem as tecnologias RFID ou similar.
- L2. A empresa já tem os sensores instalados e esta iniciando a implantação das tecnologias RFID ou similar.
- L3. A empresa já tem os sensores instalados e possui as tecnologias RFID ou similar.

IC2 A empresa deve ter o Código Eletrônico do Produto.

- L0. A empresa não tem o Código Eletrônico do Produto.
- L1. A empresa está iniciando a implantação do Código Eletrônico do Produto.
- L2. A empresa tem uma grande parte do seu inventário com o Código Eletrônico do Produto.
- L3. A empresa tem o Código Eletrônico do Produto.

IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

L0. A empresa não possui rede sem fio.

L1. A empresa possui rede sem fio com velocidade e capacidade limitadas.

L2. A empresa possui rede sem fio alta velocidade e capacidade, mas ainda não suficiente para operar de maneira satisfatória com as tecnologias da I 4.0 que necessitam de rede.

L3. A empresa possui rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

IC4 A empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade de seus processos.

L0. A empresa não possui um protocolo de comunicação.

L1. A empresa começou a pensar no protocolo de comunicação.

L2. A empresa já tem o protocolo de comunicação aberto.

L3. A empresa possui protocolo de comunicação M2M.

IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.

L0. A empresa não possui sistemas de segurança da informação.

L1. A empresa já possui estudos para implantação de sistemas de segurança da informação.

L2. A empresa já está implantando sistemas de segurança da informação.

L3. A empresa possui sistemas de segurança da informação em plena operação.

IC6 A empresa deve ter *streaming* de eventos.

L0. A empresa não possui *streaming* de eventos.

L1. A empresa está desenvolvendo estudos para implantar o *streaming* de eventos.

L2. A empresa está implantando o *streaming* de eventos estáticos.

L3. A empresa possui *streaming* de eventos *on-the-fly*.

Elemento 2 / Tecnologia 2 – Big Data

BD1 A empresa deve ter todos os seus dados/informações, confiáveis, organizados e mantidos em sistemas digitais.

L0. A empresa não possui os seus dados/informações confiáveis, nem organizados e não estão mantidos em sistemas digitais.

L1. A empresa possui uma pequena parte dos seus dados/informações confiáveis, organizados e mantidos em sistemas digitais.

L2. A empresa possui uma grande parte dos seus dados/informações confiáveis, organizados e mantidos em sistemas digitais.

L3. A empresa possui todos os seus dados/informações confiáveis, organizados e mantidos em sistemas digitais.

IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

L0. A empresa não possui rede sem fio.

L1. A empresa possui rede sem fio com velocidade e capacidade limitadas.

L2. A empresa possui rede sem fio alta velocidade e capacidade, mas ainda não suficiente para operar de maneira satisfatória com as tecnologias da I 4.0 que necessitam de rede.

L3. A empresa possui rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

BD2 A empresa deve ter pessoal habilitado para coletar e analisar os dados.

L0. A empresa não possui pessoal habilitado para coletar e analisar dados.

L1. A empresa possui uma pequena parte de pessoal habilitado para coletar e analisar dados.

L2. A empresa possui boa parte de pessoal habilitado para coletar e analisar dados.

L3. A empresa possui pessoal habilitado para coletar e analisar dados.

BD3 A empresa deve tratar essa tecnologia no nível estratégico.

L0. A empresa não trata essa tecnologia no nível estratégico.

L1. A empresa começou a tratar essa tecnologia no nível estratégico.

L2. A empresa já está avançada no tratamento dessa tecnologia no nível estratégico.

L3. A empresa trata essa tecnologia no nível estratégico.

BD4 A empresa deve ter definido o que deseja resolver com os dados coletados.

L0. A empresa não tem definido o que deseja resolver com os dados coletados.

L1. A empresa começa a definir o que deseja resolver com os dados coletados.

L2. A empresa já tem uma boa parte definida do que deseja resolver com os dados coletados.

L3. A empresa já tem definido o que deseja resolver com os dados coletados.

IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.

L0. A empresa não possui sistemas de segurança da informação.

L1. A empresa já possui estudos para implantação de sistemas de segurança da informação.

L2. A empresa já está implantando sistemas de segurança da informação.

L3. A empresa possui sistemas de segurança da informação em plena operação.

