CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
ELAINE CRISTINA DA SILVA

INFLUÊNCIA DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0 SOBRE A SUSTENTABILIDADE: Enfoque no *Tripple Bottom Line*

São Bernardo do Campo
2021

ELAINE CRISTINA DA SILVA

INFLUÊNCIA DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0 SOBRE A SUSTENTABILIDADE: Enfoque no *Tripple Bottom Line*

Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro Universitário FEI, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientada pela Prof.ª Dra. Gabriela Scur

São Bernardo do Campo

2021

Cristina da Silva, Elaine.
Influência das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 sobre a Sustentabilidade:: Enfoque no Tripple Bottom Line / Elaine Cristina da Silva. São Bernardo do Campo, 2021.
102 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientadora: Prof.ª Dra. Gabriela Scur.

1. Indústria 4.0. 2. sustentabilidade. 3. tripé da sustentabilidade. 4. internet das coisas. 5. sistemas físicos cibernéticos. I. Scur, Gabriela, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

Mestrado

PGM-10

Aluno: Elaine Cristina da Silva **Matrícula:** 218109-7

Título do Trabalho: INFLUÊNCIA DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0 SOBRE A SUSTENTABILIDADE: Enfoque no Tripple Bottom Line.

Área de Concentração: Produção

Orientador: Prof.ª Dr.ª Gabriela Scur

Data da realização da defesa: 29/06/2021

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 29 / 06 /2021 .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Prof.ª Dr.ª Gabriela Scur	Ass.: _____
Prof.º Dr.º Wilson Hilsdorf	Ass.: _____
Prof.º Dr.º Rodrigo Franco	Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Primeiramente a Deus e à Virgem de Fátima que me abençoaram ao longo da minha jornada do Mestrado. À minha mãe Terezinha de Jesus Pizate da Silva, minha Irmã Elisangela Silva, meu irmão Sergio C. da Silva com sua família, meus sobrinhos Larissa e Hector, pois foram meu alicerce, incentivo e instrumento de Amor, Perseverança e Coragem. Ao meu Pai Vicente Cardoso da Silva *(in memoriam),* Trabalhador, metalúrgico e engenhoso, será meu eterno Mestre e incentivador. Durante sua passagem nesta vida me ensinou a construir meus próprios valores e caminhos. Ao meu irmão Pedro *(in memoriam),* que se tornou um anjo de luz junto a Deus Pai.

AGRADECIMENTOS

À Santíssima Trindade e em especial a Virgem de Fátima que foram abrindo portas e caminhos com a sua egrégora de Luz e, toda a minha Ancestralidade que me acolhe e traz a sabedoria necessária para enfrentar os momentos de adversidade, de bênçãos infinitas na minha vida e que me direciona o tempo todo para construção da minha trajetória com Amor.

A minha família, em especial minha Mãe Terezinha e minha irmã Elisangela, por todo carinho, paciência, incentivo e compreensão que me proporcionaram durante a realização do programa de Mestrado. A minha Vó Maria Francisca Pizate e minha Madrinha Denise Aniceto, que estão sempre intercedendo por mim em suas orações. Ao Jefferson que mesmo longe na sua jornada sempre esteve por perto, será sempre minha conexão de afeto e incentivo nos meus projetos de vida, pois estará sempre vivo dentro do meu coração.

A minha orientadora, Professora Dra. Gabriela Scur, pessoa de determinação, por toda a sua colaboração, empenho, sabedoria e compreensão, tem me ensinado a confiar no meu potencial de criação, sendo instrumento fundamental para que este trabalho sobre Indústria 4.0 e Sustentabilidade alcançasse êxito. Mais que uma orientadora, questionadora e grande incentivadora.

Aos professores doutores da área de concentração em Produção do programa de mestrado em Engenharia Mecânica: Alexandre Augusto Massote, Ana Paula Vilas Boas Viveiro Lopes, Cláudia Aparecida de Mattos, Dário Alliprandini, Mauro Sampaio e Wilson de Castro Hilsdorf, por todo o conhecimento compartilhado dentro e fora das salas de aula.

Ao Centro Universitário FEI, por toda a infraestrutura oferecida e pelo todo o corpo de colaboradores engajados que contribuem exponencialmente para manter toda a infraestrutura educacional em pleno funcionamento.

Ao meu amigo e meu eterno parceiro de trabalho Sr. Jaime Aparecido Venturinelli, Engenheiro, com a sua bagagem e admirável trajetória na Manufatura, compartilhou comigo seus conhecimentos, sendo um grande incentivador, dado o início da minha jornada no Mestrado.

Ao Dr. Fabiano Deliberalli e a sua esposa Lívia que me apoiaram clinicamente, durante os processos nos quais precisei passar. A Professora Estela Mari Quintela de Língua Inglesa sendo amiga e professora com seu apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo da minha trajetória acadêmica e profissional. A minha Amiga Vera Lucy, sempre apoiando e torcendo pela concretização do meu Mestrado. Ao Professor e Amigo Dr. José Antônio Fantin, Economista e Executivo, com sua vivência acadêmica e corporativa compartilhada como

Orientador e Professor e sua esposa Lucília Ribas uma grande amiga e incentivadora, ambos se tornaram meus Padrinhos de coração na defesa desta dissertação.

Ao meu amigo e irmão acadêmico Jobel Correa, pessoa de extrema empatia e carisma, sempre muito solidário, de muita experiência acadêmica, pode me mostrar caminhos em meio às dificuldades durante o meu processo do Mestrado.

Do mesmo modo, estendo a minha Gratidão às empresas que trabalhei que contribuíram exponencialmente para o meu aprendizado como profissional, pois em virtude da experiência adquirida e vivência acadêmica, foi possível alcançar a finalização deste Projeto. E, em especial à Empresa objeto deste estudo, que me concedeu a oportunidade da obtenção dos dados para que eu pudesse contribuir com este Trabalho.

Aos familiares e amigos que não mencionei estendo minha eterna gratidão pelo incentivo, amor e apoio durante todo este período.

“Seja quem você for, seja qualquer posição que você tenha na vida, no nível altíssimo ou mais baixo social, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito AMOR e com muita FÉ em DEUS, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

A Sustentabilidade tem se tornado tema de crescente interesse pelas organizações, pois atua em coparticipação com a Indústria 4.0. O avanço da inserção das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 (I4.0) traz um elevado nível de conectividade que possibilitam o desenvolvimento de produtos customizados, eficiência nos processos e também mudanças em diferentes níveis organizacionais que impactam na sociedade como um todo, colaborando para a sustentabilidade. Este estudo se propôs a analisar como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir na melhoria dos indicadores relacionados ao tripé da Sustentabilidade (TBL) em uma multinacional europeia que atua no setor de alimentos. Os resultados apontam que, após implementação nas tecnologias como Robôs, IoT e Cloud é possível conectar fábricas, trazer eficiência e flexibilidade nos processos e melhoria nos prazos de entregas, impactando, assim, no aspecto econômico. Por outro lado, há a necessidade de investimentos para adoção das tecnologias. Quanto ao aspecto ambiental destacaram-se tecnologias como Robôs, IoT e Cloud por estarem diretamente ligadas aos projetos de digitalização, impactando na redução de resíduos e na entrega incorreta de mercadorias. Essas tecnologias impactaram também nos indicadores de transformação organizacional, que estão diretamente associados à motivação dos profissionais e a necessidade de requalificação para que possam estar inseridos no contexto de transformação para uma nova realidade corporativa. A empresa investirá em CPS e Big Data para novos projetos e espera que essas tecnologias tragam benefícios sobre a sustentabilidade.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Sustentabilidade. Tripé da sustentabilidade. Internet das coisas. Fábrica inteligente. Sistemas físicos cibernéticos.

ABSTRACT

Sustainability has become a theme of growing interest by organizations, as it acts in co-participation with Industry 4.0. The advance in the insertion of enabling technologies for industry 4.0 (I4.0) brings a high level of connectivity that enables the development of customized products, efficiency in processes and also changes at different organizational levels that impact society as a whole, contributing to the sustainability. This study aimed to analyze how the enabling technologies of Industry 4.0 can contribute to the improvement of indicators related to the Sustainability Triple Bottom (TBL) in a European multinational that operates in the food sector. The results show that, after implementing technologies such as Robots, IoT and Cloud, it is possible to connect factories, bring efficiency and flexibility to processes and improve delivery times, thus impacting the economic aspect. On the other hand, there is a need for investments to adopt the technologies. As for the environmental aspect, technologies such as Robots, IoT and Cloud stood out as they are directly linked to digitization projects, impacting on waste reduction and incorrect delivery of goods. These technologies also impacted organizational transformation indicators, which are directly associated with the motivation of professionals and the need for retraining so that they can be inserted in the context of transformation to a new corporate reality. The company will invest in CPS and Big Data for new projects and hopes that these technologies will bring sustainability benefits.

Key words: Industry 4.0. Sustainability. Triple bottom line. Internet of things. Smart factory. Cyber physical systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Pesquisa da literatura para Indústria 4.0, Sustentabilidade e TBL 16
Figura 1 – Publicações por Ano 17
Quadro 2 – Pesquisa no *Vosviewer* pela palavra chave 17
Figura 2 – Sobreposição pelas palavras-chave 18
Quadro 3 – Pesquisa sobre a literatura para Indústria 4.0, Sustentabilidade e TBL 18
Figura 3 – Relação de Documentos pelo país de contribuição 19
Figura 4 – Quarta revolução industrial 20
Gráfico 1 – Ranking dos setores que mais usam uma das tecnologias digitais 21
Gráfico 2 – Ranking dos setores que menos usam uma das tecnologias digitais 22
Figura 5 – Modelo facilitador da colaboração da produtividade 23
Figura 6 – Cadeia de Valores da Indústria 4.0 26
Figura 7 – Ambiente Físico integrado com a camada de automação via IoT 28
Quadro 4 – Os efeitos da Indústria 4.0 sobre os principais elementos das empresas de Manufatura 35
Quadro 5 – Literatura existente que trata dos aspectos de sustentabilidade da IoT 36
Quadro 6 – Desafios da I4.0 37
Figura 8 – O triple bottom line (TBL) 39
Figura 9 – Trajetórias da Sustentabilidade da I4.0 exploradas na literatura 40
Quadro 7 – As principais abordagens observadas pelos autores no contexto da I4.0 41
Quadro 8 – Correlação entre os princípios da I4.0 e os impactos da sustentabilidade da cadeia de valor empresarial 42
Figura 10 – Modelo Analítico Teórico sobre as trajetórias da Sustentabilidade 44
Quadro 9 – Modelos de avaliação de sustentabilidade e sua finalidade 46
Figura 11 – Etapas do desenvolvimento do estudo de caso 49
Figura 12 – Etapas e estrutura do trabalho 51
Quadro 10 – Entrevistados 51
Figura 13 – Tecnologias Habilitadoras da I4.0 e Período de Implementação 55
Quadro 11 – Impactos 56
Figura 14 – Impactos da I4.0 57
Figura 15 – Dimensões do TBL e Resultados com a Implementação das Tecnologias da I4.0 60
Figura 16 – Notas dos Indicadores Econômicos do TBL com as Tecnologias da I4.0 62

Figura 17 – Análise Estatística dos Indicadores Econômicos do TBL com as Tecnologias da I4.0 63
Figura 18 – Notas dos Indicadores Ambientais do TBL com as Tecnologias da I4.0 64
Figura 19 – Análise Estatística dos Indicadores Ambientais do TBL com as Tecnologias da I4.0 65
Figura 20 – Notas dos Indicadores Sociais do TBL com as Tecnologias da I4.0 66
Figura 21 – Análise Estatística dos Indicadores Ambientais do TBL com as Tecnologias da I4.0 67

LISTA DE ABREVIATURAS

BD	*Big Data*
CS	*Cyber Security (Segurança Cibernética)*
CC	*Cloud Computing (computação em nuvem)*
CPS	*Cyber Physical Systems (Sistemas Ciber Fisícos)*
CNI	*Confederação Nacional das Indústrias*
I4.0	*Indústria 4.0*
IoT	*Internet of Things (internet das coisas)*
IoS	*Internet of Service (internet de serviços)*
SCM	*Supply Chain Management (Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos)*
TBL	*Tripple bottom line (Tripé da Sustentabilidade)*
TI	*Tecnologia da Informação*
AGVs	*Automated Guided Vehicle (Veículo Autônomo Guiado)*
SKUs	*Stock Keeping Unit (Tipos de Produtos)*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA 16
2.1 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES E CITAÇÃO 16
3 INDÚSTRIA 4.0 20
3.1 TECNOLOGIAS EMERGENTES DA INDÚSTRIA 4.0 27
3.2 PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0 33
4 SUSTENTABILIDADE 38
5 INDICADORES DA SUSTENTABILIDADE E MÉTODOS DE ANÁLISE PARA AVALIAÇÃO 45
6 METODOLOGIA 48
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES 52
7.1 BLOCO I: TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA I4.0 52
7.2 BLOCO II: IMPACTOS DA I4.0 56
7.3 BLOCO III: DIMENSÕES DO TBL E RESULTADOS COM A IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0 58
7.4 BLOCO IV: INFLUÊNCIA DOS INDICADORES DA SUSTENTABILIDADE COM AS TECNOLOGIAS EMERGENTES DA I4.0. 61
8 CONCLUSÃO 69
REFERÊNCIAS 70
APÊNDICES 75
APÊNDICE A 75
APÊNDICE B 83
APÊNDICE C 84
APÊNDICE E 86
APÊNDICE H 89
APÊNDICE I 90
APÊNDICE O 96
APÊNDICE R 99
APÊNDICE S 100
APÊNDICE T 101
APÊNDICE U 102

1 INTRODUÇÃO

A partir de iniciativas do governo alemão na Feira de Hannover em 2011, foi cunhado o termo *Industrie 4.0* cujo objetivo inicial foi propor a automatização dos processos fabris de forma mais eficiente para que os produtos pudessem chegar com mais rapidez ao consumidor final fortalecendo a competividade global (RAO; PRASAD, 2018).

A Indústria 4.0 trata-se de uma revolução industrial baseado na integração dos processos atualmente automatizados nas indústrias, através dos sistemas ciber-físicos (CPS - *Cyber-Physical Systems*) que incorporam máquinas, sistemas de armazenagem e instalações de produção que são capazes de trocar informação e cooperar de forma autônoma através da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) desencadeando ações e controlando uns aos outros de forma independente (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Além disso, a Indústria 4.0, também é conhecida como "Fábrica Inteligente" (*Smart Factory*), pois em fábricas inteligentes modularmente estruturadas, através dos sistemas ciber-físicos, processos são monitorados em tempo real, criando uma espécie de cópia virtual do mundo físico capazes de tomar decisões decentralizadas (RAO; PRASAD, 2018).

Segundo Alcálcer e Machado (2018), a I4.0 é caracterizada como sistemas ciber-físicos (CPS) relacionado a dados de máquinas, sistemas de armazenamento e instalações da produção que possam ser manipulados para interoperabilidade em processos produtivos, ou seja, onde os dados possam ser trocados de forma independente com a capacidade de gerar melhorias nos processos industriais, desde a engenharia, ao uso dos recursos, a gestão da cadeia de abastecimento e gerenciamento do ciclo de vida do produto associados à tecnologias como Big Data (BD), Internet das Coisas (IoT), Serviços (IoS), Automação Industrial, Segurança Cibernética (CS), Computação em Nuvem (CC) e Robótica Inteligente ou denominada a robótica colaborativa. Para Leyh, Martin e Schäffer (2017), a I4.0 pode ser considerada como um fluxo inteligente de um sistema de produção, através de sistemas flexíveis de manufatura e sistemas colaborativos para resolver problemas oriundos de processos de fabricação assumindo melhores condições de análise para tomada de decisões dentro de um cenário produtivo.

Esta evolução tecnológica está permitindo que as organizações ampliem as suas opções estratégicas, tais como: diferenciação baseada na qualidade, rapidez na resposta ao mercado e flexibilidade, além de um maior controle de processos. Fitzgerald *et al.* (2014) e Ross *et al.* (2016) mencionam que as tecnologias digitais estão cada vez mais sendo vistas como ferramentas decisivas para obter vantagem competitiva no atual ambiente competitivo. Para Rauch *et al.* (2015), a adoção destas tecnologias frequentemente envolve transformações nas

estruturas organizacionais, mudanças em produtos e processos e impactos sociais, demandando assim, o estabelecimento de novas práticas de gestão. A transformação digital requer novas capacidades e as organizações necessitam repensar e, possivelmente, reinventar seu modelo de negócio para se manterem competitivas (CARCARY; DOHERTY; CONWAY, 2016). A Indústria 4.0 é a evolução dos modelos industriais anteriormente adotados, com uma nova concepção associada ao conceito da sustentabilidade em que é necessário a utilização dos recursos de forma mais eficiente e sustentável, ou seja, a criação de processos de manufatura que não prejudique o meio ambiente, que ofereçam à sociedade benefícios como um todo e que os projetos implementados sejam economicamente viáveis para as indústrias. O conceito de Indústria 4.0 está faceado na criação de um modelo industrial mais sustentável, com uso eficiente dos recursos como matéria-prima, energia e água (SANTOS *et al.*, 2018).

Através da I4.0 e o seus conceitos de aplicação no setor da manufatura, é possível que sejam levantadas questões desafiadoras que tratam da proposta de avaliar métodos, processos e ações para avaliar o nível da I4.0 em que as organizações necessitam mobilizar esforços para adotar tecnologias para melhorar os indicadores da sustentabilidade em diversos modelos de negócios (RAUCH *et al.,* 2015). Para Kiel *et al.* (2017), se uma fábrica busca melhorar sua eficiência, desempenho, ergonomia e segurança é necessário a implementação de sistemas ciber-físicos para atender a esses requisitos. Por outro lado, geram-se discussões sobre novos perfis de trabalhadores e postos e as organizações necessitam desenvolver estratégias, ações e políticas que tenham como objetivo se adequar e este novo cenário. Desta forma, diante destas tecnologias emergentes há um novo cenário de criação de produtos, processos e procedimentos integrados, formando um ecossistema digital entre todos os *stakeholders* de uma empresa.

Assim, o surgimento da manufatura sustentável tem como objetivo causar o mínimo de impacto negativo ao meio ambiente, conservando todos os recursos naturais e energia, de forma que possa também viabilizar economicamente a segurança das comunidades e empregados (U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2011).

Segundo Braccini e Margherita (2018), a sustentabilidade é um dos impulsionadores da I4.0, entretanto, pesquisas ainda são necessárias para avaliar a relação entre o TBL com a I4.0, pois é a oportunidade para as organizações criarem valor nas três dimensões da sustentabilidade, a econômica, social e ambiental. Portanto, a pergunta dessa pesquisa é como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir na melhoria dos indicadores relacionados ao *triple bottom line* (TBL)? Para responder a essa pergunta o principal objetivo deste trabalho é analisar como a adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 pode melhorar os indicadores da Sustentabilidade (TBL) no processo produtivo em 4 plantas industriais brasileiras de uma

grande empresa multinacional europeia de alimentos. Para o atingimento do objetivo proposto, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar quais são as tecnologias habilitadoras da I4.0 adotadas pela organização;
2. Analisar os principais Impactos da adoção de tecnologias habilitadoras da I4.0 nos processos da empresa;
3. Analisar os resultados da implementação das tecnologias da I4.0 nas dimensões do TBL e
4. Identificar os indicadores de sustentabilidade impactados com as tecnologias emergentes da I4.0.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A primeira etapa desta pesquisa consiste em realizar uma revisão sistemática da literatura, através de uma análise bibliométrica (CARVALHO; FLEURY; LOPES, 2013; DIODATO, 1994; LOPES; CARVALHO, 2018; NEELY, 2005; PRASAD; TATA, 2005).

Contudo, a base de dados escolhida para amostra inicial foi a Scopus e a busca foi realizada em junho de 2019 com os termos: Título: "industry 4.0", "internet of things", "smart factory", "cyber physical system", "sustainability", "triple bottom line"). Utilizou-se apenas o filtro por tipo de documento, considerando-se apenas os 10 artigos conforme descritos no Quadro 1, pois estes continham as informações necessárias quanto a utilização do software *Vosviewer.*

Quadro 1 – Pesquisa da literatura para Indústria 4.0, Sustentabilidade e TBL

Item	**Descrição**
Pesquisa	Base de Dados *Scopus*
Palavras-Chave	*(TITLE-ABS-KEY (industry 4.0) OR TITLE-ABS-KEY (internet AND of AND things) OR TITLE-ABS-KEY (smart AND factory) OR TITLE-ABS-KEY (cyber AND physical AND system) AND TITLE-ABS-KEY (sustainability) AND TITLE-ABS-KEY (triple AND bottom AND line))*
Quantidade de Pesquisas Encontradas	10

Fonte: Autor, 2019.