Elemento 3 / Tecnologia 3 – Computação em Nuvem

IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.

L0. A empresa não possui sistemas de segurança da informação.

L1. A empresa já possui estudos para implantação de sistemas de segurança da informação.

L2. A empresa já está implantando sistemas de segurança da informação.

L3. A empresa possui sistemas de segurança da informação em plena operação.

CN1 A empresa deve ter pessoal preparado para essa tecnologia.

L0. A empresa não tem pessoal preparado para essa tecnologia.

L1. A empresa tem poucas pessoas preparado para essa tecnologia.

L2. A empresa tem uma boa parte do pessoal preparado para essa tecnologia.

L3. A empresa tem todo o pessoal preparado para essa tecnologia.

CN2 A empresa deve ter cultura voltada a externar a privacidade de seus dados.

L0. A empresa não tem cultura voltada para externar a privacidade de seus dados.

L1. A empresa está iniciando o desenvolvimento de uma cultura voltada a externar a privacidade de seus dados.

L2. A empresa já tem boa parte do caminho percorrido para o desenvolvimento de uma cultura para externar a privacidade de seus dados.

L3. A empresa tem cultura voltada para externar a privacidade de seus dados.

IC4 A empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade do seu processo.

L0. A empresa não possui um protocolo de comunicação.

L1. A empresa começou a pensar no protocolo de comunicação.

L2. A empresa já tem o protocolo de comunicação aberto.

L3. A empresa possui protocolo de comunicação M2M.

CN3 A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L0. A empresa não tem capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L1. A empresa tem limitada capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L2. A empresa quase ampla capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L3. A empresa tem ampla capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

L0. A empresa não possui rede sem fio.

L1. A empresa possui rede sem fio com velocidade e capacidade limitadas.

L2. A empresa possui rede sem fio alta velocidade e capacidade, mas ainda não suficiente para operar de maneira satisfatória com as tecnologias da I 4.0 que necessitam de rede.

L3. A empresa possui rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

Elemento 4 / Tecnologia 4 – Sistema Físico Cibernético

IC3 A empresa deve possuir rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

L0. A empresa não possui rede sem fio.

L1. A empresa possui rede sem fio com velocidade e capacidade limitadas.

L2. A empresa possui rede sem fio alta velocidade e capacidade, mas ainda não suficiente para operar de maneira satisfatória com as tecnologias da I 4.0 que necessitam de rede.

L3. A empresa possui rede sem fio de alta velocidade e capacidade.

IC1 A empresa deve ter sensores instalados com a tecnologia RFID ou similar.

L0. A empresa não tem sensores instalados nem as tecnologias RFID ou similar.

L1. A empresa está iniciando a instalação de sensores mas ainda não tem as tecnologias RFID ou similar.

L2. A empresa já tem os sensores instalados e esta iniciando a implantação das tecnologias RFID ou similar.

L3. A empresa já tem os sensores instalados e possui as tecnologias RFID ou similar.

CF1 A empresa deve ter estrutura de análise de grandes quantidades de dados (*Big Data*).

L0. A empresa não conhece o *Big Data*.

L1. A empresa começou a tomar conhecimento do *Big Data*.

L2. A empresa iniciou a implantação do *Big Data*.

L3. A empresa já possui o *Big Data*.

CF2 A empresa deve ter acesso a dados na nuvem.

L0. A empresa não conhece a Computação em Nuvem.

L1. A empresa começou a tomar conhecimento da Computação em Nuvem.

L2. A empresa iniciou a implantação da Computação em Nuvem.

L3. A empresa já possui a Computação em Nuvem.

CF3 A empresa deve ter estrutura de computadores instalada.

L0. A empresa não tem estrutura de computadores.

L1 A empresa está pensando na aquisição de computadores.

L2. A empresa já está se estruturando na aquisição de computadores.

L3. A empresa tem infraestrutura de computadores.

CF4 A empresa deve ter Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).

L0. A empresa não tem Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).

L1. A empresa tem pequena estrutura para Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).

L2. A empresa tem razoável estrutura para uma Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).

L3. A empresa tem Arquitetura Orientada a Serviço (SOA).

Elemento 5 / Tecnologia 5 – Robô Colaborativo

RC1. A empresa deve ter pessoal preparado para.essa tecnologia.

L0. A empresa não tem pessoal preparado para essa tecnologia.