2.1 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES E CITAÇÃO

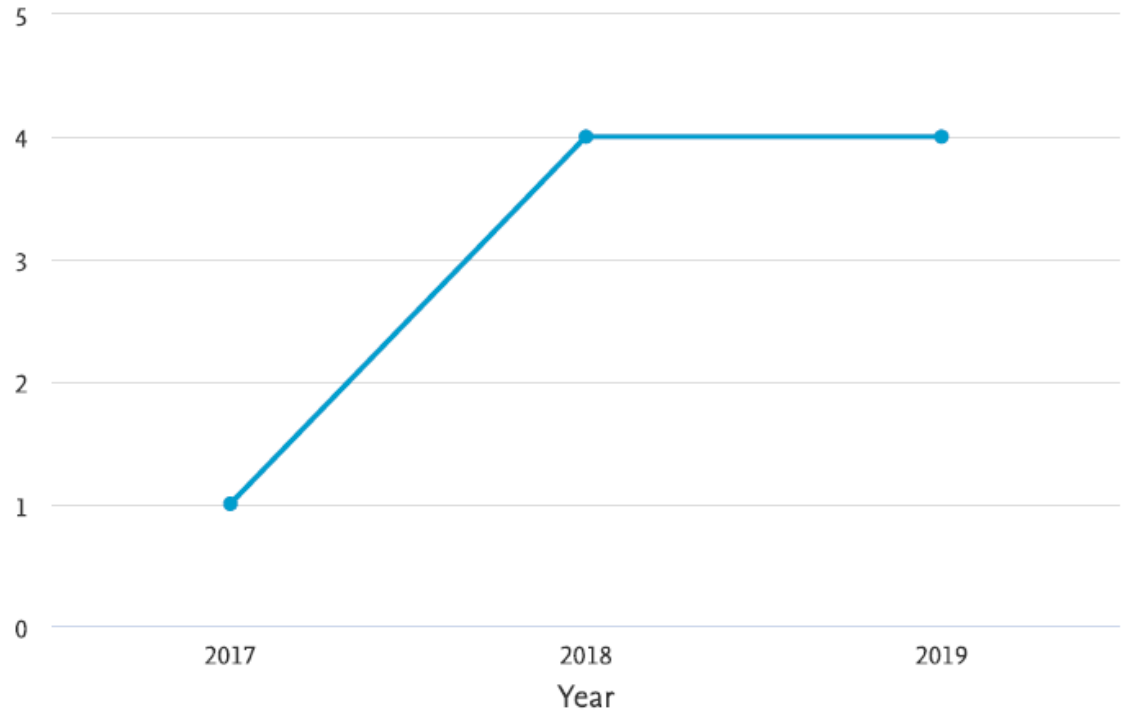
A primeira análise é baseada nas publicações por ano, que mostra um aumento significativo das publicações ao longo dos anos na Figura 1, foi apontado que houve um crescente interesse da comunidade acadêmica em analisar o cenário da Industria 4.0 na sustentabilidade luz ao TBL, no entanto, observa-se que o maior pico de publicações tem vista no ano de 2018 e 2019.

De acordo com as palavras-chave de busca referente ao tema, foram identificados o número de ocorrências em cada documento conforme ilustrado no Quadro 2 e Figura 2 extraídos do *software Vosviewer*, em que é possível analisar o crescente interesse sobre o tema *Sustainability* e *Triple Bottom Line* em 2018, com diminuição de tendências sobre as demais

Keywords ao longo do período. No Quadro 3 foi obtido a relação dos principais autores e a relação do número de citações na base de dados *Scopus.*

Através da Figura 3 é possível identificar os países com maiores números de publicação, de acordo com os 11 documentos obtidos, a maioria dos artigos são oriundos da Alemanha, na sequência Áustria e Estados Unidos. Nota-se que estes países estão associados pelo fato que o tema tenha surgido localmente em virtude da I4.0, luz a realidade fabril e produtiva, além do nível tecnológico de suas indústrias em relação ao Brasil.

Figura 1 – Publicações por Ano



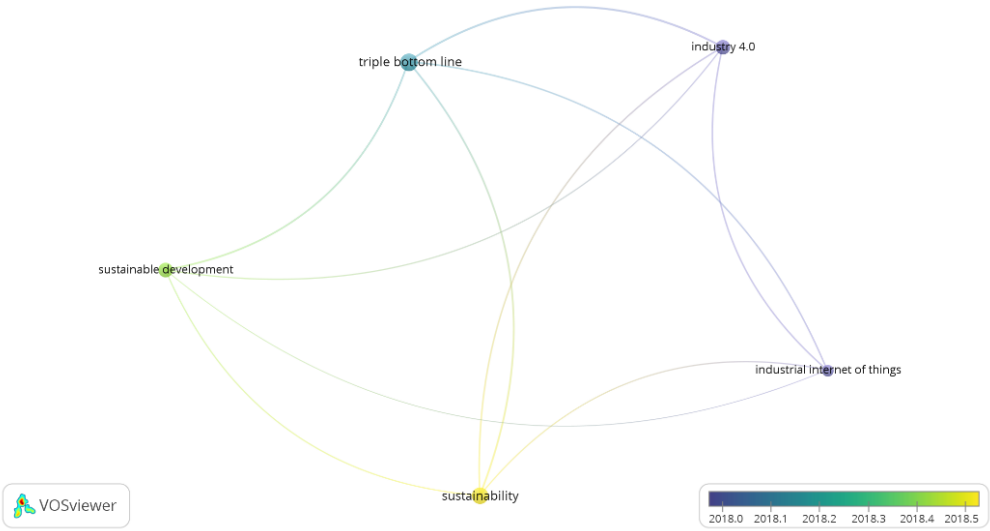
Fonte: *Scopus,* 2019.

Quadro 2 – Pesquisa no *Vosviewer* pela palavra chave

PALAVRA-CHAVE	OCORRÊNCIAS
TRIPLE BOTTOM LINE	7
INDUSTRY 4.0	5
SUSTAINABILITY	6
INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS	3
SUSTAINABLE DEVELOPMENT	5

Fonte: Autor, 2019.

Figura 2 – Sobreposição pelas palavras-chave



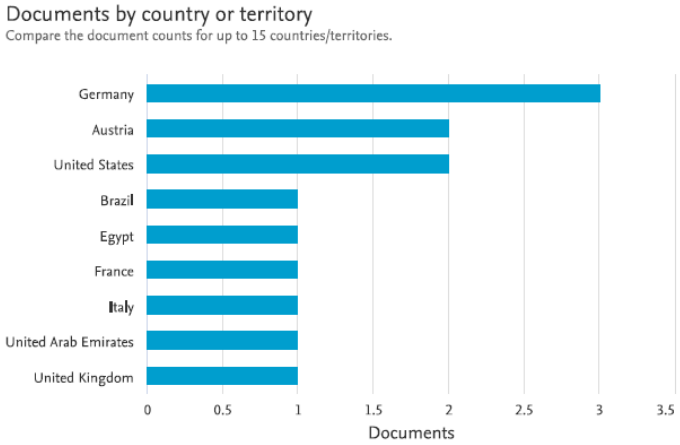
Fonte: *Vosviewer,* 2019.

Quadro 3 – Pesquisa sobre a literatura para Indústria 4.0, Sustentabilidade e TBL

Tema do Artigo	**Autores**	**Ano**	**Publicação do Artigo**	**Número de Citações**
Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0	Kiel, D., Müller, J.M., Arnold, C., Voigt, K.-I.	2017	International Journal of Innovation Management 21(8),1740015	30
The Avon River Basin in 2050: Scenario planning in the Western Australian Wheatbelt	O'Connor, M.H., McFarlane, M., Fisher, J., MacRae, D., Lefroy, T.	2005	Australian Journal of Agricultural Research 56(6), pp. 563-580	14
Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025	Müller, J.M., Voigt, K.-I.	2018	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology 5(5), pp. 659-670	10
Cooperation in R & D and eco-innovations: The role in companies' socioeconomic performance	Tumelero, C., Sbragia, R., Evans, S.	2019	Journal of Cleaner Production 207, pp. 1138-1149	02
Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers	Birkel, H.S., Veile, J.W., Müller, J.M., Hartmann, E., Voigt, K.-I	2019	Sustainability (Switzerland) 11(2),384	01
State of apps targeting management for sustainability of agricultural landscapes. A review	Eichler Inwood, S.E., Dale, V.H.	2019	Agronomy for Sustainable Development 39(1),8	00
Exploring organizational sustainability of Industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company	Baccini, A.M., Margherita, E.G.	2018	Sustainability (Switzerland) 11(1),36	00
A framework to help decision makers to be environmentally aware during the maintenance of cyber physical systems	Sénéchal, O., Trentesaux, D.	2019	Environmental Impact Assessment Review, 77, pp. 11-22.	00
The industrial internet of things models, challenges and opportunities in sustainable manufacturing	Islam, M.M., AlGeddawy, T.	2018	39th International Annual Conference of the American Society for Engineering Management, ASEM 2018: Bridging the Gap Between Engineering and Business pp. 122-131	00
Proposing a sustainability course in industrial, manufacturing and systems engineering program	Garbie, I.H., Bashir, H.A.	2018	IISE Annual Conference and Expo 2018	00

Fonte: *Scopus,* 2019.

Figura 3 – Relação de Documentos pelo país de contribuição



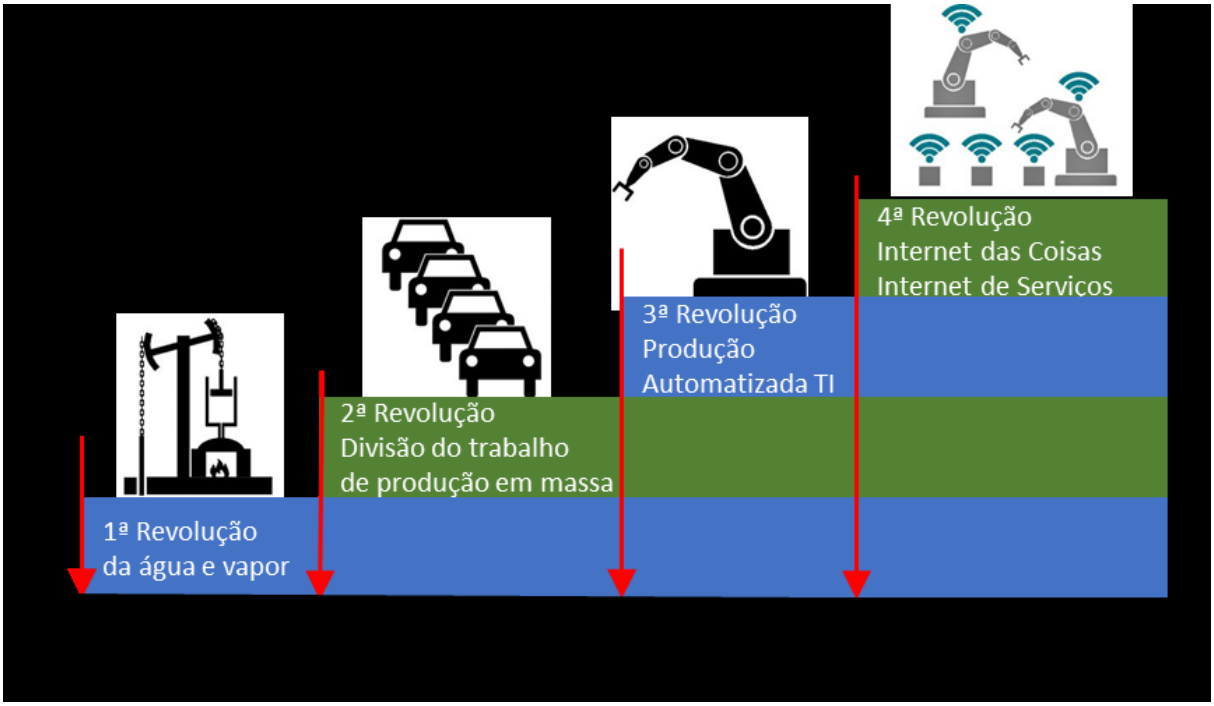
Fonte: *Scopus,* 2019.

3 INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 é caracterizada basicamente pela fabricação e fornecimento de serviços através de processos de automação e digitalização que promete melhorar a sustentabilidade dentro das organizações. De acordo com Perales *et al.* (2018), a I4.0 promove interoperabilidade, agilidade, flexibilidade, tomada de decisões, eficiência e reduções de custos.

Segundo Thoben, Wiesner e Wuest (2017), as três revoluções anteriores levaram a quebra de paradigmas quanto a manufatura, a primeira caracterizada por água e energia a vapor, a segunda pela produção de processos em larga escala em linhas de processos de produção mecanizadas e a terceira caracterizada pela inserção da automação, demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Quarta revolução industrial



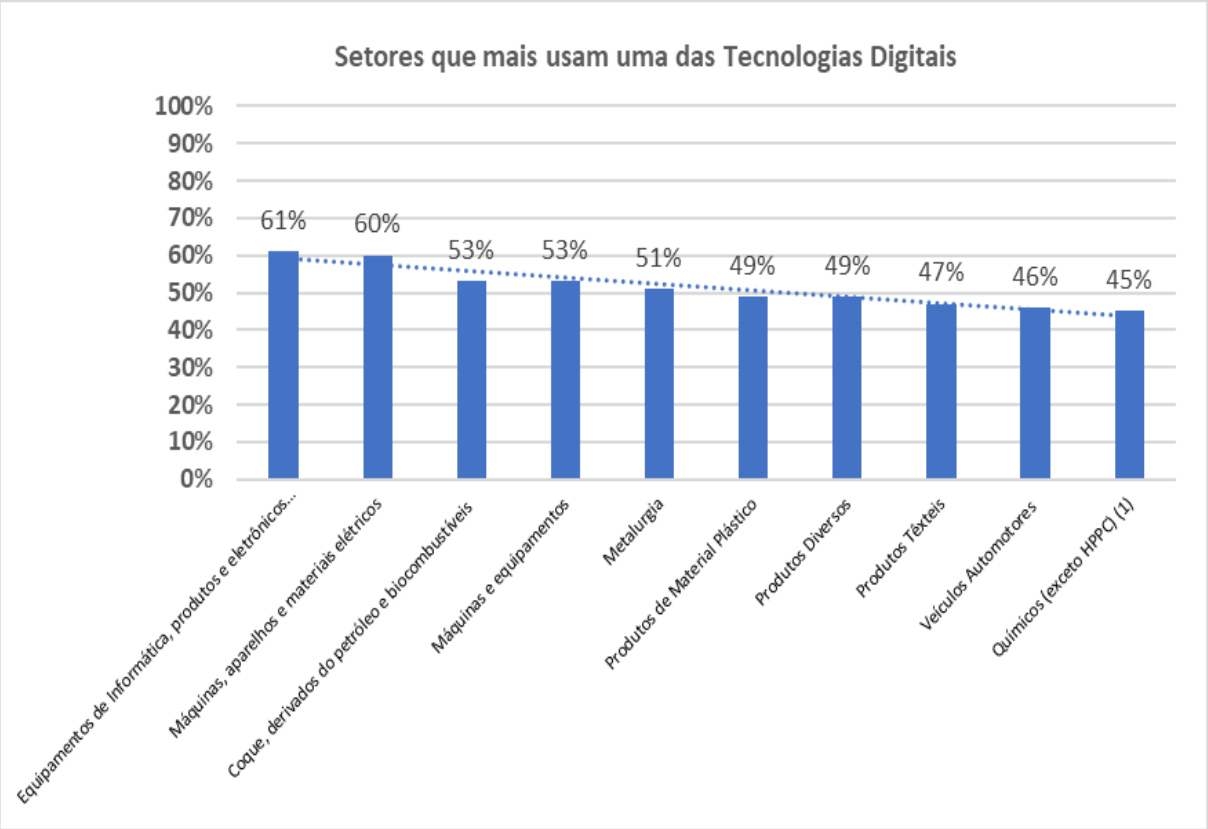
Fonte: Autor. 2020.

A quarta revolução industrial é reconhecida pela introdução da Internet das Coisas (IoT) no contexto do desenvolvimento dos processos autônomos de manufatura, no que tange a integração de serviços juntos aos processos de manufatura em fábricas inteligentes, em sistemas de produção vertical e horizontalmente integrados, de tal forma que sistemas possam ter autonomia e controle, caracterizados como sistemas ciber-físicos (CPS) (THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

De acordo com a pesquisa realizada em janeiro de 2016 pela CNI – Confederação Nacional da Indústria, foram apontados dados sobre o processo de implementação da Indústria

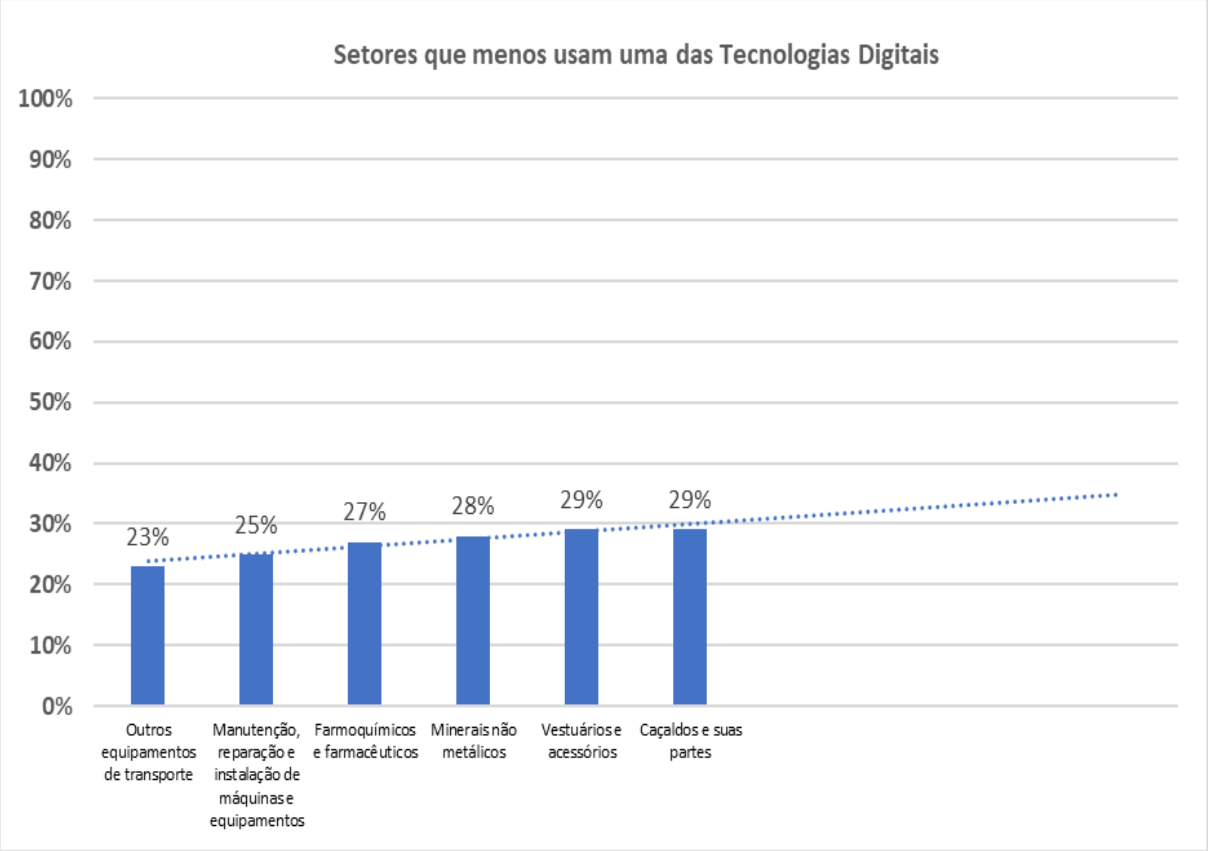
4.0 no Brasil, através da análise de 2225 empresas em diversos segmentos, caracterizados entre: 910 pequenas, 815 médias e 500 grandes. Concluiu-se que neste período a I4.0 estava sobre um processo de familiarização. Desta análise, considerou que 57% das empresas desconheciam as tecnologias voltadas para I4.0, dos 43% que conheciam alguma tecnologia 66% informaram não implantar devido aos custos de implementação. O Gráfico 1 e 2 evidenciam os segmentos e o seu percentual de utilização no período informado. Neste estudo da CNI é possível observar que a maior parte das organizações que foram consultadas responderam que a relação da implementação das tecnologias estão diretamente associadas à redução de custos e ao aumento da produtividade, na sequência a melhoria da qualidade na manufatura dos produtos e, por fim, a otimização dos processos de automação (a evolução dos processos de automação existentes visto como cenário da I4.0). No entanto, uma das principais barreiras encontradas é quanto ao custo de implantação e retorno do investimento e a estrutura e cultura da organização.

Gráfico 1 – Ranking dos setores que mais usam uma das tecnologias digitais



Fonte: CNI, 2016.

Gráfico 2 – Ranking dos setores que menos usam uma das tecnologias digitais

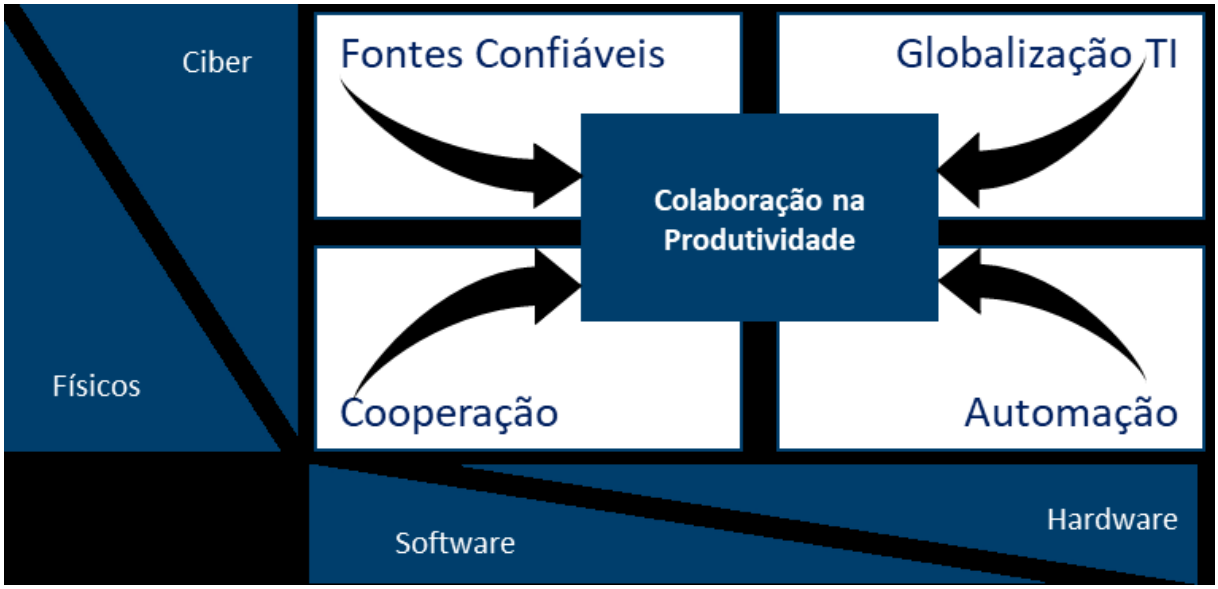


Fonte: CNI, 2016.

Foi possível observar também que o cenário brasileiro tem sua preocupação quanto aos impactos relacionados a competitividade na indústria, uma vez que a redução de custos e aumento de produtividade tem se tornado de grande interesse das indústrias.

A utilização das tecnologias da I4.0 obteve um grande avanço, pois segundo Sousa *et al.* (2018), tem como objetivo tornar os sistemas de produção mais colaborativos e flexíveis, através da fusão entre o mundo físico e virtual, formam-se sistemas ciber- físicos (CPS), em que dados são gerados em tempo real sobre os processos de produção, oferecendo melhor flexibilidade e desempenho nos sistemas fabris, incentivados pelo alto potencial de crescimento da produtividade, levando ao processo de transformação nas indústrias no âmbito social, econômico e tecnológico. Segundo Schuh *et al.* (2014), o sistema pode ser classificado em dois níveis: o primeiro é destacado pelo nível sistema ciber-físico e o segundo é atribuído aos elementos de um sistema de produtividade relacionado ao sistema ciber-físico, atribuídos como: *software* e *hardware*, retratados na Figura 5.

Figura 5 – Modelo facilitador da colaboração da produtividade



Fonte: Schuh *et al.,* 2014.

Isto leva a uma categorização de quatro condições principais, que atuam de forma sincronizada para atender os requisitos da automação dos processos de manufatura, destacados como Globalização da Informatização (Tecnologia da Informação), sendo elas a globalização TI, fontes confiáveis, automação e cooperação. Estes quatro elementos servem para formar o sistema CS (Ciber-Físicos) sendo a base da tecnologia da Informação (TI) vinculando o ambiente virtual ao físico, pois tem o seu papel fundamental de importância nas organizações, envolvendo a integração entre humano-humano, máquina-humano e, máquina-máquina (KIEL *et al.*, 2017). Ao longo do tempo este sistema tem sido adotado cada vez mais nas organizações para aumento de produtividade e melhoria na qualidade de produtos, sendo ferramenta facilitadora na interação dos processos de manufatura. Em face a este cenário é possível entender que é uma ferramenta de apoio e agrega valor aos produtos, processos e serviços entregues pelas organizações a seus clientes.

Para melhor identificar o que compõe estes quatro facilitadores no contexto da I4.0, segundo Schuh *et al.* (2014), eles estão destacados, como:

1. **Globalização da TI:** destacado como um fator chave, pois tem sido um impulsionador para o avanço da I4.0, pois a necessidade do aumento da capacidade de armazenamento de dados e sistemas de informações mais ágeis, realizem a troca de informações e acesso do equipamento de forma remota, de forma independente e assim podendo alterar e monitorar dados de processos de produção nas indústrias de manufatura, sendo considerado como nuvem de dados *(cloud)*.

2. **Fontes Confiáveis:** para que possam ser utilizadas ferramentas de decisão, estas precisam estar inseridas ao ambiente do software. Uma vez que estas ferramentas são implementas nos processos de fabricação, ocorre o desenvolvimento simultâneo dos softwares para diversas aplicações dentro do cenário da I4.0, tratadas como ferramentas de simulação digitalização e/ou virtualização, estas ferramentas são capazes de gerenciar o ciclo de vida completo do produto (PLM), ou como por exemplo outras aplicações: sistemas integrados de gestão (ERP), sistemas de acompanhamento e controle de produção (*manufacturing execution system* – MES), entre outros. No entanto apesar destes sistemas serem utilizados dentro do conceito CPS, o diferencial está na integração em tempo real de forma simultânea dentro do ambiente físico-produtivo, ou seja, consiste em um conjunto de soluções, utilizando ferramentas da tecnologia da informação para criar uma espécie de banco de dados de forma colaborativa, permitindo gerenciar todo o processo do ciclo de vida de um produto e também apoio às tomadas de decisão dentro das organizações.
3. **Automação:** Outro facilitador é o trabalho das redes de comunicação e a crescente utilização dentro dos processos de manufatura, pois diante o avanço das tecnologias da I4.0 muitas organizações tem se apoiado no desempenho dos processos autônomos na colaboração em rede, através do ambiente físico conectado aos sistemas virtuais denominados como sistemas ciber-físicos (CPS) que são formados por computadores, sensores, robôs, atuadores, entre outros, em uma plataforma de aplicação (conforme mencionados no item 2, PLM, ERP, MES), onde ocorre a integração da tecnologia da informação com o ambiente industrial. Para melhor elucidar este conceito, podemos analisar a seguinte situação dentro de um ambiente produtivo: uma determinada indústria necessita realizar a programação da produção de computadores, conforme ilustrado na Figura 3.
4. **Cooperação:** O quarto principal facilitador no campo físico é a cooperação entre as tecnologias sem fronteiras tecnológicas. Por exemplo, em Thiokol, um grande fornecedor do programa *Space Shuttle* da NASA, em colaboração as práticas entre diferentes estações de trabalho levam a uma redução de prazo de entrega de 50% para o desenvolvimento de produtos. Uma cooperação mais forte pode ser estabelecida primeiramente cultivando uma rede a fim de comunicar o objetivo geral e, em segundo lugar, pela capacitação de tomadores de decisão em um sistema descentralizado. Essa rede aberta pode ser apoiada estimulando a troca de empregados ou aprovando o uso de informações privadas com dispositivos

> inteligentes. De acordo com uma pesquisa da Accenture, 82% dos entrevistados chineses seriam “mais engenhosos” se eles escolheram seu próprio hardware e software para o trabalho.
>
> Os quatro facilitadores influenciam e dependem um do outro. Por exemplo, o uso de simulações baseadas em big data não é possível sem garantir grandes capacidades de armazenamento. E a automação não estaria funcionando corretamente se não houvesse a cooperação entre máquinas e operadores.
>
> É por isso que, na preparação da Industria 4.0 a simultaneidade é necessária para o desenvolvimento de todos os quatro campos.

Analisando a situação deste ambiente, determinados modelos de produtos são programados em um sistema de produção PCP, caso ocorra a troca de configuração de um dos produtos que estão na linha, e esta alteração não for realizada em tempo real para as etapas seguintes do processo de fabricação, irão ocorrer atrasos ou até mesmo a parada da linha por completo, havendo a necessidade de reorganização da produção. Se em cada produto estiver inserido um código de barras ou etiquetas do tipo RFID, por exemplo, a produção poderá ser alterada via MES ou no ERP (nível de planejamento dos recursos) e todas as etapas subsequentes poderão ser informadas em tempo real para mudança da produção. Além disso, todo o sistema de produção poderá ser armazenado um banco de dados: *cloud,* ou *business inteligence* (BI), para suporte e análises para tomadas de decisão de acordo com a estratégia de cada organização.

Este sistema ainda poderá também realizar a integração horizontal por redes de valor conectados a cadeia de fornecedores de forma automatizada (GILCHRIST, 2016) e assim agregar a integração vertical por sistemas de fabricação em rede através da produção, onde por exemplo, o MES possa trocar informações com máquinas, AGV’s (veículos guiados automaticamente), robôs, entre outros, para garantir entregas *just in time* de forma mais assertiva ou o cliente poderá acompanhar o andamento do seu pedido customizado e solicitar alterações em tempo real à linha de produção (SACOMANO *et al.,* 2018).

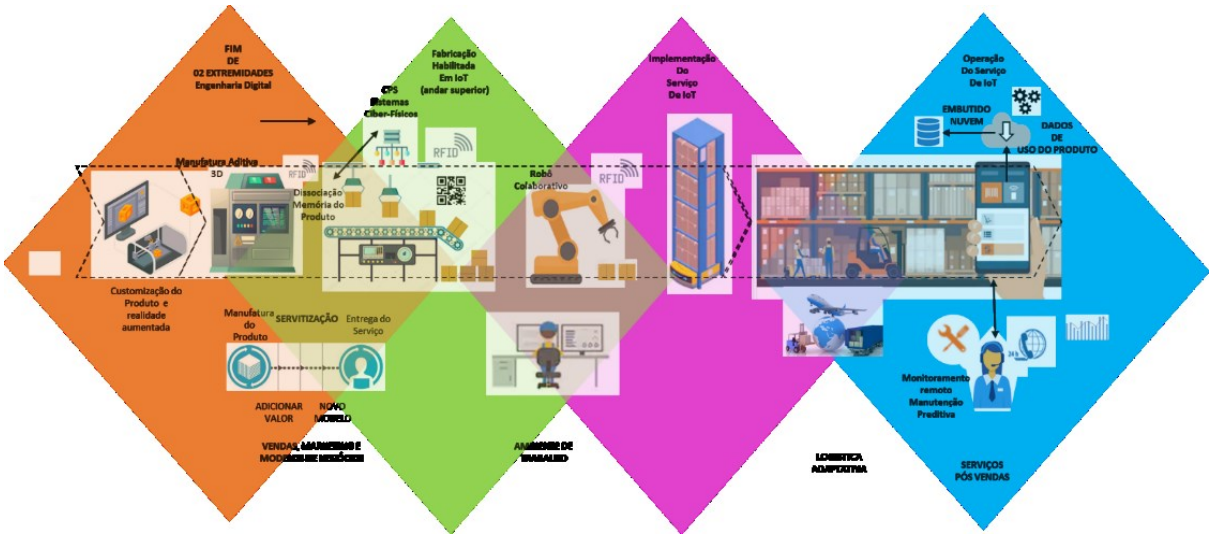
Portanto, conforme ilustrado na Figura 5, para caracterizar o sistema CPS, sistemas convencionais automatizados, se integrados através de funções de comunicação como IoT, por exemplo, terão autonomia no comportamento diante as interferências externas e das configurações que foram armazenadas no sistema (SACOMANO *et al.*, 2018). Isto requer que organizações se adaptem a estes sistemas para que os colaboradores tenham a qualificação

necessária para atuar nas mudanças deste cenário, através de treinamentos e a necessidade de uma melhor organização do trabalho dentro dos pilares do *triple bottom line* (TBL).

Através da integração dos quatro facilitadores da colaboração da produtividade, é necessário haver sinergia entre os quatro elementos, pois uma vez que a ausência de qualquer um deles impossibilita o contínuo desenvolvimento de qualquer outro campo. No entanto, a questão organizacional é a base para a colaboração dentro do contexto do crescimento da produtividade da Indústria 4.0, pois envolve a mão de obra, a interface homem-máquina e a nível máquina – máquina (SCHUH *et al.,* 2014).

Na Figura 6 é possível ilustrar o conceito da Manufatura 4.0 em uma cadeia de valores de uma fábrica no conceito 4.0 em que todo o processo necessita de acompanhamento, consulta e intervenção em diferentes camadas dentro da gestão de operações no nível interno e externo.

Figura 6 – Cadeia de Valores da Indústria 4.0



Fonte: Autor, 2020.

Na aplicação de CPS, a IoT pode ser vista em diferentes cenários visando a integração entre diversos níveis e processos do produto ao consumidor. Este modelo permite o acompanhamento, consulta e intervenção por diferentes níveis da indústria, inclusive externos (fornecedores, clientes e serviços). Um cliente pode acompanhar o ciclo de desenvolvimento de um produto, além disso, obter informações do estado de manutenção de um determinado do produto durante o ciclo de visa em pós-venda através do conceito da realização de um pré-diagnóstico para garantir as condições funcionais de um produto no seu ciclo de vida. Outro aspecto da Manufatura I4.0 é a virtualização de todos os dispositivos e equipamentos agregados na fábrica, possibilitando o controle integral das informações técnicas, históricos remotamente

permitindo, desta forma, uma sólida efetividade entre as áreas de engenharia, manutenção e serviços.

3.1 TECNOLOGIAS EMERGENTES DA INDÚSTRIA 4.0

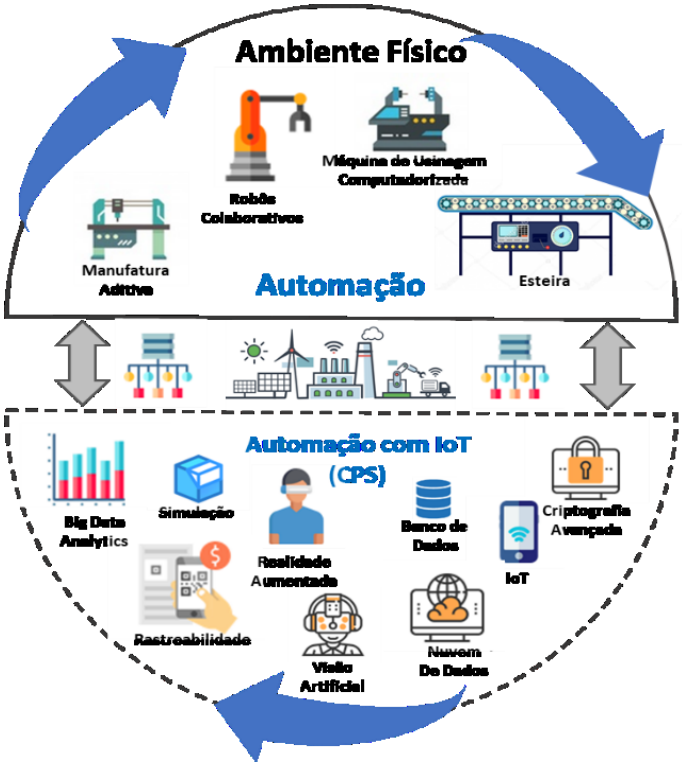
Segundo Sousa *et al.* (2018), a Indústria 4.0 representa uma evolução dos processos industriais anteriormente adotados, desde à mecanização do trabalho (século XVIII) até aos processos de automação. Diante a evolução deste cenário, novas tecnologias foram implementadas com o objetivo de melhorar significativamente a produtividade nas fábricas. Dados são trocados remotamente e tomadas de decisão são realizadas em tempo real. Faceados aos desafios da produção industrial, consumidores procuram produtos cada vez mais customizados e de pequenos lotes, de tal maneira que exigem das indústrias a produção sustentada por tecnologias que possam atender a demanda do mercado e por sua vez passam a ser o atual paradigma da produção não é sustentável (ALKAYA *et al.*, 2015).

Para que os processos industriais possam alcançar a maior flexibilidade e eficiência, baixa utilização de consumo de energia e consequentemente a redução de custos, as organizações necessitam criar estruturas integradas para gerir a necessidade de informações em tempo real, através deste cenário as organizações conseguem obter melhoria no desenvolvimento e na produção dos seus produtos, com a melhoria de relacionamento e no aumento dos lucros, diminuição de custos e desperdícios (SOUSA *et al.*, 2018).

Diversas tecnologias estão sendo implementadas para combinar os processos automatizados através de sistemas ciber-físicos (CPS) para adaptar as crescentes necessidades dos consumidores nos processos de produção com o aumento da eficiência e adaptabilidade dos padrões atuais do mercado. Essa dinâmica pode ser vista como uma transformação digital para que soluções sejam realizadas com o maior número de processos de manufatura em um único sistema automatizado e de forma sustentável (SCHUH *et al.,* 2014).

Este ambiente requer das organizações a mudança do *mindset* dos profissionais da indústria, pois estas tecnologias impactam diretamente no contexto do TBL, melhoram as condições de trabalho onerosos e perigosos com a inserção de robôs industriais e colaborativos, o uso racional de matéria-prima e melhoria na eficiência energética gerando a necessidade das empresas implementarem projetos sustentáveis resultando no aumento da competitividade entre empresas, para isso estas tecnologias são destacadas em nove pilares, conforme destacado na Figura 7 e que implicam diretamente no TBL.

Figura 7 – Ambiente Físico integrado com a camada de automação via IoT



Fonte: Autor, 2020.

a) Robôs

Os robôs aumentaram significativamente no ambiente industrial e tornaram-se cada vez mais colaborativos entre os conceitos homem-máquina. Eles são programados para realizar tarefas onerosas que existem e riscos operacionais em modos manuais de operação. Além dos custos e benefícios, por outro lado, essas forças de trabalho precisam de indústrias para resolver os desafios e oportunidades de implementação dessas tecnologias. Com o avanço dos robôs quanto ao desenvolvimento por meio do uso de sensores e unidades de controle, essas ferramentas não serão apenas utilizadas por humanos, mas também poderão trabalhar em conjunto e até executar tarefas que até então não eram realizadas pela mão de obra humana (GILCHRIST, 2016).

Com o avanço das tecnologias, uma nova inserção nos ambientes produtivos é o robô colaborativo é identificado por serem dotados de dispositivos de segurança que detectam a presença humana no espaço de trabalho em que há a interface homem-máquina, desta forma o robô poderá atuar junto com o operador fora da área de enclausuramento da célula de forma simultânea, porém em velocidades reduzidas considerando que não haverá riscos operacionais durante a interface do operador com o equipamento.

b) Simulação

É uma ferramenta para testar se um processo está funcionando corretamente, detectando defeitos e implementando melhorias por meio de um modelo virtual sem afetar o processo físico. Isso reduz o tempo para desenvolver novos produtos, reduz o número de pausas na introdução de novos processos na linha de produção e melhora a qualidade do produto (BCG, 2015; GILCHRIST, 2016). Com a simulação, as empresas têm a oportunidade de otimizar seus processos de fabricação por meio de um ambiente virtual e podem fazer alterações antes de executar um determinado projeto. Com a simulação em 3D, os fabricantes podem visualizar possíveis alterações nas implementações virtuais, economizando tempo, mão de obra e custos.

c) CPS

Na Indústria 4.0, apareceu o chamado CPS, que foi um termo introduzido pelo Dr. James Truchard em 2006 e definido como a integração do mundo virtual e do mundo físico (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015). Na CPS, é estabelecida uma rede que integra máquinas, sistemas de armazenamento e instalações de produção para que eles possam trocar informações automaticamente. Essa integração ajuda a melhorar todo o processo industrial, incluindo manufatura, engenharia, uso de materiais, cadeia de suprimentos e gerenciamento do ciclo de vida do produto (SHAFIQ *et al.*, 2015).