L1. A empresa tem poucas pessoas preparado para essa tecnologia.

L2. A empresa tem uma boa parte do pessoal preparado para essa tecnologia.

L3. A empresa tem todo o pessoal preparado para essa tecnologia.

RC2 A empresa deve ter conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.

- L0. A empresa não possui conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.
- L1. A empresa possui pequeno conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.
- L2. A empresa possui boa parte do conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.
- L3. A empresa possui pleno conhecimento das limitações dos robôs colaborativos.

CN3. A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos nesta tecnologia.

- L0. A empresa não tem capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.
- L1. A empresa tem limitada capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.
- L2. A empresa quase ampla capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.
- L3. A empresa tem ampla capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

RC3 A empresa deve fazer um mapeamento minuciosos dos processos e da trajetória dos robôs.

- L0. A empresa não possui mapeamento dos processos e da trajetória.
- L1. A empresa está iniciando o mapeamento dos processos e da trajetória.
- L2. A empresa possui boa parte do mapeamento dos processos e da trajetória.
- L3. A empresa possui o mapeamento dos processos e da trajetória.

RC4 A empresa deve fazer acompanhamento psicológico com os humanos que trabalham juntamente com as máquinas.

L0. A empresa não tem intenção de acompanhar psicologicamente os seus colaboradores.

L1. A empresa está pensando em desenvolver acompanhamento psicológico para os seus colaboradores.

L2. A empresa iniciou o desenvolvimento de acompanhamento psicológico para os seus colaboradores.

L3. A empresa possui acompanhamento psicológico para os seus colaboradores.

RC5 A empresa deve ter conhecimento das normas de segurança: ISO TS 15066; NBR 12110-2.

L0. A empresa não tem nenhum conhecimento das normas de segurança: ISO TS 15066; NBR 12110-2.

L1. A empresa está pensando em implantar as normas de segurança: ISO TS 15066; NBR 12110-2.

L2. A empresa iniciou a implantação das normas de segurança: ISO TS 15066; NBR 12110-2.

L3. A empresa possui as normas de segurança: ISO TS 15066; NBR 12110-2.

Elemento 6 / Tecnologia 6 – Manufatura Aditiva

MA1 A empresa deve avaliar as características das peças a serem produzidas.

L0. A empresa não tem conhecimento da importância desta avaliação.

L1. A empresa está pensando em iniciar a avaliação.

L2. A empresa iniciou a avaliação.

L3. A empresa possui a avaliação das suas peças.

MA2 A empresa deve levar em conta a sua capacidade técnica.

L0. A empresa não tem o levantamento de sua capacidade técnica.

L1. A empresa está pensando em iniciar o levantamento de sua capacidade técnica.

L2. A empresa iniciou o levantamento de sua capacidade técnica.

L3. A empresa possui o levantamento de sua capacidade técnica.

MA3 A empresa deve levar em conta o tempo de fabricação em 3D.

L0. A empresa não tem o levantamento dos tempos de fabricação em 3D.

L1. A empresa está pensando em iniciar o levantamento dos tempos de fabricação em 3D.

L2. A empresa iniciou o levantamento dos tempos de fabricação em 3D.

L3. A empresa possui o levantamento dos tempos de fabricação em 3D.

IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.

L0. A empresa não possui sistemas de segurança da informação.

L1. A empresa já possui estudos para implantação de sistemas de segurança da informação.

L2. A empresa já está implantando sistemas de segurança da informação.

L3. A empresa possui sistemas de segurança da informação em plena operação.

MA4 A empresa deve ter pessoal preparado para essa tecnologia.

L0. A empresa não tem pessoal preparado para essa tecnologia.

- L1. A empresa tem poucas pessoas preparado para essa tecnologia.
- L2. A empresa tem uma boa parte do pessoal preparado para essa tecnologia.
- L3. A empresa tem todo o pessoal preparado para essa tecnologia.

MA5 A empresa deve ter desenhos digitalizados em 3D.

- L0. A empresa não tem desenhos digitalizados.
- L1. A empresa possui uma pequena parte dos desenhos digitalizados.
- L2. A empresa possui boa parte dos desenhos digitalizados.
- L3. A empresa possui todos os desenhos digitalizados.

Elemento 7 / Tecnologia 7 – Realidade Aumentada

RA1 A empresa deve levar em conta o ambiente de trabalho do operador.