Consiste na sinergia entre o ambiente virtual e físico, onde dispositivos inteligentes, sensores e atuadores são conectados via IoT, ou seja, trata-se de sistemas computacionais colaborativos, nos quais as operações são realizadas através de dispositivos que tenham a capacidade de comunicação, sendo possível o monitoramento e controle de máquinas, equipamentos através da coleta de informações que são interconectados e colaboram entre si na troca das informações e na realização de tomadas de decisão. Com o uso do CPS requer que as empresas possuam mão de obra altamente qualificada, promovendo colaboração no ambiente industrial. Contudo, os CPS's têm um grande papel para mudar e melhorar as condições humanas, abordando desafios críticos para a nossa sociedade e superando os sistemas automatizados atuais para sistemas inteligente, a partir deste cenário é possível obter melhor segurança aos processos operacionais, desempenho, eficiência, confiabilidade, usabilidade e muitas outras questões.

d) IoT

O termo Internet das Coisas foi criado e promovido pelo MIT Auto-ID Center em 1999 e mais tarde foi divulgado por Kevin Ashton em 2002 sob o título "Internet of Things" (BERGWEILER, 2015). Com o desenvolvimento da tecnologia da informação e comunicação, os objetos terão a capacidade de se comunicar entre si (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). A IoT inclui os dispositivos de identificação por radiofrequência (RFID), sensores, atuadores, telefones móveis, GPS (Global Positioning Systems) e vários outros objetos, os quais são capazes de se conectar à internet através de um protocolo padrão, para trocar informações e se comunicarem entre si, realizando assim a identificação, localização, rastreamento, monitoramento e gerenciamento de forma inteligente (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015). A IoT trata-se uma solução com o objetivo de buscar a eficiência operacional e obter a resolução a partir de práticas reais dentro de um ambiente produtivo. É considerado um elo entre *software* a rede de objetos físicos como equipamentos e sensores que são estendidas as redes de comunicação dentro do ambiente organizacional com o objetivo de conectar e trocar dados o tempo todo.

Há um crescimento exponencial da IoT em função da necessidade de armazenamento de dados devido ao aumento da capacidade do armazenamento local expandindo os serviços de armazenamento, através da nuvem (*cloud*) que está diretamente ligado à virtualização dos processos. Todos os dados gerados promovem a necessidade da inserção do *big data* no controle de gerenciamento operacional para auxiliar as organizações a manterem uma vantagem competitiva e melhorando a eficiência produtiva, consequentemente estimulam a capacidade de provedores de serviços de informação em grandes análises de dados o *big data analytics*. Sendo assim, esta variedade de informações diárias obrigam as organizações a implementar segurança quanto a transferências das informações, devido a necessidade de manterem a confidencialidade, integridade e a disponibilidade dos dados de forma segura com a segurança cibernética ou criptografia avançada.

e) Segurança Cibernética

A partir da necessidade da I4.0 quanto a coleta de dados e a rapidez na troca das informações através da nuvem, a segurança deste sistema deve ser considerada principalmente para lidar com os riscos derivados do ciber-espaço. É considerado que os sistemas ciber-físicos possuem área de ataque muito ampla, pois diversos

pontos são interligados e aumenta consideravelmente o conjunto de vulnerabilidades que podem ser exploradas por qualquer agente malicioso.

A conectividade das plantas industriais com o ambiente externo podem haver diversas falhas de segurança. Em virtude desta exposição as fábricas inteligentes podem receber ataques externos, comprometendo a programação da produção, ataque as pessoas nos processos produtivos e interromper completamente os serviços.

As organizações com o intuito de mitigar os riscos inerentes ao ataque cibernético, alavancam iniciativas para o planejamento da segurança com a gestão de riscos, tais como: controle de acessos, backup das informações, atualizações de sistemas, conscientização das equipes e entre outras atividades que assegurem todo o sistema. No entanto, não é somente isso que deve ser levado em consideração, mas diversos outros fatores para assegurar a rede corporativa que ofereçam a visibilidade necessária somente aos stakeholders da organização quanto ao ambiente da fábrica inteligente.

f) Nuvem (*cloud)*

De acordo com Haji (2020), o conceito de nuvem é o recurso que promove o subsídio necessário para alavancar benefícios quanto o armazenamento das informações em tempo real de vários locais e de forma interativa entre equipamentos e os sistemas de comunicação do ambiente da I4.0 de forma constante.

Considerando o sistema ciber-físico conectados aos processos automatizados oriundos da terceira revolução industrial, a inteligência dos processos gerados por esta integração forçam as organizações inovarem em torno de cada novo processo implementado, pois dados são disponibilizados e podem ser processados para alavancar benefícios através da interface entre o *software* e *hardware*, como ERP (gestão empresarial integrada), CRM (gestão de relacionamento com o cliente), SRM (gestão do relacionamento com fornecedores, SCM (gestão da cadeia de suprimentos), PLM (gestão do desenvolvimento colaborativo de produtos), *e-procurement* (compra de materiais diretos), *e-sourcing* (compra de materiais diretos), *workflow* (sistema de automação dos processos) e entre outras ferramentas que vem surgindo com o avanço da I4.0 (SACOMANO *et al.*, 2018).

g) Manufatura aditiva

De acordo com Marques (2014), a manufatura aditiva tem sido inserida nas organizações desde meados de 1980. Através do conjunto de tecnologias que consiste na fabricação de produtos com a impressão 3D (Computing Aided Design ou CAD), onde sobre a matéria-prima é adicionado camada sobre camada de material originando o objeto proposto desde a abordagem do construtivo do produto. A manufatura aditiva resume-se na produção de um determinado produto através da troca de informações de forma remota, podendo ser ilimitada quanto as aplicações, principalmente para a pré-produção de produtos.

h) Realidade Aumentada

É uma ferramenta para aumentar o campo de visão do usuário através das informações necessárias para executar uma tarefa específica. Os recursos incluem: a capacidade de combinar objetos reais e virtuais, a interação em tempo real e a capacidade de usar objetos 3D (SYBERFELDT; DANIELSSON; GUSTAVSSON, 2017). Na fabricação, a realidade aumentada pode ser aplicada ao planejamento de linhas e processos de montagem e fornece orientação visual para operadores e técnicos durante o processo. Durante a manutenção, a tecnologia da realidade aumentada permite que instruções e informações sejam exibidas diretamente onde a tarefa está sendo executada, tornando as operações mais rápidas, seguras e com confiabilidade. Fornece relatórios em tempo real, treinamento e visualização de demonstrações de produtos dentro dos processos (KLIMANT; KOLLATSCH; SCHUMANN, 2017).

i) Big Data Analytics

Durante o processo de fabricação, vários microprocessadores são instalados na máquina para capturar dados de produção e gerar conjuntos de dados complexos, e as técnicas tradicionais de processamento de dados não podem gerenciar e analisar todas essas informações sem o uso deste recurso. De tal forma que a tecnologia big data utiliza-se de sistemas e métodos para processar de maneira eficiente, rápida e confiável todos os dados das mais diversas fontes. As principais vantagens dessa tecnologia são: otimização do processo, precisão da decisão, redução de custos e melhoria da eficiência operacional do processo (KANG *et al.*, 2016; ZHOU; LIU; ZHOU, 2015).

3.2 PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0

Numa tentativa de sistematizar o conceito de indústria 4.0 e, sobretudo, ser capaz identificá-lo como fenômeno dentro da manufatura, os autores Hermann et al. (2016) definiram seis princípios observados pelas organizações que implementam tecnologias da indústria 4.0.

a) Integração Vertical: Integra sensores e atuadores em diferentes níveis, até atingir o nível de planejamento de recursos (ERP). Essa integração torna a produção mais flexível e reconfigurável, permitindo que a empresa responda de forma ágil e efetiva, diante diferentes variáveis como níveis de demanda, níveis de estoque, defeitos de máquinas e imprevistos de produção (GILCHRIST, 2016). Segundo Wang *et al.* (2015), é uma organização que pode vincular vários sistemas de gerenciamento de produção, manufatura e planejamento corporativo.
b) Integração Horizontal: É incomum diferentes empresas estarem interconectadas entre si, ou seja, não há a integração entre fornecedores e clientes (SANDENGEN *et al.*, 2016). A Integração horizontal refere-se à integração de toda a cadeia de fornecedores, na qual informações e dados podem ser utilizados em toda a cadeia de suprimentos, obtendo assim uma cadeia de valor integrada e automatizada (GILCHRIST, 2016). Por meio desse modelo integrado, novas redes de valor e modelos de negócios podem ser gerados (WANG *et al.*, 2015).
c) Interoperabilidade: É dado devido a condição em que todos os elementos, como dispositivos e sistemas de manufatura possam se conectar, comunicar e operar de forma autônoma, inteligente, integrando todos os recursos associados ao uso da tecnologia a ser empregada, através da Internet das Coisas (IoT), incluindo pessoas, fábricas e tecnologias inteligentes (GILCHRIST, 2016). O sucesso desse recurso está no estabelecimento de modelos de comunicação entre vários sistemas físicos cibernéticos de diferentes fabricantes (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).
d) Virtualização: Os sistemas ciber-físicos devem monitorar os recursos de processos e máquinas dentro da empresa. Os dados obtidos pelos sensores estão vinculados aos modelos da fábrica virtual e da fábrica de simulação, criando assim uma reprodução do mundo físico (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). Portanto, toda a cadeia de profissionais que trabalham no desenvolvimento e na implementação da solução do projeto, tem a capacidade em tempo real de realizarem mudanças e melhorias dentro do processo, sem interferências físicas junto ao equipamento

(GILCHRIST, 2016).

e) Descentralização: Diante o crescente aumento do mercado consumidor na obtenção de produtos customizados, as empresas têm encontrado dificuldades para que possam monitorar e controlar seus sistemas de manufatura. Sendo assim, diante o advento da I4.0, estão sendo criados aplicações em diferentes camadas de integração para que estes sistemas atuem de forma independente. Através das etiquetas de RFID (identificação por radiofrequência) é possível monitorar a fabricação de um determinado produto desde a primeira parte do processo, obtendo todo o histórico do processo de manufatura em qualquer parte do sistema, havendo a comunicação entre produtos, máquinas e dispositivos. As etapas a serem seguidas dentro do processo de fabricação podem ser executadas de forma isolada, sem a necessidade de replanejar o produto dentro da linha de produção e o controle descentralizados atuando de forma independente de acordo com a tomada de decisão atribuída a mudança do processo de forma remota (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015

f) Modularidade: Com a definição da Indústria 4.0, a indústria precisa ter flexibilidade na fabricação do produto quanto as suas características seja de forma isolada ou, diante a demanda produtiva em produções de um produto em larga escala, por exemplo, para se adaptar facilmente às mudanças nas características do produto, a sazonalidade e as mudanças quanto a demanda do produto dentro do processo produtivo (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). Por meio de uma linha de produção mais flexível e personalizada (modularidade), ela pode ser substituída, expandida ou implementada sem afetar todo o sistema de produção (GILCHRIST, 2016).

g) Monitoramento em tempo real: Os sistemas ciber-físicos devem monitorar os recursos de processos e máquinas dentro da empresa. Os dados obtidos pelos sensores estão vinculados aos modelos da fábrica virtual e da fábrica de simulação, criando assim uma cópia do mundo físico (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). Portanto, engenheiros e planejadores podem personalizar, alterar e testar alterações ou melhorias isoladamente, sem interferir no processo físico (GILCHRIST, 2016).

h) Internet de Serviços: Apesar da inclusão de produtos, a Indústria 4.0 também pode criar serviços por meio da Internet de serviço (IoS), provendo diversos benefícios nos setores industriais tanto internamente quanto na externalidade das organizações em que empresas e indústrias tenham mais eficiência e confiabilidade nas operações (GILCHRIST, 2016).

Há um crescente interesse da comunidade acadêmica e organizações em analisar o contexto da sustentabilidade na I4.0, pois de acordo com Kiel *et al.* (2017), impulsiona a inovação resultando oportunidades em empresas de manufatura nos modelos de negócios (Quadro 4).

Segundo Lasi *et al.* (2014), a Indústria 4.0 visa criar oportunidades de negócios sustentáveis, encurtando o tempo de entrega para o mercado, com o aumento da produtividade e a utilização do uso dos recursos de forma eficiente. Cria externalidades positivas, pois incentiva a segurança e práticas organizacionais sustentáveis fora da organização quanto ao uso na adoção destas tecnologias (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016).

Quadro 4 – Os efeitos da Indústria 4.0 sobre os principais elementos das empresas de Manufatura

Criação de Valor	**Valor da Oferta**	**Captura do Valor**
Produção de Equipamentos	**Produtos**	**Grupos de Clientes**
- Aumento da Produtividade; - Economia de Energia; - Balanceamento de carga - Maior resistência a falhas do equipamento; - Acesso rápido aos dados de fabricação - Monitoramento da integridade da máquina; - Acesso rápido aos dados de fabricação; - Monitoramento da integridade da máquina; - Produção autocontrolada; - Maior produção interna; - Menor estoque; - Manutenção de produção mais fácil; Modernização de máquinas mais antigas e novos equipamentos.	- Maior espectro de Produtos; - Menor Manutenção sobre os produtos; - Produtos Versáteis e Flexíveis (principalmente máquinas); - Maior qualidade da produção dos equipamentos fabricados; - Inserção de dados de fabricação nos produtos e sistemas de gerenciamento de produção; - Produtos adaptados às demandas dos clientes; - Interface Homem-Máquina.	- Novos grupos de clientes abordados na base dos clientes B2B; - Ambos riscos e oportunidades é intensificada quanto a retenção dos clientes
Mão de Obra	**Serviços**	**Interação com o cliente**
- Atenuação da escassez de empregos na fabricação, mas provavelmente escassez de pessoal qualificado quanto ao cenário da Indústria 4.0; - Melhor integração entre os colaboradores menos qualificados e idosos; - Novos perfis de trabalho; - Novos locais de trabalho; - Necessário maior conhecimento técnico e treinamentos de funcionários; - Treinamentos de acordo com a base tecnológica; - Suporte no reconhecimento de falhas; - Diminuição do número de trabalhos de fabricação;	- Serviços de retromontagem de máquinas - Monitoramento de condição - Manutenção remota - Serviços de digitalização para clientes - Serviços de análise de dados Manufaturas e simulações de produtos - Desenvolvimento virtual de produtos - Serviços de engenharia e configuração de produtos	- Contato do cliente através de plataformas digitais; - Interação facilitada por meio da comunicação digital; - Co-design e co-engenharia; - Maior transparência de custos; - Tomada de decisão conjunta; - Integração da cadeia de valor dos clientes; - Os fornecedores se tornam mais transparentes para os clientes - Diminuição da lealdade do cliente devido ao alto anonimato.
Parcerias e Fornecedores		**Interação com o cliente**
- Maior conectividade entre empresas; - Co-design das ofertas de valor; - Análise conjunta de dados; - Maior transparência das informações; - Maior confiabilidade na entrega; - Parcerias inovadoras; - Maior contato virtual; - Maior padronização necessária;		- Contabilidade digital e faturas automatizadas; - Maior confiabilidade de pagamento - Documentação de pagamento simplificada; - Aumento dos modelos de assinatura, pagamento por uso e pagamento por recurso;

Fonte: Kiel *et al.*, 2017.

Vários autores têm investigado os impactos negativos da I4.0. De acordo com Waibel *et al.* (2017) sob o ponto de vista ambiental, ao implementar o uso destas tecnologias, elas irão demandar uma maior utilização de dispositivos e displays, baterias, processadores que os tornam descartáveis, trazendo uma dificuldade para logística reversa quanto a reutilização destes componentes, gerando um desequilíbrio ambiental. Além disso, sobre o ponto de vista social, as atividades no trabalho se tornarão automatizadas e de pouca intervenção humana, uma vez que máquinas e ou equipamentos serão capazes de gerar tomadas de decisão, reduzindo a força de trabalho.

Sobre o estudo realizado por Kiel *et al.* (2017), descrito no Quadro 5, buscou-se resumir quais aspectos de sustentabilidade estavam inseridos no TBL. O autor usou como análise a tecnologia habilitadora: IoT (*Internet Industrial of Things),* sendo possível mapear a tendência de abordagem encontrada na literatura dos aspectos de cada item do TBL.

Quadro 5 – Literatura existente que trata dos aspectos de sustentabilidade da IoT

Dimensão do TBL	Breve Visão Geral dos aspectos relevantes	Literatura Encontrada
Econômica	• Maior transparência de custos	Amshoff *et al.* (2015)
	• Maior eficiência, flexibilidade	Arnold *et al.* (2016)
	• personalização e qualidade	Hofmann and Rüsch (2017)
	• Prazos de entrega mais curtos	Kagermann, Wahlster e Helbig (2013)
	• Novos modelos de negócios	Oesterreich and Teuteberg (2016)
	• Grandes investimentos necessários	Peukert *et al.* (2015)
	• Rentabilidade incerta	Schuhmacher and Hummel (2016)
	• Demanda incerta do cliente	Stock and Seliger (2016) Zhou *et al.* (2017)
Ecológica	• Transparência das emissões de gases de efeito estufa	Gabriel and Pessel (2016) Herrmann *et al.* (2014)
	• Maior eficiência de recursos e energia	Müller *et al.* (2017) Qiu *et al.* (2015)
	• Redução de resíduos	Sarkis and Zhu (2017)
	• Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização	Stock and Seliger (2016)
	• Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas	
Social	• Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários	Gabriel and Pessel (2016); Herrmann *et al.* (2014);
	• Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos	Stock and Seliger (2016); Tesch *et al.* (2017)
	• Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir	
	• Transformação organizacional necessária	
	• Rede, ambiente e política influenciam a adoção da IIoT	

Fonte: Kiel *et al.*, 2017.

Ainda com a visão de Kiel *et al.* (2017), visto a utilização do IoT foram elaborados os cinco desafios destacados no Quadro 6 fornecendo uma visão sobre os impactos e benefícios quanto a seu uso desta tecnologia que é um dos propulsores para iniciativas da I4.0 dentro das organizações.

Quadro 6 – Desafios da I4.0

Desafios	Breve Explanação
Integração Técnica	• Implementação de infraestrutura moderna de TI para empresas
	• Integração de comunicação padronizada e abrangente do setor protocolos para interfaces de dados
	• A implementação de tecnologias imaturas ameaça a qualidade do produto e do processo, bem como a robustez da produção
Transformação Organizacional	• Criação de uma cultura corporativa e estrutura hierárquica adaptável e flexível
	• Envolvimento da alta gerência e persuasão das partes interessadas internas da empresa, por exemplo, departamentos interdisciplinares e funcionários de todos os níveis hierárquicos
	• A comunicação interdisciplinar requer uma consistente compreensão semântica da IoT
Segurança de Dados	• Segurança de dados e informações em relação a conexão horizontal entre cadeias de valor
	• Acesso inseguro a dados predispõe empresas a crimes cibernéticos e espionagem industrial
Competitividade	• Aumentar a dinâmica competitiva e mudar a competitividade ambientes
	• Mudança no equilíbrio do mercado devido a novas áreas de negócios e concentração da indústria na IoT
	• A mudança dos limites da indústria facilita a entrada no mercado de concorrentes novos para Indústria
Cooperação	• A conexão em toda a cadeia de valor requer abertura, cooperação entre empresas, confiança e tecnologias compatíveis
	• Estreitamento na criação de valor entre clientes e fornecedores
Viabilidade Futura	• Ameaça da viabilidade futura devido à falta de tecnologia
	• Tendências do IoT em seguir padrões errados
Recursos Financeiros & Lucratividade	• Altos investimentos em desenvolvimento de tecnologia, trabalhadores qualificados e segurança de dados
	• A incerteza sobre a Lucratividade da implementação da IoT dentro das organizações
Recursos Humanos	• Qualificação de funcionários para planejamento de processos responsabilidades de coordenação requer treinamento adequado quanto as abordagens de desenvolvimento
	• Lealdade dos funcionários a longo prazo no contexto escassez de mão de obra qualificada
Orientação ao cliente	• Compreensão dos requisitos específicos do cliente devido a aumentando a colaboração e o envolvimento
	• Conversão da demanda do cliente em soluções eficazes compreendendo combinações modulares de hardware e software

Fonte: Kiel *et al.* 2017.

4 SUSTENTABILIDADE

Tem havido um crescimento exponencial quanto ao interesse de muitas organizações e seus *stakeholders* quanto a avaliação do conceito de sustentabilidade em diferentes esferas, tanto organizacionais quanto públicas (OZANNE *et al.*, 2016). O conceito de Sustentabilidade foi instituído em 1987, pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU. A partir deste período houve um grande progresso quanto à conscientização da sociedade e das organizações em relação aos impactos negativos gerados pelos ambientes industriais, sob o ponto de vista da sustentabilidade. Pode-se observar que, através desta abordagem, houve diversas iniciativas sociais corporativas, ou seja, manufaturar sem que afetasse as três dimensões: o lucro, as pessoas e o planeta, representando respectivamente o aspecto econômico, social e ambiental.

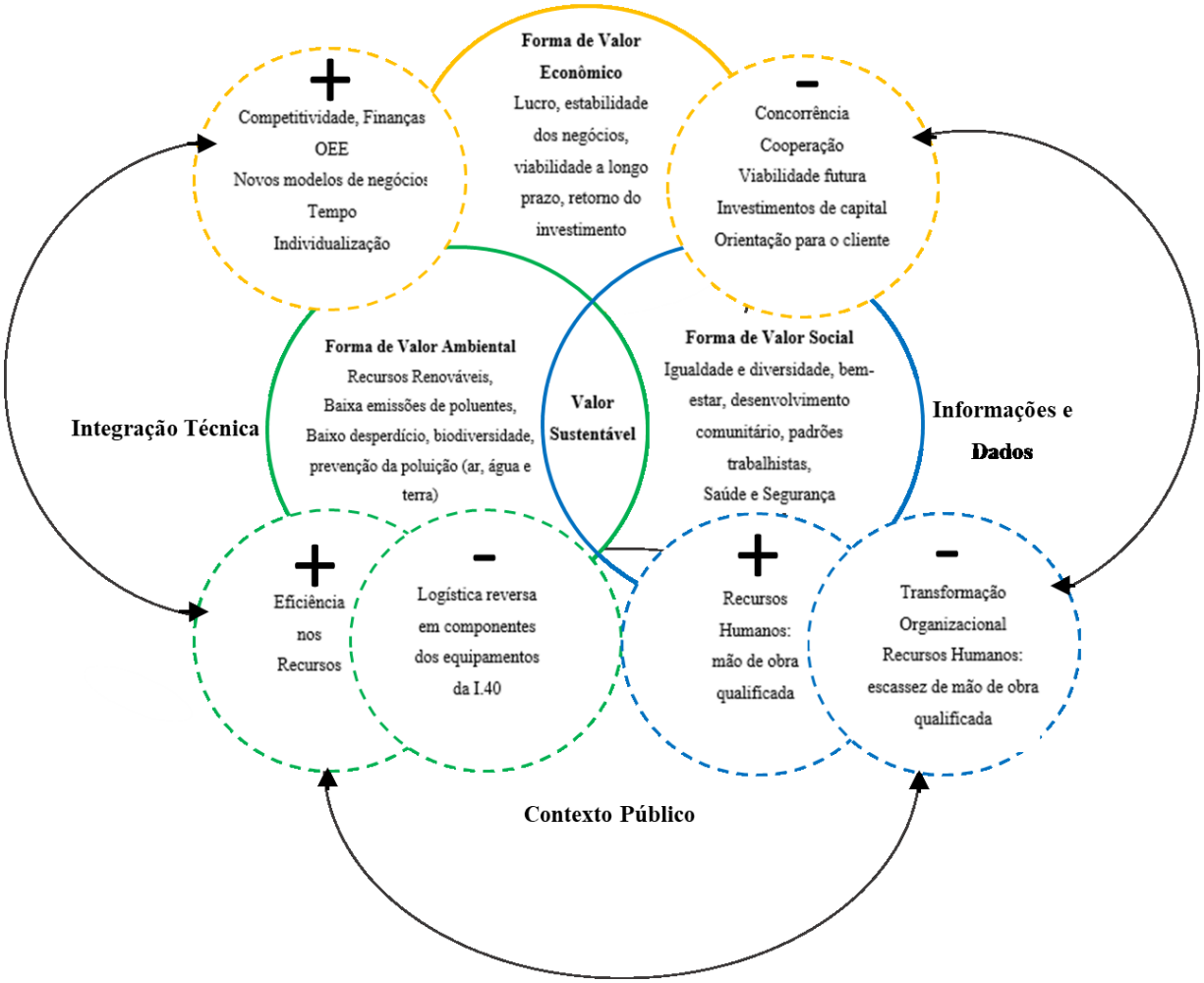
Em 2018, através da mesma comissão foi apresentado um modelo de desenvolvimento que permite atender às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade de projetos futuros diante as necessidades existentes, ou seja, compreende-se que, com o aumento da demanda da inserção de tecnologias é necessário que se mantenha os recursos renováveis, tais como: a baixa emissão de poluentes, a diminuição do desperdício, mantendo a biodiversidade, prevenindo a poluição de fontes naturais de recursos, tais como: ar, água e terra.

De acordo com Evans *et al.* (2017), a sustentabilidade trata é um conceito multidimensional capaz de abranger três dimensões, sendo elas: ambiental, social e econômica, denominado como *Triple Bottom Line* (TBL), conforme apresentado na Figura 8, pois ilustra uma visão holística que integra formas de valor sustentável para as organizações.

A dimensão ambiental do TBL concentra-se na compatibilidade entre a tendência do uso e renovação de recursos naturais. Referindo-se às organizações, esta dimensão é identificada pelos processos de consumo das fontes de recursos naturais, assim como das emissões que poderão ser absorvidas naturalmente pelo ecossistema existente. Esta dimensão é alcançável através da reciclagem e regeneração de recursos, releiaute de processos e produtos para minimizar o uso de recursos, a adoção de modelos de economia circular (BRACCINI; MARGHERITA, 2018).

Segundo Dyllick e Hockerts (2002), a dimensão social do TBL refere-se a um comportamento das organizações em realizar a preservação e o desenvolvimento do capital humano e social das comunidades criando valor. Para os autores, a sustentabilidade social tem como objetivo integrar aspectos como satisfação no trabalho, qualidade de vida, integração social entre comunidades, solidariedade, equidade e justiça na distribuição de bens e serviços.

Figura 8 – O triple bottom line (TBL)



Fonte: Autor, 2020.

A dimensão econômica do TBL refere-se à atitude organizacional para criar valor e equilibrar custos e receitas na produção e distribuição de bens e serviços. A dimensão econômica do TBL diz respeito às dimensões do desempenho econômico e financeiro das organizações (BRACCINI; MARGHERITA, 2018).

Essas três dimensões interagem, se sobrepõem e, às vezes, entram em conflito. Por exemplo, a sustentabilidade ambiental pode ser prejudicial para a sustentabilidade econômica devido aos investimentos necessários para processos de produção mais limpos. No entanto, as organizações precisam agir de forma holística para terem sucesso nas três dimensões (BRACCINI; MARGHERITA, 2018).

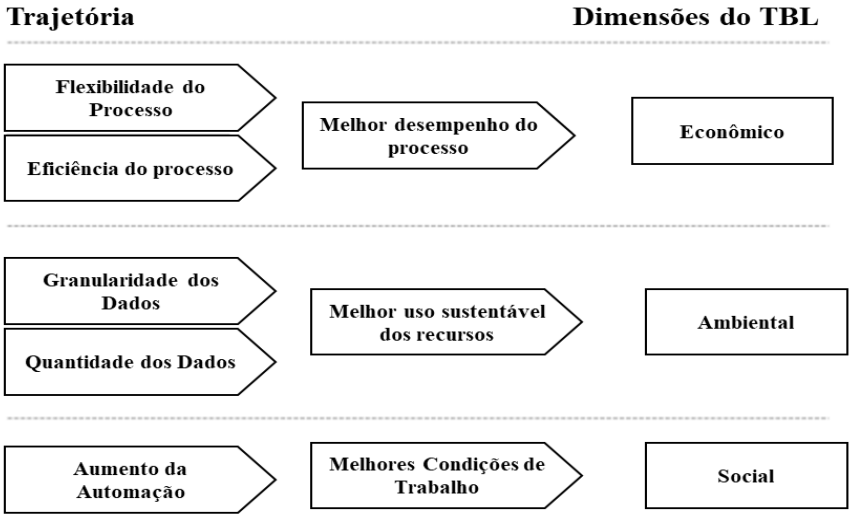
Ao se aplicar modelos de gestão organizacional aplicados ao conceito de sustentabilidade, será possível atingir melhoria na qualidade de vida das pessoas e minimizar os impactos ambientais que são gerados pelas organizações. Quando uma organização se propõe a trabalhar em prol das três dimensões: ambiental, econômico e social é considerado

uma gestão integrada, capaz de atingir melhoria nos indicadores quando se há a integração das três dimensões (EKINS *et al.*, 2003).

Cada dimensão representa uma condição necessária, mas não suficiente para alcançar a sustentabilidade: quando as organizações não suportam uma dessas dimensões, elas não são sustentáveis. Embora as organizações busquem, em sua maioria, ter sinergias entre as formas ambientais e econômicas da sustentabilidade, há grandes esforços sendo realizados para lidar com os conflitos nas três dimensões do TBL (BRACCINI; MARGHERITA, 2018).

De acordo com Braccini e Margherita (2018), ilustrado na Figura 9, as três dimensões do TBL se interagem na adoção da I4.0 através das trajetórias individuais (ambiental, econômica e social). Quanto a dimensão econômica, é possível observar a melhor eficiência e flexibilidade de um determinado processo de fabricação, como por exemplo a implementação de robôs conectados com qualquer sistema de gerenciamento de produção em que as organizações podem melhorar o seu desempenho na qualidade e quanto a lucratividade do negócio na diminuição de perdas produtivas.

Figura 9 – Trajetórias da Sustentabilidade da I4.0 exploradas na literatura



Fonte: Braccini e Margherita, 2018.

Na dimensão ambiental é possível obter o melhor uso dos recursos quanto a granularidade e a quantidade dos dados produzidos ao atribuir o uso das tecnologias digitais, pois obtém-se o melhor aproveitamento do uso sustentável dos recursos, ou seja quanto maior o nível de granularidade, utilizam-se mais da camada de *software* e, consequentemente, o menor uso de *hardwares* como a disponibilidade de muitos servidores para tratamento das informações permitindo o uso de forma sustentável dos recursos. De tal forma, isto requer que quanto aos

componentes de *hardwares,* que eles tenham maior robustez e maior capacidade do gerenciamento dos dados.

Com a trajetória social e o avanço da automação com a associação das tecnologias emergentes da I4.0 criam-se melhores condições de trabalho dentro das organizações em contrapartida há uma necessidade de que as organizações criem uma estrutura organizacional para readequar a mão de obra existente requalificando-as ou buscando novos profissionais no mercado.

De acordo com Palma *et al.* (2017), foi realizado um levantamento dos principais autores no Quadro 7, correlacionando o impacto da sustentabilidade quanto ao TBL.

Quadro 7 – As principais abordagens observadas pelos autores no contexto da I4.0

Tópico	Exemplos de Impacto da I.4.0 na sustentabilidade	Observação
a	Aumento médio de eficiência dos recursos de 3,3 % a.a. em todos os setores da Indústria (PWC, 2015)	Eficiência na utilização de recursos
b	A produção de peças sobressalentes, usando impressão 3D, reduz as práticas logísticas e o impacto ambiental através da economia de energia e dos combustíveis utilizados para o transporte e distribuição das peças e economia de material (GERLITZ, 2015)	Economia de combustíveis e recursos em geral
c	O desempenho da eficiência social é sustentado pela geração e exploração de serviços, tais como: digitalização e inovação aberta em casos de integração de design em processos de desenvolvimento (GERLITZ, 2015)	Desempenho da eficiência e igualdade social, trabalho etc.
d	O design como ferramenta e processo pode agilizar o desempenho das cadeias de fornecimento e de valor, reduzir as interações logísticas e tornar as atividades adicionais redundantes, com implicações positivas para o ambiente, garantindo ao mesmo tempo a eficiência social e ambiental de uma empresa (GERLITZ, 2015)	Interação logística e eficiência social e ambiental
e	A I.4.0 irá direcionar e resolver alguns desafios mundiais atuais, tais como, recursos e eficiência energética, produção urbana e mudança demográfica (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013)	Recursos e eficiência energética, produção urbana e mudança no hábito da população, tais como menos lixo e mais reciclagem
f	A I.4.0 permite que o trabalho seja organizado de tal forma que considere as mudanças demográficas e fatores sociais. Sistemas de assistência inteligentes da I.4.0 liberarão os trabalhadores de executarem tarefas rotineiras, permitindo-os focar em atividades criativas e de valor agregado (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013)	Emprego e qualidade do trabalho

Fonte: Palma *et al.,* 2017.

O Quadro 8 relaciona os princípios da I4.0. O positivo (+) trata-se de beneficiar à sustentabilidade (TBL) e o impacto negativo (-) é tratado como o princípio que não beneficia o desenvolvimento sustentável nas organizações. É possível observar que existem desafios

relacionados a mão de obra humana quanto ao pilar social, pois os processos passam a ter funcionalidade de forma autônoma. Além disso, implicam sobre a necessidade de mão de obra qualificada para se tornarem desenvolvedores destes processos.

Quadro 8 – Correlação entre os princípios da I4.0 e os impactos da sustentabilidade da cadeia de valor empresarial

Tópico	**Princípios da I4.0**	**a**	**b**	**c**	**d**	**e**	**f**
a	Integração Vertical	+	+	-	+	+	-
b	Integração Horizontal	+	+	-	+	+	-
c	Interoperabilidade	+	+	+	+	+	+
d	Virtualização	+	+	+	+	+	+
e	Descentralização	+	+	+	+	+	-
f	Modularidade	+	+	-	+	+	+
g	Operação em tempo real	+	+	+	+	+	+
h	Orientação a Serviços	+	+	+	+	+	+

Fonte: Autor "adaptado de" Palma *et al.,* 2017.

Em se tratando do TBL, as organizações que não mantiverem sua rentabilidade econômica deixam de ser competitivas, pois é necessário visar a produtividade e o retorno de capital, sendo eficiente e, ao mesmo tempo, criando valor, pois o recurso que for utilizado de maneira sustentável poderá ser absorvido pelo ecossistema e trazer resultados benéficos, como exemplo, fontes de energia renováveis.

Segundo Ozanne *et al.* (2016), há uma grande dificuldade em realizar uma investigação com relação a interdependência das três dimensões, pois combina dados diferentes de forma qualitativa e quantitativa, ou seja, dados com diferentes níveis de análise de observabilidade e transparência sob a perspectiva interna e externa dentro das organizações. Para Kiel *et al.* (2017), o TBL não é claro quanto à combinação dos objetivos parcialmente conflitantes quanto ao sucesso econômico e o equilíbrio ecológico dentro das organizações, além disso, carece de estudos de forma abrangente e integradora de como a adoção das tecnologias habilitadoras da I4.0 e seus desafios, venham contribuir com os indicadores da sustentabilidade (TBL) nos processos produtivos, pois uma abordagem integrativa e holística em relação a sustentabilidade se faz necessário na gestão da tecnologia e da inovação.

Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) também indicam a necessidade de grandes investimentos e rentabilidade incerta quanto a adoção das tecnologias da I4.0, justificando a

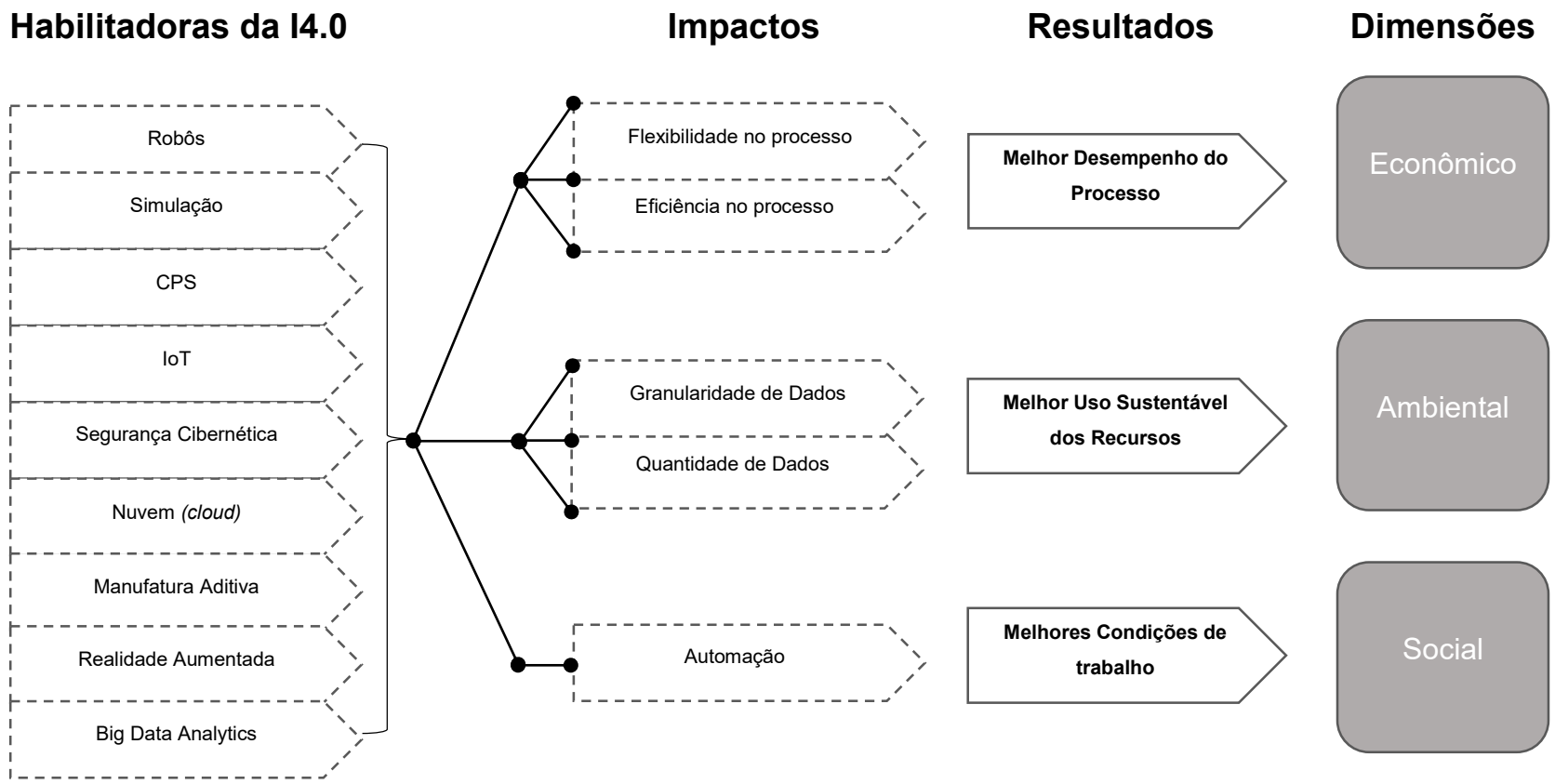
necessidade de analisar o contexto da implementação quanto ao uso, avaliando como estas tecnologias possam melhorar os indicadores da sustentabilidade (TBL).

No entanto, há ainda um grande debate dentro das organizações quanto ao aumento de mão de obra ou a diminuição dos empregos, uma vez que há a necessidade de inserir profissionais qualificados nas organizações, gerando problemas sociais, uma vez que perfis de trabalho precisam acompanhar as mudanças deste cenário (KIEL *et al.*, 2017).

Com base nessa revisão bibliográfica, foi construído o modelo analítico teórico (Figura 10).

A Figura 10 foi construída baseando-se no pressuposto de que a adoção das tecnologias habilitadoras da I4.0 irão causar impactos em termos de flexibilidade e eficiência nos processos, granularidade, quantidade de dados e automação. Esses impactos, por sua vez, trazem resultados como melhor desempenho dos processos de manufatura, melhor uso sustentável dos recursos e melhores condições de trabalho. Embora é sabido que os impactos têm relação direta no Triple Botton Line (TBL), optou-se por dividir, para fins acadêmicos, esses impactos nos âmbitos: econômico, ambiental e social.

Figura 10 – Modelo Analítico Teórico sobre as trajetórias da Sustentabilidade



Fonte: Autor, 2020.

5 INDICADORES DA SUSTENTABILIDADE E MÉTODOS DE ANÁLISE PARA AVALIAÇÃO

Para se definir performance de uma determinada organização é necessário que sejam avaliados todos os indicadores e, que eles não sejam tratados de forma isolada. De tal forma, é necessário identificar o grupo de indicadores de cada organização para que se obtenha uma visão abrangente sobre o conceito de sustentabilidade e como os critérios são avaliados, pois são ferramentas imprescindíveis para mensurar o progresso ao longo do tempo, indicar os problemas para melhor obtenção de resultados e problemas oriundos do passado para que possam ser ajustados (TAN *et al.*, 2015).

De acordo com Schules e Cleto (2017) que realizaram uma revisão da literatura sobre os 24 modelos de avaliação, foi realizado uma síntese conforme o Quadro 9 apresentando a finalidade de cada modelo.