- L0. A empresa não tem conhecimento da importância deste levantamento.
- L1. A empresa está pensando em iniciar este levantamento.
- L2. A empresa iniciou este levantamento.
- L3. A empresa possui este levantamento.

RA2 A empresa deve ter arquivos digitalizados dos documentos e peças que serão utilizados para a realidade aumentada.

- L0. A empresa não tem esses arquivos digitalizados.
- L1. A empresa possui uma pequena parte desses arquivos digitalizados.
- L2. A empresa possui boa parte desses arquivos digitalizados.
- L3. A empresa possui todos os arquivos necessários para a realidade aumentada digitalizados.

RA3 A empresa deve ter um mapeamento detalhado do processo.

- L0. A empresa não possui mapeamento dos processos.

L1. A empresa está iniciando o mapeamento dos processos.

L2. A empresa possui boa parte do mapeamento dos processos.

L3. A empresa possui o mapeamento dos processos.

RA4 A empresa deve ter estudo ergonômico e ergométrico das funções do operador.

L0. A empresa não possui nenhum estudo ergonômico nem ergométrico.

L1. A empresa está iniciando o estudo ergonômico e ergométrico.

L2. A empresa possui boa parte do estudo ergonômico e ergométrico.

L3. A empresa possui estudo ergonômico e ergométrico.

RA5 A empresa deve ter *software* e *hardware* adequado para a utilização da realidade aumentada.

L0. A empresa não possui *software* nem *hardware* de realidade aumentada.

L1. A empresa está pensando em adquirir o *software* e o *hardware* para a realidade aumentada.

L2. A empresa adquiriu o *software* e *hardware* para a realidade aumentada.

L3. A empresa implantou o *software* e *hardware* para a realidade aumentada.

RA6 A empresa deve planejar quais dados podem ser compartilhados.

L0. A empresa não tem conhecimento da importância deste estudo.

L1. A empresa está pensando em iniciar este estudo.

L2. A empresa iniciou este estudo.

L3. A empresa possui este estudo.

Elemento 8 / Tecnologia 8 – Inteligência Artificial

CN3 A empresa deve ter capacitação financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L0. A empresa não tem capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L1. A empresa tem limitada capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L2. A empresa tem quase ampla capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

L3. A empresa tem ampla capacidade financeira para os investimentos nesta tecnologia.

IA1 A empresa deve ter estratégias e conhecimento prévio da AI.

L0. A empresa não conhecimento nem estratégias para AI.

L1. A empresa tem conhecimento parcial e não tem estratégias para AI.

L2. A empresa tem conhecimento, mas não tem estratégias para AI.

L3. A empresa tem conhecimentos e estratégias para AI..

IC4 A empresa deve ter protocolo de comunicação, que garanta a interoperabilidade de seus processos

L0. A empresa não possui um protocolo de comunicação.

L1. A empresa começou a pensar no protocolo de comunicação.

L2. A empresa já tem o protocolo de comunicação aberto.

L3. A empresa possui protocolo de comunicação M2M.

IC1 A empresa deve ter sensores instalados com a tecnologia RFID ou similar.

L0. A empresa não tem sensores instalados nem as tecnologias RFID ou similar.

L1. A empresa está iniciando a instalação de sensores mas ainda não tem as tecnologias RFID ou similar.

L2. A empresa já tem os sensores instalados e esta iniciando a implantação das tecnologias RFID ou similar.

L3. A empresa já tem os sensores instalados e possui as tecnologias RFID ou similar.

IA2 A empresa deve ter as tecnologias habilitadoras digitais implantada.

L0. A empresa não tem conhecimento das tecnologias digitais habilitadoras.

L1. A empresa tem conhecimento das tecnologias digitais habilitadoras.

L2. A empresa tem algumas tecnologias digitais habilitadoras implantadas.

L3. A empresa tem as tecnologias digitais habilitadoras implantadas.

IC5 A empresa deve ter sistemas de segurança da informação para mitigar os eventuais ataques cibernéticos.

L0. A empresa não possui sistemas de segurança da informação.

L1. A empresa já possui estudos para implantação de sistemas de segurança da informação.

L2. A empresa já está implantando sistemas de segurança da informação.

L3. A empresa possui sistemas de segurança da informação em plena operação.