Quadro 9 – Modelos de avaliação de sustentabilidade e sua finalidade

Modelo	Abreviação	Ano	Origem	Finalidade
Global Report Initiative	GRI	1997	UNEP *(United Nations Environment Programme* e CERES *(Coalition for Environmentally Responsible Economics)*	Composto por mais de 70 indicadores é utilizado para conceituar o TBL: ambiental, econômico e social. Sendo um dos modelos mundialmente mais utilizados. Não existe uma sapiência tão clara e definida de como utilizá-lo dentro das organizações, tornando-o de difícil análise sobre alguns dos indicadores a serem avaliados.
Barometer of Sustainability	BS	1997	IUCN *(World Conservation Union)* e IDRC *(International Development Researt Centre)*	Trata-se de um modelo bidimensional que mensura as dimensões ambientais e sociais em uma única matriz para que possa proporcionar aos avaliadores a percepção sobre as questões do meio ambiente decorrentes das necessidades humanas. Necessita passar por uma adaptação para que possa ser aplicado dentro das organizações. E não mensura a dimensão econômica.
Composite Sustainable Development Index	ICSD	2005	Krajnc e Glavic	Elaborado por Krajnc e Glavic tem como objetivo avaliar os três pilares da sustentabilidade
Coral	PE	2002	Eliza Coral	Visa proporcionar as organizações uma ferramenta de planejamento estratégico que permite avaliar as variáveis sobre o nível de sustentabilidade, de tal maneira que possa planejar os negócios futuros, definindo prioridades para o desenvolvimento sustentável das organizações.
Dow Jones Sustainability Index	DJSI	1999	Grupo de Empresas	Desenvolvido por empresas líderes com foco em sustentabilidade baseando-se na análise dos critérios econômicos, ambientais e sociais a longo prazo. Contudo, vale ressaltar que doze critérios são analisados, no entanto, devido a complexidade há uma ampla quantidade de informações que são solicitadas para avaliação.
Environmental Performance Index	EPI	1999	Universidade de Yale	Trata-se de um conjunto de 32 indicadores de desempenho, focados em analisar sobre as dimensões ambiental e social. A dimensão econômica não é considerada na análise.
Environmental Pressure Indicators	EPI-EU	1999	Indicators for the European Union	Através de uma composição de mais de 60 indicadores, eles visam identificar os impactos negativos das ações humanas ao meio ambiente.
Environmental Sustainability Indicators	ESI	2002	Universidade de Yale	O ESI foi desenvolvido para avaliar a sustentabilidade ambiental em relação aos caminhos de outros países, sendo um conjunto de 68 indicadores. No entanto o EPI, vem para suplementar as análises no que tange ao indicador ambiental, pois é utilizado como um índice de referência orientado aos resultados a serem alcançados pela organização.
Ethos	Ethos	1982	Organização não governamental criada por um grupo de empresas	É analisado as três dimensões da sustentabilidade, com ênfase na análise para o indicador social.
Ethos Sebrae	Ethos	2003	Sebrae e Instituto Ethos	Criado para apoiar micros e pequenas empresas é um recurso capaz de avaliar a responsabilidade social e o desenvolvimento social das organizações.
European Environment Agency Core Set of Indicators	EEA-CSI	2005	European Environment Agency	É utilizado em especial nos países da União Europeia com foco na análise dos aspectos ambientais.

Quadro 9 – Modelos de avaliação de sustentabilidade e sua finalidade (continuação)

Modelo	Abreviação	Ano	Origem	Finalidade
GM Metrics for Sustainable Manufacturing	GMS	2009	General Motors	Criado com foco para atender as necessidades de análise das métricas da companhia, são analisados 33 indicadores divididos em 6 grupos de sustentabilidade, sendo eles: consumo de energia, impacto ambiental, bem estar social, segurança ocupacional, gerenciamento de resíduos e custos de manufatura.
Icheme Sustainability Metrics	ISM	2002	Instituto de Engenheiros Químicos	O modelo analisa 50 indicadores nos três critérios de sustentabilidade, mesmo tendo um modelo simplicista, de acordo com os autores, requer uma grande quantidade de dados que não são fáceis de se alcançar.
Indicator Database	ID	1993	*Maureen Hart*	Composto por um conjunto de 409 indicadores são relacionados com o propósito de analisar a sustentabilidade dentro de uma ferramenta online.
Inmetro	Inmetro	2012	Instituto Nacional de Metrologia	Trata-se de uma plataforma de sete princípios, sendo composto por grupo de indicadores, que são uma referência para analisar os critérios de sustentabilidade dos processos produtivos dentro das empresas.
ISO 14031 *Environment Performance Evaluation*	ISO	2004	ABNT	Composto por 155 indicadores, com caracterizações para as organizações desenvolverem seus indicadores particularmente quanto ao desempenho nas três dimensões da sustentabilidade.
Flygt Sustainability Index	ITT	2004	Universidade de Mälardalen – Suécia	Tem como objetivo avaliar os três pilares da sustentabilidade, sendo composto por 40 indicadores.
OECD Sustainable Manufacturing Toolkit	OECD	2011	*Organization for Economic Cooperation and Development*	Contempla 46 indicadores que realizam o acompanhamento e desenvolvimento dos países que são integrantes da organização.
Rapid Basin-wide Hydropower Sustainability Assessment Tool	RSAT	2011	Agência Internacional de Desenvolvimento dos Estados Unidos em 2010	É composto por 53 indicadores de avaliação sobre os aspectos de sustentabilidade.

Fonte: Autor (2021).

6 METODOLOGIA

Para realizar um processo de pesquisa é necessário utilizar-se das pesquisas existentes e transformá-las com o objetivo de avançar e agregar novos estudos sobre o que já foi produzido (MIGUEL, 2010). A pergunta de pesquisa consiste conhecer como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir na melhoria dos indicadores relacionados ao triple botton line (TBL)? Segundo os objetivos a pesquisa é exploratória (GIL, 2002). Com relação à abordagem do problema, se enquadra como pesquisa qualitativa, pois o ambiente é a fonte de coleta dos dados e o pesquisador é o instrumento-chave, não exigindo, assim, a prática de métodos e técnicas estatísticas.

É necessário utilizar-se de um método de pesquisa para que os dados obtidos possam ser transformados a partir das informações já existentes sobre um determinado contexto, de tal maneira que, os métodos de investigação (o que inclui, mas não se limita ao processo de coleta, análise e interpretação dos dados) são pilares essenciais dos pesquisadores na proposição de seus estudos (YIN, 2005).

De acordo com Eisenhardt (1989), o estudo de caso é um método de pesquisa com foco no entendimento das funcionalidades em uma determinada situação. Miguel (2010) estabelece que o estudo de caso é um estudo empírico, capaz de analisar os problemas inseridos em um contexto real. A preferência pelo estudo de caso para aplicar nesta pesquisa foi por não separar o fenômeno estudado do contexto, auxiliar no entendimento dos eventos e considerar a relação entre as partes interessadas.

Sendo assim, para atender o objetivo desta pesquisa, o método utilizado foi o estudo de caso único integrado, fundamentado através de um estudo exploratório por entrevistas com profissionais, com o objetivo de obter a visão da organização em diferentes BU's (Unidade de Negócios), a fim de trazer uma melhor compreensão de como os fenômenos descritos na literatura ocorrem em situação real (BURMEISTER; LÜTTGENS; PILLER, 2015).

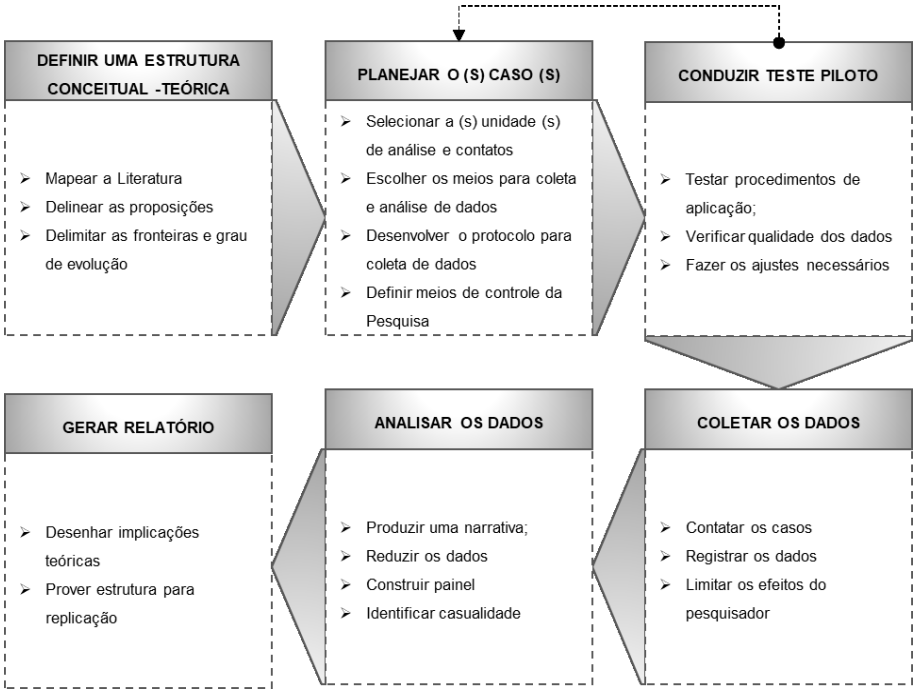
De acordo com Yin (2005), os estudos de caso são utilizados para gerar da mesma forma, uma análise aprofundada de estruturas organizacionais de determinadas regiões e contextos, buscando a melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem dentro do cenário a ser estudado, diante a tomada de decisão para a escolha da tecnologia a ser implementada, preservando suas características na totalidade. Portanto, o fenômeno a ser estudado é entender como a adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 pode melhorar os indicadores da sustentabilidade (TBL), dado a análise do estudo de caso único integrado, subdividido nas áreas: alta gestão, Fábrica A, Fábrica B, Fábrica C e Fábrica D gerando construtos teóricos,

expandindo uma teoria indutiva, identificados pela fundamentação que seja lógica e visível durante o período da entrevista (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007).

Segundo Miguel (2018), a adoção do estudo de caso, necessita estar alicerçada na literatura, atendendo as questões e objetivos da pesquisa com o intuito de prover uma trajetória que forneça a contribuição investigativa pretendida, sendo ela de natureza teórica ou empírica. O método de caso é justamente apropriado para que possa ser obtido uma investigação exploratória e a construção da teoria. Todavia, é necessário que a pesquisa seja conduzida com todos os critérios metodológicos que justifique a pesquisa, sendo assim, é necessário que seja realizado um planejamento que atenda a condução da pesquisa, lastreadas por um roteiro e, alicerçados na literatura que possa utilizar-se de múltiplas fontes de dados e a interação com os constructos desenvolvidos diante a fundamentação teórica obtida e assim possa proporcionar ao pesquisador a maior legitimidade na pesquisa.

Foi conduzido um teste piloto a partir de um roteiro de entrevista semiestruturado. Segundo Miguel (2018), a condução de um teste piloto é essencial para analisar principalmente se os dados obtidos estão associados aos constructos, bem como ao objetivo da pesquisa. O teste piloto foi conduzido em uma empresa multinacional do setor de alimentos e bebidas e, a versão final do roteiro de entrevista encontra-se no Apêndice A.

Figura 11 – Etapas do desenvolvimento do estudo de caso



Fonte: Autor “adaptado de” Miguel, 2018.

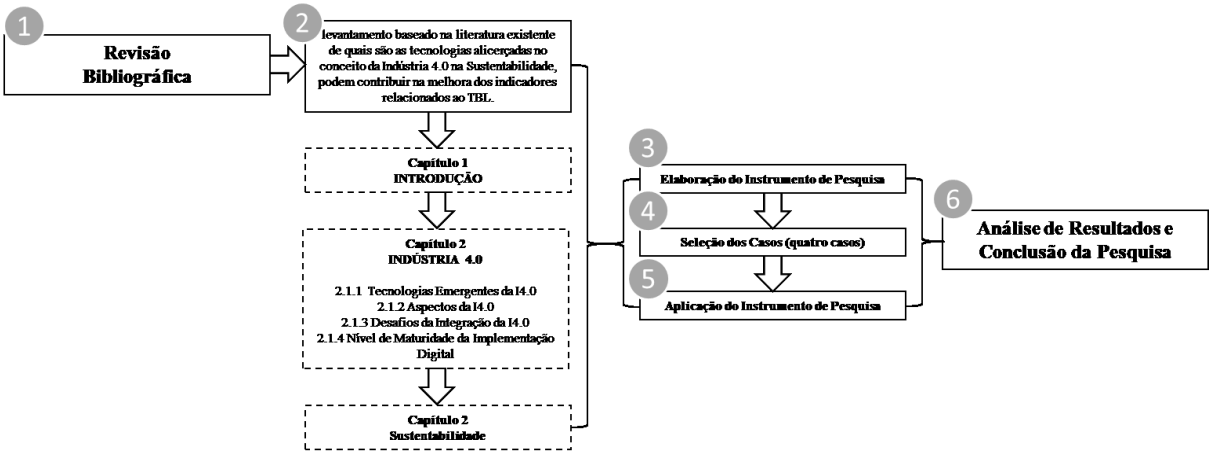
De acordo com Miles e Huberman (1994), a escolha da amostra tem influência direta aos resultados do estudo que se propõe analisar, portanto, é sugerido que possa ser realizado a entrevista com líderes de setores relevantes, a partir de contatos de rede profissional que possuam funções de gestão com experiência considerável às atividades de suas empresas quanto a inserção das tecnologias da I4.0. Deste modo, é possível ter a confiabilidade em relação às respostas diante da abordagem do roteiro de entrevistas (BURMEISTER; LÜTTGENS; PILLER, 2015).

Conforme descrito por Burmeister, Lüttgens e Piller (2015), a entrevista pode ser subdivida em duas partes: a compreensão dos entrevistados sobre I4.0 e a influência que ela exerce sobre a sustentabilidade a partir de um protocolo, podendo ela ser de forma presencial ou por *conference call*. É necessário, neste caso, considerar a organização (unidade e função), dado a análise do processo existente com a inserção da tecnologia, que tenha influência direta sobre a sustentabilidade, métodos ou ferramentas alicerçadas quanto aos indicadores do TBL, analisando a relação entre as tecnologias, impactos e resultados pretendidos para cada organização. Além disso, a fim de fazer a triangulação dos dados obtidos pelas entrevistas, foram realizadas diversas visitas às fábricas (observação direta) e consulta a documentos e relatórios internos (documentos).

As etapas desta pesquisa consistiram em:

1. Realizar um levantamento baseado na literatura existente de quais são as tecnologias alicerçadas no conceito da Indústria 4.0 na Sustentabilidade, podem contribuir na melhora dos indicadores relacionados ao TBL (ver Apêndice A).
2. Apresentar uma estrutura que seja capaz de sistematizar um modelo teórico-conceitual que possa descrever a relação das tecnologias da I4.0 quanto a melhora dos indicadores relacionados ao TBL, apresentando as oportunidades de utilização na Figura 12.
3. Elaboração do Instrumento de Pesquisa.
4. Seleção das Fábricas.
5. Aplicação do Instrumento de Pesquisa.
6. Análise dos resultados e conclusão da Pesquisa.

Figura 12 – Etapas e estrutura do trabalho



Fonte: Autor, 2021.

Com o objetivo de analisar os impactos neste estudo de caso em aplicações distintas dentro da companhia, foi necessário a caracterização dos envolvidos de acordo com a unidade de negócio, área e função do entrevistado, descritas no Quadro 10.

Quadro 10 – Entrevistados

Fase	Unidade	Função	Bloco de Perguntas
1º	Alta Gestão (Corporativo)	Diretor de Engenharia	Bloco IV de forma Sucinta
		Gerência de RH	Bloco IV de forma Sucinta
		Gerência de Sustentabilidade	Bloco IV de forma Sucinta
		Gerência de Aplicação de tecnologias da I4.0	Piloto dos blocos: I, II e III
		Gerência de Digitalização	I, II, III
		Engenharia de Aplicação	I, II, III e IV
		Engenharia de Utilidades	I, II, III e IV
2º	Fábrica A	Gerência de Projetos ou Técnica	I, II, III
		Gerência: Segurança, Meio Ambiente e Saúde	I, II, III
		Gerência de Operações: Estamparia	I, II, III e IV
	Fábrica B	Gerente de Projetos	I, II, III e IV
		Gerência: Segurança, Meio Ambiente e Saúde	I, II, III e IV
		Gerência de Operações	I, II, III e IV
	Fábrica C	Gerência de Projetos ou Técnica	I, II, III e IV
		Gerência de Operações	I, II, III
	Fábrica D	Gerência de Projetos ou Técnica	I, II, III e IV
		Gerência de Operações	I, II, III e IV

Fonte: Autor, 2021.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a análise cruzada sobre o estudo de caso único, realizado em duas fases: a primeira fase de entrevistas foi realizada na alta gestão e a segunda fase foram distribuídas em fábricas: A, B, C e D, através da análise de como a companhia se posiciona isoladamente e na sua totalidade quanto as influências das tecnologias habilitadoras da I4.0 sobre o TBL.

De modo a organizar os dados obtidos e debater as principais diferenças entre os casos, as análises foram distribuídas em quatro blocos, sendo eles:

- Bloco I: Tecnologias Habilitadoras da I4.0;
- Bloco II: Impactos da I4.0;
- Bloco III: Dimensões e resultados;
- Bloco IV: Influência dos indicadores da sustentabilidade com as tecnologias emergentes da I4.0.

7.1 BLOCO I: TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA I4.0

Utilizando-se das informações disponibilizadas pelos entrevistados sobre qual tecnologia foi implementada, com a percepção das análises da alta gestão e as fábricas com os gestores das áreas que estão ligados diretamente a implementação das tecnologias em que se encontram instaladas, através das análises de período sobre os apêndices C, D, E, F e G da tendência de como cada fábrica tem avançado. Baseando-se no resultado da pesquisa entre os entrevistados tanto da alta gestão como das fábricas foi possível analisar o cenário da percepção do período de tempo (em anos) da implementação de cada Tecnologia da I4.0 isoladamente em cada fábrica, e que não há homogeneidade no período, pois foi apontado prioridades de implementação de acordo com a demanda fabril de cada unidade de negócio (Figura 13).

A alta Gestão, considerada as engenharias de integração nas fábricas é responsável em estudar quais as fábricas que receberão a tecnologia, contudo, é visto pela companhia que tecnologia como CPS realizará a integração física entre robôs colaborativos e AGV's e entre outras tecnologias emergentes da I4.0, a companhia compreende que irá alcançar o benefício ótimo com a automação dos processos aliados ao CPS para melhoria de performance dos processos produtivos.

Atualmente em uma das Fábricas localizada no norte do Brasil, está sendo realizado a implementação do CPS que será utilizada como piloto e, padrão de integração para projetos que necessitam de integração entre as tecnologias da I4.0 dos equipamentos para as demais fábricas.

Outra percepção apontada é que nos últimos 10 anos foi destacada a necessidade de integração dos processos com maior frequência para soluções em final de linha com automação dos processos, no entanto, de forma pontual e sem a integração completa.

O investimento para as soluções quanto a implementação de tecnologias da I4.0, se deu a partir do ano de 2017 (últimos 4 anos), pois a companhia passou a ter a percepção que o futuro da Manufatura seria investindo nestas tecnologias. A implementação passou a ocorrer em média nos últimos 5 anos com a inserção de robôs colaborativos em aplicações de paletização nas fábricas.

O tempo para implementação é dado a partir da análise da necessidade da fábrica com aprovação do crédito financeiro para liberação do investimento com períodos de retorno do investimento, dado a complexidade que está diretamente ligado ao custo e impacto operacional (fábricas e pessoas), portanto é possível destacar, os níveis de projeto:

- Baixa e média complexidade: no máximo de 18 meses do retorno do investimento. Por exemplo, a instalação de um robô colaborativo em um final de linha, terá um pequeno impacto em termos de custo, considerando uma média de redução de 2 ou 3 pessoas no ambiente de trabalho. No entanto, a redução não é tratada como uma dispensa de funcionários e sim uma nova formatação do profissional ou a realocação dele para outras atividades.
- Alta complexidade: período máximo 24 meses do retorno do investimento. Possuem um fluxo de aprovação, envolvendo a Matriz na Europa, seguida de documentações técnicas que comprovem a necessidade para as liberações do recurso financeiro para execução do projeto. Dado como exemplo a fábrica B, foi realizado a eliminação de 46 postos de trabalho, em virtude de um projeto de alta complexidade. Parte destes profissionais, puderam ser reaproveitados na fábrica de origem e outras puderam ser disponibilizadas para outras fábricas, visto que a companhia possui uma grande flutuação na demanda produtiva em diferentes unidades de negócios, portanto, sempre é analisado previamente os impactos antes da implementação das tecnologias junto às unidades de negócios.

Na sua totalidade é possível observar que houve alta variação do período, conforme destacado na Figura 13 entre as tecnologias implementadas, em virtude da demanda de cada fábrica e a priorização de projetos que possam sustentar o retorno do investimento.

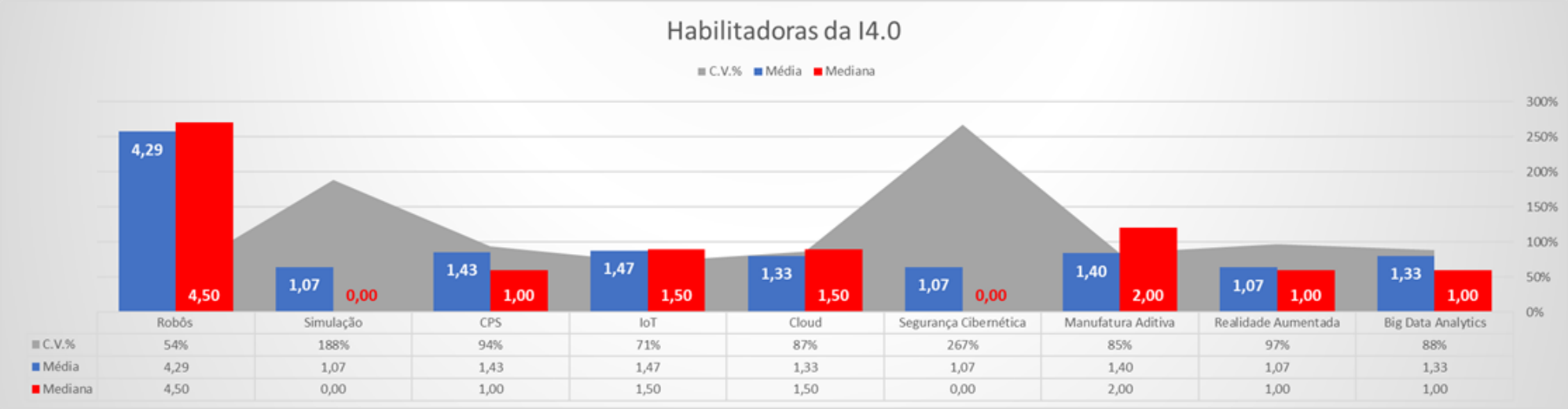
Para a implementação dos robôs é considerado a média de 5 anos. As simulações da aplicação das tecnologias da I4.0 são realizadas pelos fornecedores que integram a solução para demonstrar a funcionalidade da linha antes da implementação, buscando mitigar problemas durante o processo de instalação.

O CPS é um tema recente, mas caminha para ser estendido as demais fábricas. IoT e Cloud são consideradas tecnologias conexas para as soluções de projetos de digitalização, com menor tempo de implementação, porém crescente nas fábricas e na automação de processos administrativos.

Segurança Cibernética está associada a segurança dos dados de equipamentos, por exemplo tecnologias como AGVs, necessitam de servidores locais dedicados e com regras de *firewall* para conectividade na execução da operação, uma tecnologia recente que requer aprendizado para fornecedores e a companhia, visto que é necessário a implementação completa de soluções atingindo a segurança operacional do tráfego de informações.

Manufatura Aditiva, tem sido implementada de forma recente para otimizar processos de reposição de peças de reposição para manutenção de equipamentos. Big data Analytics é considerada para a companhia na mesma esfera da tecnologia IoT e Cloud, ou seja, estruturas conexas, pois enquanto a IoT é a conectividade do campo das informações, a Cloud trata do armazenamento e o Big data é o volume, variedade, velocidade e veracidade das informações no campo para gerar melhores soluções de produtividade e modelagem para as unidades de negócios, projetos de conectividade tem em média menos de 2 anos na companhia.

Figura 13 – Tecnologias Habilitadoras da I4.0 e Período de Implementação



	Robôs	Simulação	CPS	IoT	Cloud	Segurança Cibernética	Manufatura Aditiva	Realidade Aumentada	Big Data Analytics
C.V.%	54%	188%	94%	71%	87%	267%	85%	97%	88%
Média	4,29	1,07	1,43	1,47	1,33	1,07	1,40	1,07	1,33
Mediana	4,50	0,00	1,00	1,50	1,50	0,00	2,00	1,00	1,00

Fonte: Autor, 2021.

7.2 BLOCO II: IMPACTOS DA I4.0

Também foi necessário obter informações quanto à percepção dos impactos da implementação das tecnologias em termos de flexibilidade, eficiência, granularidade, quantidade de dados e automação nos processos produtivos (Quadro 11), visto que, de acordo com a literatura, a inserção destas tecnologias propõe modificações na realidade operacional do cenário das organizações. As médias destacadas no Quadro 11 foram dos dados obtidas a partir dos apêndices H, I, J, K e L que geraram também a Figura 14.

Quadro 11 – Impactos

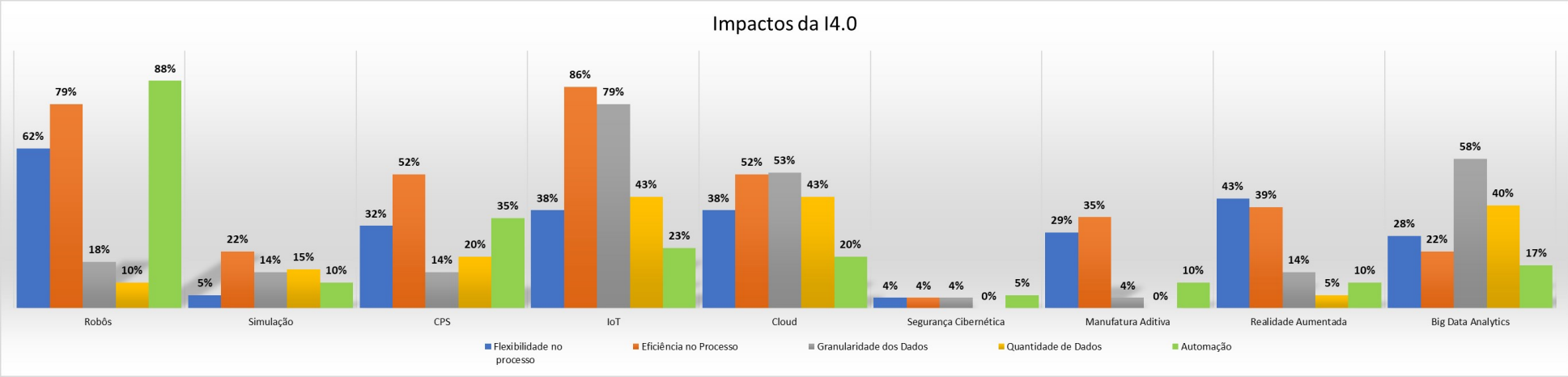
Tecnologia	Flexibilidade no processo	Eficiência no Processo	Granularidade dos Dados	Quantidade de Dados	Automação
Robôs	62%	79%	18%	10%	88%
Simulação	5%	22%	14%	15%	10%
CPS	32%	52%	14%	20%	35%
IoT	38%	86%	79%	43%	23%
Cloud	38%	52%	53%	43%	20%
Segurança Cibernética	4%	4%	4%	0%	5%
Manufatura Aditiva	29%	35%	4%	0%	10%
Realidade Aumentada	43%	39%	14%	5%	10%
Big Data Analytics	28%	22%	58%	40%	17%

Fonte: Autor, 2021.

A flexibilidade do processo passa a ser um dos principais drivers, pois o mercado consumidor vem mudando ao longo do tempo e tem exigido esta flexibilidade tanto em produtos como em volume. No passado era produzir o máximo possível, no menor tempo, no menor custo e com qualidade. Hoje a realidade passou a ser diferente devido às exigências do mercado consumidor ocasionando o aumento de SKU's (tipos de produtos), sendo na maioria das vezes o mesmo produto, com condições diferentes de fornecimento, pois é o mercado que define a condição de aquisição do produto. Ou seja, passando ser uma demanda de marketing do negócio que chega para a engenharia com melhoria do processo com a utilização de robôs em células automatizadas com a integração de CPS e IoT, para obtenção de maior flexibilidade, eficiência e consequentemente ocasiona o resultado da melhoria do processo diante a implementação da automação, conforme destacado na Figura 14.

Portanto diante as análises obtidas, na média das análises desde a Alta Gestão às fábricas a implementação das tecnologias tendem a ser maior quanto à eficiência e automação dos processos de fabricação. Contudo, há oportunidades de serem analisados os impactos quanto à granularidade e quantidade de dados, pois pode auxiliar a buscar uma melhor modelagem para obtenção de uma avaliação mais precisa na mudança do processo.

Figura 14 – Impactos da I4.0



Fonte: Autor, 2021.

7.3 BLOCO III: DIMENSÕES DO TBL E RESULTADOS COM A IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0

Através da implementação das tecnologias habilitadoras da I4.0 é possível uma observação do cenário quanto aos resultados que a implementação das tecnologias pode trazer, sobre os aspectos: econômicos - melhor desempenho do processo; ambiental – melhor uso sustentável dos recursos e, social – melhores condições de trabalho, conforme descrito nos Apêndices M, N, O, P e Q), guiando as organizações para que entrem em um contexto mais competitivo, sendo uma oportunidade de gerar valor agregado para a economia, dado que os três pilares do TBL podem impulsionar o desenvolvimento das empresas, potencializando cada aspecto do TBL em termos de produtividade de forma sustentável dentro das organizações.

Através da média obtida a partir a análise com os entrevistados (Figura 15) foi possível observar que as tecnologias que trazem melhor desempenho no processo são: Robôs, IoT, Cloud, Big Data e Realidade Aumentada, em virtude da aspiração quanto à implementação de projetos que incluam conectividade entre dispositivos e equipamentos. O objetivo do projeto de conectar fábricas às pessoas é obter a transformação dos dados entre robôs e/ou máquinas de forma remota e segura. Além disso, foi exposta a necessidade da obtenção de ganhos ao analisar estes dados e transformar num benefício para a linha produtiva através da utilização da Big data associada ao Machine Learning para garantir um melhor desempenho nos processos e, consequentemente, possam ajustar as operações de forma autônoma em tempo real.

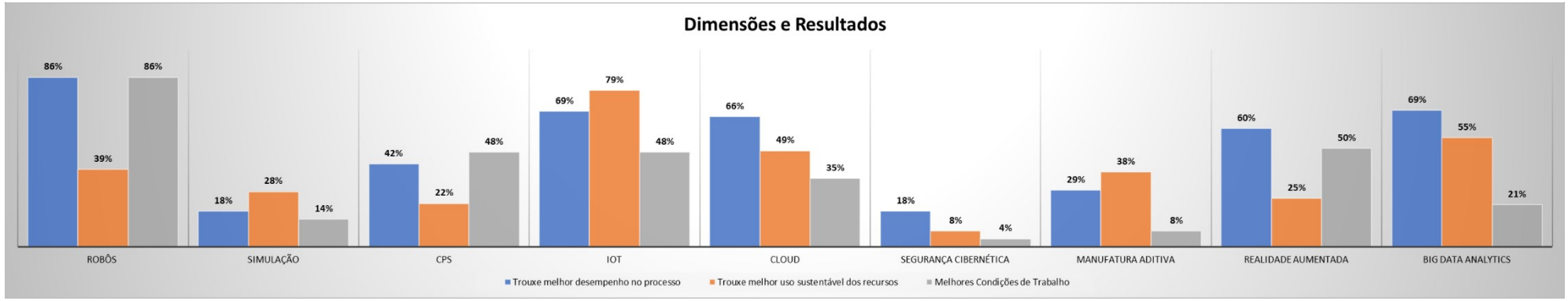
Quanto ao melhor uso sustentável dos recursos, IoT, Cloud e Big Data ficaram em evidência, pois a utilização de forma integrada com a obtenção dos dados dos equipamentos que possam ser ineficientes no processo, é possível a análise da performance, obtendo a redução de consumo energético e até mesmo a realização de manutenções programadas para diminuição de perdas produtivas, sintetizando os processos para melhora nos resultados, sem perdas produtivas.

Em relação às melhores condições de trabalho, foi possível obter em destaque tecnologias como Robôs e Realidade Aumentada. Quanto aos robôs, foi observada a percepção que não se entrega somente produtividade e flexibilidade, pode se considerar temas como segurança no trabalho e potencial redução de causas trabalhistas, em virtude das condições ergonômicas dos processos produtivos executado pela mão de obra humana.

A Realidade Aumentada está diretamente associada ao comissionamento e manutenção nas fábricas, visando fornecer aos profissionais informações em tempo real e maior flexibilidade, auxiliando na tomada de decisão para execução de procedimentos com

necessidades de intervenções técnicas em processo de manutenção e ou comissionamento remoto na validação de projetos.

Figura 15 – Dimensões do TBL e Resultados com a Implementação das Tecnologias da I4.0



Fonte: Autor, 2021.

7.4 BLOCO IV: INFLUÊNCIA DOS INDICADORES DA SUSTENTABILIDADE COM AS TECNOLOGIAS EMERGENTES DA I4.0.

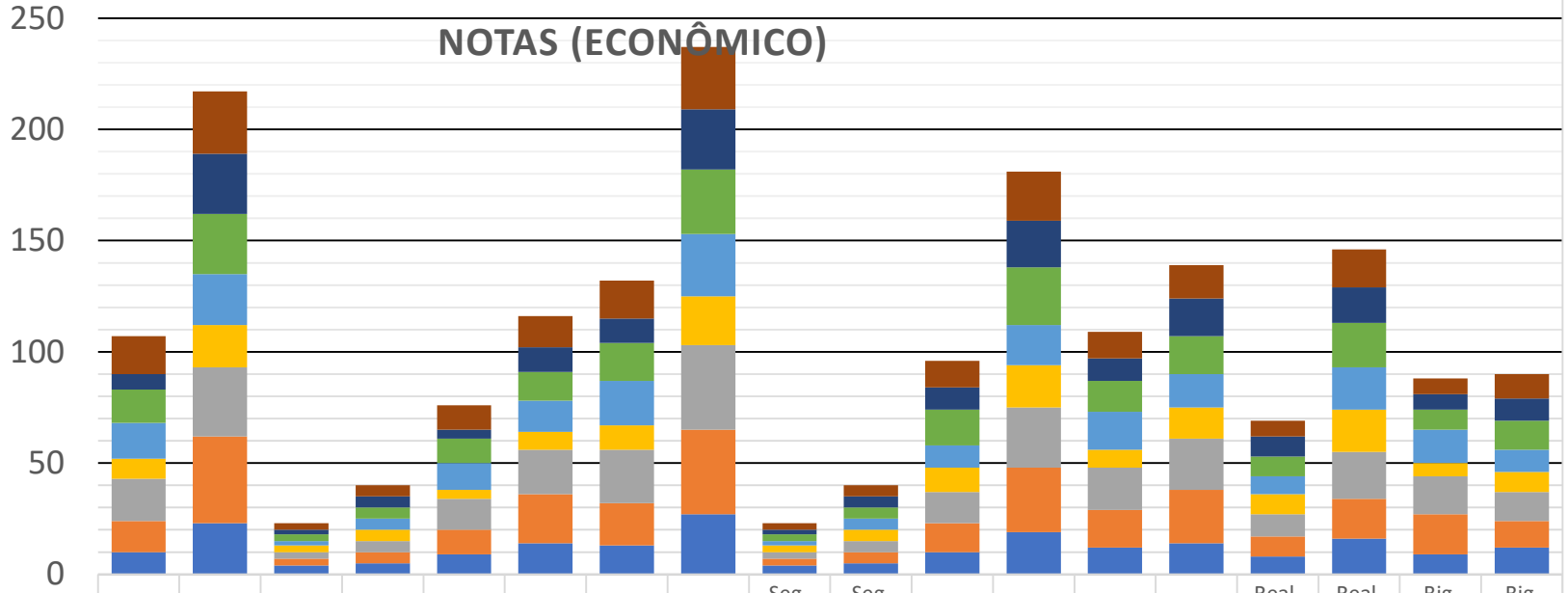
Sobre os aspectos dos indicadores do TBL foi proposto um modelo de avaliação para que pudesse ser analisada a percepção dos indicadores antes da implementação da tecnologia e pós implementação. Os entrevistados atribuíam, de acordo com sua percepção, uma nota entre 0 (menor nota) e 10 (maior nota). As respostas detalhadas dos entrevistados, estão os apêndices R, S, T e U.

A Figura 16 resume os dados do apêndice V, com análise estatística na Figura 17 e, portanto, no aspecto econômico foi observada uma maior tendência e melhoria pós implementação nas tecnologias, como Robôs, IoT e Cloud, visto que são tecnologias mais recentes e é um desafio da companhia em conectar fábricas às pessoas para obtenção de melhores resultados. No entanto, é possível observar que, apesar da maior demanda incerta do mercado, há uma melhor eficiência e flexibilidade nos processos dada a necessidade de personalização e qualidade, trazendo melhora nos prazos de entregas. Por outro lado, há a necessidade de grandes investimentos para adoção das tecnologias.

Quanto ao aspecto ambiental na Figura 18 e análise estatística na Figura 19 (obtida a partir dos dados do apêndice X), destacaram-se tecnologias como Robôs, IoT e Cloud por estarem diretamente ligadas aos projetos de digitalização, os melhores indicadores foram a redução de resíduos e redução de na entrega incorreta de mercadorias. Outros indicadores, como transparência das emissões de gases no efeito estufa por exemplo, não houve a percepção direta de quanto as tecnologias podem contribuir na melhoria deste indicador.

Em relação ao aspecto social, a Figura 20 e Figura 21 (obtida a partir dos dados do apêndice Y) aponta que, após implementação as tecnologias de Robôs, IoT e Cloud ficou evidenciado que há um aumento considerável sobre os indicadores de transformação organizacional, que estão diretamente associados à motivação dos profissionais com a necessidade de requalificação para o mercado de trabalho e que possam estar inseridos dentro deste contexto de transformação para uma nova realidade corporativa.

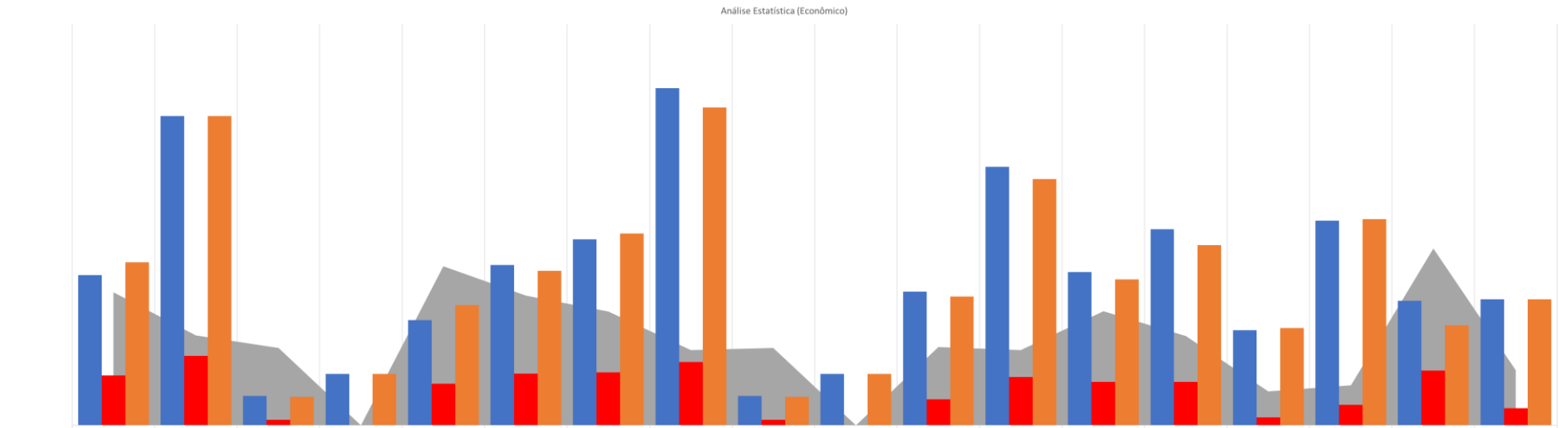
Figura 16 – Notas dos Indicadores Econômicos do TBL com as Tecnologias da I4.0



	Robôs (Antes)	Robôs (Pós)	Simulação (Antes)	Simulação (Pós)	CPS (Antes)	CPS (Pós)	IoT (Antes)	IoT (Pós)	Seg. Cibernética (Antes)	Seg. Cibernética (Pós)	Cloud (Antes)	Cloud (Pós)	Man. Aditiva (Antes)	Man. Aditiva (Pós)	Real. Aumentada (Antes)	Real. Aumentada (Pós)	Big Data Anal. (Antes)	Big Data Anal. (Pós)
Demanda incerta do cliente	17	28	3	5	11	14	17	28	3	5	12	22	12	15	7	17	7	11
Rentabilidade incerta	7	27	2	5	4	11	11	27	2	5	10	21	10	17	9	16	7	10
Grandes investimentos necessários	15	27	3	5	11	13	17	29	3	5	16	26	14	17	9	20	9	13
Novos modelos de negócios	16	23	2	5	12	14	20	28	2	5	10	18	17	15	8	19	15	10
Prazos de entrega	9	19	3	5	4	8	11	22	3	5	11	19	8	14	9	19	6	9
Personalização e qualidade	19	31	3	5	14	20	24	38	3	5	14	27	19	23	10	21	17	13
Eficiência, flexibilidade	14	39	3	5	11	22	19	38	3	5	13	29	17	24	9	18	18	12
Transparência de custos	10	23	4	5	9	14	13	27	4	5	10	19	12	14	8	16	9	12

Fonte: Autor, 2021.