GLOSSÁRIO

- AGV – *Automated Guided Vehicle* (Veículo Guiado Automaticamente) são equipamentos sem condutores usados para movimentação a pequenas ou grandes distâncias, podendo melhorar os tempos de resposta na movimentação interna de materiais, têm substituído as empilhadeiras em diversas empresas.
- Arquitetura Orientada a Serviços – SOA (*Service-Oriented Architecture*) uma filosofia de TI que visa facilitar a integração entre sistemas, orientando a criação e a disponibilização de soluções modulares e conectadas baseadas no conceito de serviços, que estabelece comunicação entre os sistemas clientes e os sistemas que implementam os serviços.
- *Big Data Analytics*: Metodologia de armazenamento, extração, análise e aplicação de estratégias baseadas em dados, provenientes, geralmente, de bancos extensos, baseada em 4 Vs – Volume, Velocidade, Veracidade e Variedade.
- Código Eletrônico do Produto (EPC): É a identificação do produto de última geração. É dividido em números que identificam o fabricante e o tipo de produto. Porém, o EPC usa um conjunto adicional de dígitos, que é um número de série para identificação exclusiva de itens. O EPC é a chave para as informações sobre o produto que ele identifica como existente na *EPC global Network*.
- Computação em nuvem (*Cloud Computing*): Local onde se recebem, armazenam e compartilham informações do processo produtivo. Com os dados na nuvem, a fábrica tem garantida a segurança das suas informações e funcionalidades da cadeia de suprimentos, além da facilidade de acesso e descentralização dos dados
- Digitização: Também chamada de digitalização, consiste em transformar informações analógicas em dados que podem ser processados e acessados digitalmente.

- A EPC *global Network*: é uma rede de computadores usada para compartilhar dados de produtos entre parceiros comerciais. Foi criada pela EPC *global*. A base para o fluxo de informações na rede é o Código Eletrônico de Produto (EPC), que é um identificador universal exclusivo para qualquer objeto físico em qualquer lugar do mundo, para todos os tempos. O EPC pode ser codificado em uma etiqueta RFID, ou com base na leitura ótica.
- Gêmeo digital: São versões digitais de um sistema, entidade ou processo real. Quando um produto é criado, também é projetada a sua cópia digital. As duas versões ficam conectadas, todas as informações importantes sobre desenvolvimento, testes, rentabilidade, entre outras são transmitidas pelo gêmeo digital, permitindo testes no mundo virtual antes de operar no mundo real, otimizando o processo de fabricação.
- Inteligência Artificial (AI) Compilação de várias tecnologias que permitem criar sistemas com capacidade de decisão autônoma a partir dos dados aprendidos, ou seja, são máquinas que recebem informação, aprendem e desenvolvem suas atividades de forma independente.
- Internet das coisas (IoT): Tecnologia que conecta objetos (coisas) à internet. Potencializa a eficiência dos aparelhos e complementa com novos atributos, dando a capacidade de processar e compartilhar dados entre outras máquinas com autonomia, criando uma rede que consegue se comunicar e interagir com ambientes externos e internos.
- Internet Industrial das Coisas (IIoT): A tecnologia da IoT que conecta objetos à internet, mas aplicada exclusivamente à manufatura.
- Internet de Serviços Internet of Services (IoS): Arquitetura de *software* voltada para serviços. Também conhecida como conceito *Horizontal Networking*, visa a interação “fim a fim” entre clientes, fornecedores e parceiros da cadeia de suprimentos.
- Interoperabilidade: Capacidade de diversos protocolos, sistemas, pessoas e fábricas inteligentes interagirem, trocando informações de maneira eficaz e eficiente por meio da Internet das Coisas e da própria internet

- *Machine Learning*: (máquinas que aprendem) Visa treinar máquinas para que elas desenvolvam habilidades de raciocínio, planejamento, processamento de linguagem natural, percepção e inteligência geral.
- *Machine to Machine* (M2M): Os sistemas de conexão Máquina-Máquina permitem a comunicação automatizada entre os equipamentos, as informações são transmitidas via internet ou telefone celular. Diminuindo o tempo para tomada de decisões.
- *Manufatura Aditiva* (AM): Também conhecida como Impressão 3D. Por esse sistema, as peças são produzidas de forma que o material é depositado em camadas até formar o produto. No modelo tradicional de manufatura subtrativa (usinagem), o objeto é esculpido a partir de uma grande quantidade de matéria-prima, gerando muitos resíduos. Com a impressão 3D, produtos complexos são feitos sob medida e não desperdiçam nenhum material.
- *MES – Manufacturing Execution System* (Sistemas de Execução da Manufatura) Conjunto de *softwares* e *hardwares* que integra os sistemas do chão de fábrica com o ERP. Dessa forma, o MES monitora se as atividades da cadeia produtiva estão seguindo conforme o planejado, acompanhando em tempo real a produção e informando o *software* de gestão corporativa.
- *RAMI (Reference Architecture Model Industry 4.0)*: Modelo estrutural tridimensional, desenvolvido para a Indústria 4.0, que descreve as funções, processos e dados de toda cadeia produtiva. Como as informações são divididas por níveis e participantes da manufatura, o RAMI facilita a visualização e compreensão do ciclo de vida do produto de acordo com a hierarquia da fábrica inteligente.
- *Realidade Aumentada* (AR): Tecnologia que mistura o mundo real e o virtual, transformando dados em animações ou imagens que serão inseridas no cenário real, por meio de óculos, tablets ou smartphones.
- *Realidade Virtual* (RV): Tecnologia que transporta as pessoas para um cenário criado ou reproduzido digitalmente. Isso acontece por meio de aparelhos que visam isolar o usuário do exterior, como os óculos de realidade virtual, para aumentar a imersão no mundo virtual.

- RFID: uma sigla que vem do inglês e significa *Radio Frequency Identification* (Identificação por Radiofrequência). Ou seja, trata-se de um sistema de captura de dados que utiliza como sinal, a frequência de rádio para realizar tal tarefa. Um produto, ou uma peça com um chip RFID pode ser localizado ao passar por um ponto que exista uma antena para captar o sinal.
- Robôs Autônomos ou Colaborativos (COBOTs): Os COBOTs são robôs desenvolvidos para trabalhar lado a lado com humanos de forma segura. Sua fácil utilização e manuseio foi pensada justamente para que a máquina pudesse atuar com pessoas não especialistas em tecnologias.
- Sensores e Atuadores: Um robô autônomo ou um AGV ou uma máquina, necessitam de sensores e atuadores para interagirem com o espaço, interpretarem sinais e tomarem decisões. Então, os sensores são componentes que recebem e respondem a estímulos elétricos ou mecânicos. Os atuadores são componentes responsáveis por realizar a conversão da energia elétrica, hidráulica e pneumática em energia mecânica que será enviada aos sensores, fazendo com que a máquina se movimente e realize os movimentos programados.
- Segurança Cibernética: Procedimentos que visam lidar com a segurança do cyber espaço, ambiente relacionado à internet e qualquer forma de comunicação de computador para computador. Ou seja, busca garantir a confiabilidade/segurança dos dados e equipamentos ligados à rede.
- Segurança da Informação: Procedimentos que visam lidar não apenas com a segurança do cyber espaço, mas também com a segurança interna, engloba todos os riscos inerentes aos sistemas de informação e seus controles, como os aspectos físicos, técnicos, processuais e a nível pessoal.
- Sistema Cyber-Físicos *Cyber Physical System* (CPS): o sistema une Tecnologia da Informação e componentes mecânicos e eletrônicos para a troca de informações utilizando a Internet. Ou seja, utiliza sistemas de produção com *software* embutido (*embedded*), para coletar dados por meio de sensores, avaliam as informações recebidas e interagem com a produção, integrando mundo físico e digital, em tempo real.

- Sistemas de Integração Vertical e Horizontal: Integração entre os setores internos da empresa (Vertical), com o ambiente em que ela está inserida como clientes, fornecedores, distribuidores e parceiros (Horizontal).
- Sistemas de simulação: Também conhecido como Gêmeo Digital. *Software* que simula a aplicação e eficiência das tecnologias relacionadas a Manufatura Inteligente no ambiente da fábrica. É uma maneira de testar o funcionamento de sistemas e processos, podendo prever qualquer erro e antecipar novas soluções.
- Tecnologias disruptivas: Inovações tecnológicas que provocaram uma ruptura em modelos e processos tradicionais.
- Ubíquo (computação): Capacidade de estar interligado com toda a rede, presente em todos os pontos.