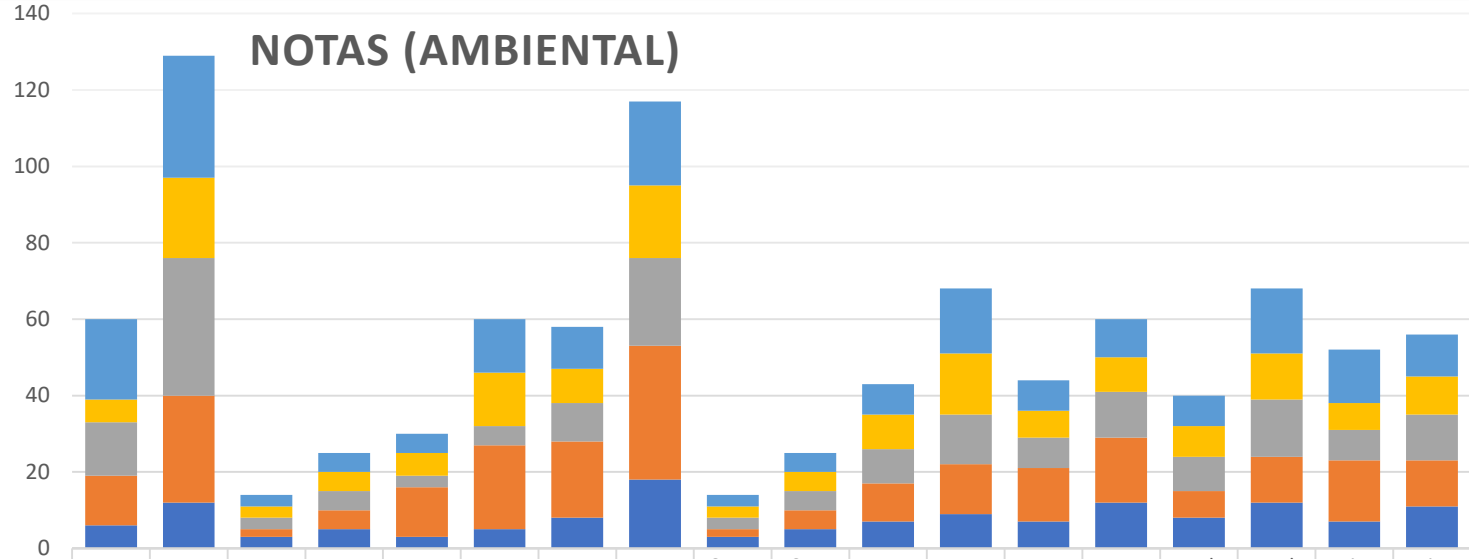
Figura 17 – Análise Estatística dos Indicadores Econômicos do TBL com as Tecnologias da I4.0



	Robôs (Antes)	Robôs (Pós)	Simulação (Antes)	Simulação (Pós)	CPS (Antes)	CPS (Pós)	IoT (Antes)	IoT (Pós)	Seg. Cibernética (Antes)	Seg. Cibernética (Pós)	Cloud (Antes)	Cloud (Pós)	Man. Aditiva (Antes)	Man. Aditiva (Pós)	Real. Aumentada (Antes)	Real. Aumentada (Pós)	Big Data Anal. (Antes)	Big Data Anal. (Pós)
CV%	33%	22%	19%	0%	40%	32%	28%	19%	19%	0%	20%	19%	29%	22%	8%	10%	44%	14%
Média	13,13	27,00	2,56	4,50	9,19	14,00	16,25	29,44	2,56	4,50	11,69	22,56	13,38	17,13	8,31	17,88	10,88	11,00
desvio padrão	4,36	6,07	0,50	0,00	3,64	4,54	4,62	5,53	0,50	0,00	2,28	4,24	3,81	3,81	0,70	1,79	4,80	1,51
Mediana	14,25	27,00	2,50	4,50	10,50	13,50	16,75	27,75	2,50	4,50	11,25	21,50	12,75	15,75	8,50	18,00	8,75	11,00

Fonte: Autor, 2021.

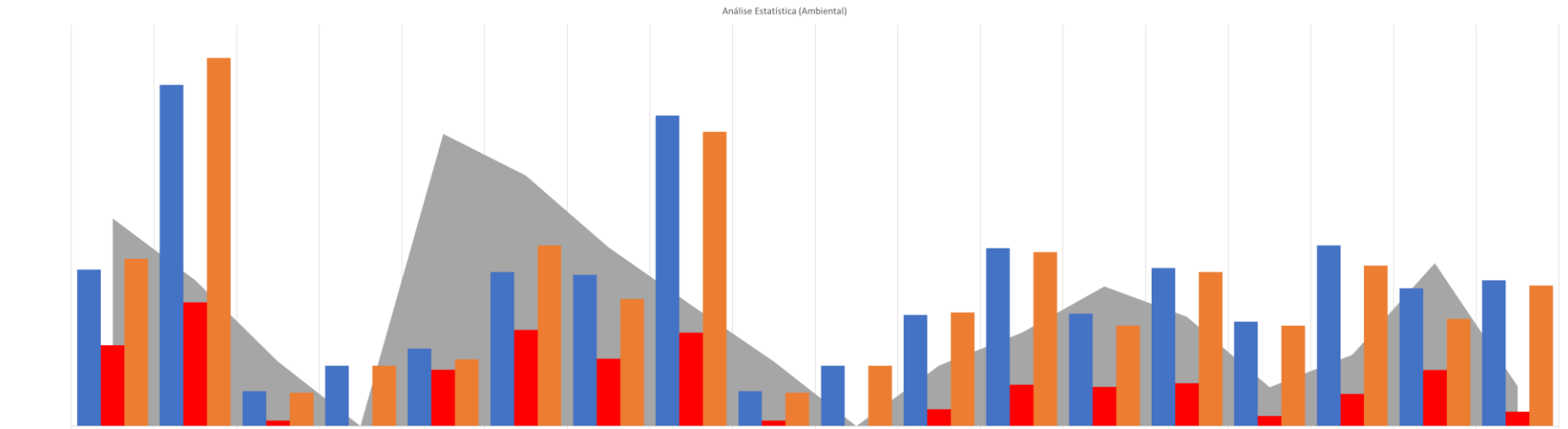
Figura 18 – Notas dos Indicadores Ambientais do TBL com as Tecnologias da I4.0



	Robôs (Antes)	Robôs (Pós)	Simulação (Antes)	Simulação (Pós)	CPS (Antes)	CPS (Pós)	IoT (Antes)	IoT (Pós)	Seg. Cibernética (Antes)	Seg. Cibernética (Pós)	Cloud (Antes)	Cloud (Pós)	Man. Aditiva (Antes)	Man. Aditiva (Pós)	Real. Aumentada (Antes)	Real. Aumentada (Pós)	Big Data Anal. (Antes)	Big Data Anal. (Pós)
Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas	21	32	3	5	5	14	11	22	3	5	8	17	8	10	8	17	14	11
Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização	6	21	3	5	6	14	9	19	3	5	9	16	7	9	8	12	7	10
Redução de resíduos	14	36	3	5	3	5	10	23	3	5	9	13	8	12	9	15	8	12
Eficiência de recursos e energia	13	28	2	5	13	22	20	35	2	5	10	13	14	17	7	12	16	12
Transparência das emissões de gases de efeito estufa	6	12	3	5	3	5	8	18	3	5	7	9	7	12	8	12	7	11

Fonte: Autor, 2021.

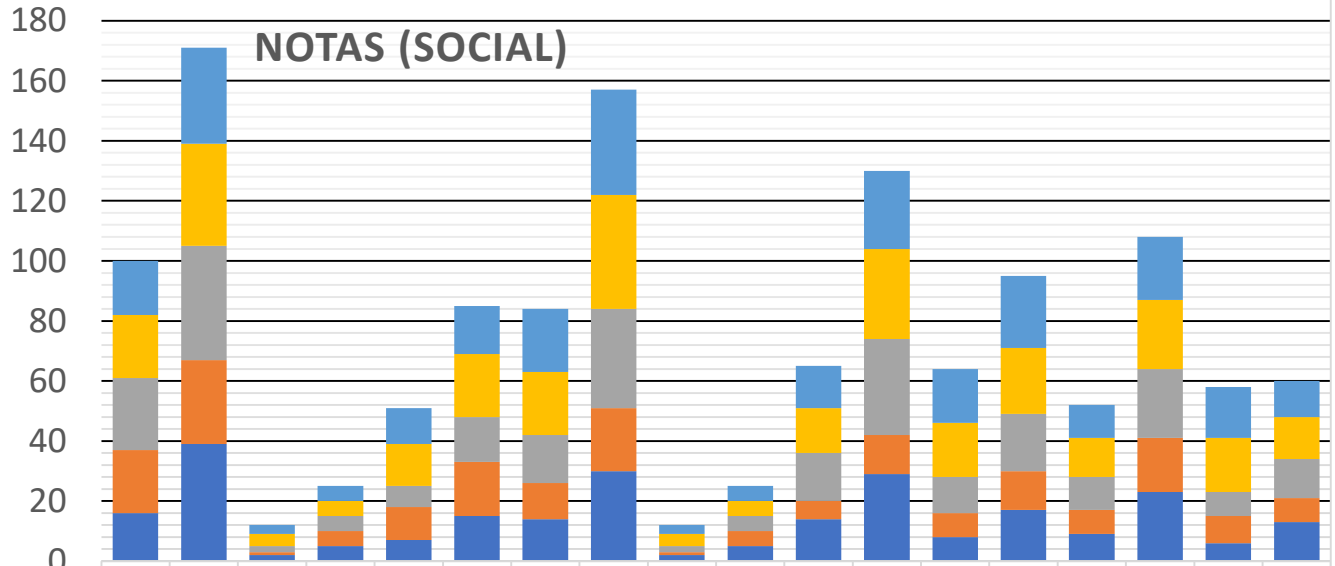
Figura 19 – Análise Estatística dos Indicadores Ambientais do TBL com as Tecnologias da I4.0



	Robôs (Antes)	Robôs (Pós)	Simulação (Antes)	Simulação (Pós)	CPS (Antes)	CPS (Pós)	IoT (Antes)	IoT (Pós)	Seg. Cibernética (Antes)	Seg. Cibernética (Pós)	Cloud (Antes)	Cloud (Pós)	Man. Aditiva (Antes)	Man. Aditiva (Pós)	Real. Aumentada (Antes)	Real. Aumentada (Pós)	Big Data Anal. (Antes)	Big Data Anal. (Pós)
CV%	52%	36%	16%	0%	73%	62%	45%	30%	16%	0%	15%	23%	35%	27%	10%	18%	41%	10%
Média	11,70	25,50	2,60	4,50	5,80	11,50	11,30	23,20	2,60	4,50	8,30	13,30	8,40	11,80	7,80	13,50	10,30	10,90
desvio padrão	6,05	9,25	0,42	0,00	4,22	7,18	5,03	6,99	0,42	0,00	1,25	3,09	2,92	3,21	0,76	2,40	4,18	1,08
Mediana	12,50	27,50	2,50	4,50	5,00	13,50	9,50	22,00	2,50	4,50	8,50	13,00	7,50	11,50	7,50	12,00	8,00	10,50

Fonte: Autor, 2021.

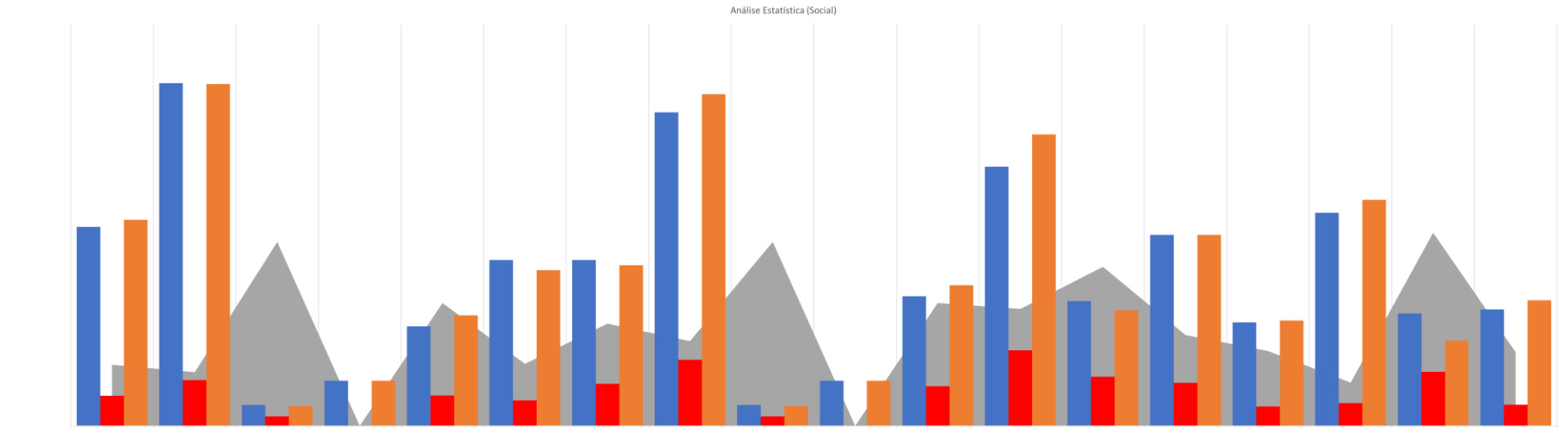
Figura 20 – Notas dos Indicadores Sociais do TBL com as Tecnologias da I4.0



	Robôs (Antes)	Robôs (Pós)	Simulação (Antes)	Simulação (Pós)	CPS (Antes)	CPS (Pós)	IoT (Antes)	IoT (Pós)	Seg. Cibernética (Antes)	Seg. Cibernética (Pós)	Cloud (Antes)	Cloud (Pós)	Man. Aditiva (Antes)	Man. Aditiva (Pós)	Real. Aumentada (Antes)	Real. Aumentada (Pós)	Big Data Anal. (Antes)	Big Data Anal. (Pós)
Rede, ambiente e política influenciam a adoção da tecnologia	18	32	3	5	12	16	21	35	3	5	14	26	18	24	11	21	17	12
Transformação organizacional necessária	21	34	4	5	14	21	21	38	4	5	15	30	18	22	13	23	18	14
Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir	24	38	2	5	7	15	16	33	2	5	16	32	12	19	11	23	8	13
Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos	21	28	1	5	11	18	12	21	1	5	6	13	8	13	8	18	9	8
Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários	16	39	2	5	7	15	14	30	2	5	14	29	8	17	9	23	6	13

Fonte: Autor, 2021.

Figura 21 – Análise Estatística dos Indicadores Ambientais do TBL com as Tecnologias da I4.0



	Robôs (Antes)	Robôs (Pós)	Simulação (Antes)	Simulação (Pós)	CPS (Antes)	CPS (Pós)	IoT (Antes)	IoT (Pós)	Seg. Cibernética (Antes)	Seg. Cibernética (Pós)	Cloud (Antes)	Cloud (Pós)	Man. Aditiva (Antes)	Man. Aditiva (Pós)	Real. Aumentada (Antes)	Real. Aumentada (Pós)	Big Data Anal. (Antes)	Big Data Anal. (Pós)
CV%	15%	13%	46%	0%	31%	15%	25%	21%	46%	0%	31%	29%	40%	23%	19%	11%	48%	18%
Média	19,80	34,10	2,10	4,50	9,90	16,50	16,50	31,20	2,10	4,50	12,90	25,80	12,40	19,00	10,30	21,20	11,20	11,60
desvio padrão	3,01	4,56	0,96	0,00	3,03	2,55	4,20	6,58	0,96	0,00	3,94	7,52	4,90	4,30	1,92	2,28	5,38	2,13
Mediana	20,50	34,00	2,00	4,50	11,00	15,50	16,00	33,00	2,00	4,50	14,00	29,00	11,50	19,00	10,50	22,50	8,50	12,50

Fonte: Autor, 2021.

Diante as análises dos três aspectos do TBL, a companhia tem avançado com a implementação de algumas das tecnologias e é visto como um “caminho sem volta”, uma tendência crescente que, se associada aos indicadores da sustentabilidade, traz uma renovação no modo como são executadas as operações da produção, pois está diretamente ligado ao avanço da I4.0, atrelado com as práticas regenerativas, ou seja, de como se utiliza da tecnologia para alavancar os benefícios econômicos, sociais e ambientais. Além disso, durante a aplicação do roteiro das entrevistas, foi referenciado que o Brasil ainda carece destes incentivos para melhoria dos indicadores nas organizações. No entanto, um dos principais direcionadores atualmente é a visão compartilhada do TBL e não integrada, ou seja, durante a discussão com um dos gestores de área, foi destacado que é pouco quantificado e não se registra o que foi alcançado a partir das tecnologias da I4.0 sobre os indicadores do TBL, tendo uma oportunidade de desenvolver melhor a quantificação dos ganhos ambientais e sociais de forma automatizada e, assim, estruturar uma metodologia de análise da combinação dos indicadores com as tecnologias da I4.0.

8 CONCLUSÃO

O principal objetivo desta dissertação foi explorar como a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 podem contribuir na melhoria dos indicadores relacionados ao *Tripple Bottom Line* (TBL), visto que as organizações têm buscado atingir o melhor desempenho dos seus processos produtivos aliados aos aspectos econômicos, ambientais e sociais.

Os resultados da pesquisa apontam que as tecnologias com maior potencial de aplicação são os Robôs, IoT, CPS e Cloud por estarem diretamente ligados aos projetos de digitalização que estão em andamento e futuros desta organização. Tais impactos foram avaliados mediante a aplicação deste objeto de análise, entrevistando os profissionais envolvidos desde a alta gestão à algumas fábricas que estão liderando o processo de implementação das tecnologias da I4.0. No entanto, gerou-se a discussão sobre as demais tecnologias da I4.0, que não obtiveram destaque na análise, sendo elas: Simulação, Segurança Cibernética, Manufatura Aditiva e Big Data Analytics que tiveram pouca discussão, em virtude das dúvidas sobre a introdução destas tecnologias alicerçadas ao TBL. Isto evidencia que há oportunidades a serem analisadas pela organização, dado que não é analisada a combinação de como cada tecnologia pode contribuir com os indicadores do TBL. Faceado aos resultados obtidos é possível assegurar que a proposta desta pesquisa foi alcançada e contribui de forma significativa e notável para o futuro das organizações. Para isso, sugere-se que a organização analisada possa aplicar o método demonstrado, ajustando-o à sua realidade organizacional e, nas outras fábricas que não foram observadas, estimulando o olhar da combinação dos indicadores da sustentabilidade aliados as tecnologias da I4.0 de forma quantitativa e qualitativa, como foi feito nesta pesquisa.

A principal limitação da pesquisa foi em relação ao estudo de caso único, embora tenha envolvido diversas unidades de negócios, a análise de apenas uma empresa foi devido ao contexto pandêmico que limitou o acesso da autora em outras empresas. Assim, outra oportunidade é que essa mesma análise possa ser conduzida em organizações de diferentes setores de atuação, com o objetivo de comparar os resultados alcançados, principalmente porque ainda não está suficientemente conhecido os casos reais de combinação das tecnologias da I4.0 associada aos impactos no *Tripple Bottom Line* (TBL).

REFERÊNCIAS

ALCÁLCER, V.; MACHADO, V. **Scanning the Industry 4.0:** A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. Department of Mechanical Engineering, ESTSetúbal, Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, Portugal, 2018.

ALKAYA, E.; BOGURCU, M; ULUTAS, F.; DEMIRER, G. N. Adaptation to climate change in industry: emproving resource efficiency through sustainable production applications. **Water Environment Research,** [s.l.], v. 87, n. 1, p. 14–25, 2015.

BCG. The Boston Consulting Group. **Industry 4.0:** the future of productivity and growth in manufacturing industries. Alemanha, 2015.

BERGWEILER, S.; WEST-PHALL, C. B.; MAURI, J. L.; POCHEC, P. Intelligent manufacturing based on self-monitoring cyber-physical systems. UBICOMM 2015, v. 121, 2015.

BRACCINI, A. M.; MARGHERITA, E. G. **Exploring Organizational Sustainability of Industry 4.0 under the Triple Bottom Line:** The Case of a Manufacturing Company. Department of Economics, Engineering, Society and Business, Università degli Studi della Tuscia. 2018.

BURMEISTER, C.; LÜTTGENS, D.; PILLER, F. T. Business Model Innovation for Industrie 4.0: Why the Industrial Internet Mandates a New Perspective on Innovation. **Die Unternehmung,** v. 2, p. 1-31, 2015.

CARCARY, M.; DOHERTY, E.; CONWAY, G.: A dynamic capability approach to digital transformation–a focus on key foundational themes. In: **10th European Conference on Information Systems Management.** Academic Conferences and publishing limited, p. 20–28, 2016.

CARVALHO, M. M.; FLEURY, A.; LOPES, A. P. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 7, p. 1418-1437, 2013.

CHEN, D.; SCHUDELEIT, T.; POSSELT, G.; THIEDE, S. A state-of-the-art review and evaluation of tools for factory sustainability assessment. **Procedia CIRP,** v. 9, p. 85-90, 2013.

DIODATO, V. P. **Dictionary of bibliometrics.** New York: The Haworth Press, 1994.

DYLLICK, T.; HOCKERTS, K. Beyond the business case for corporate sustainability. **Business strategy and the environment**, v. 11, n. 2, p. 130-141, 2002.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy of Management Review,** v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

EISENHARDT, K. M.; GRAEBNER, M. E. Theory building from cases: Opportunities and challenges. **Academy of management journal,** v. 50, n. 1, p. 25-32, 2007

EKINS, P; SANDRINE, D; LISA, F; CARL, R. A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability. **Ecological Economics,** v. 44, n. 2–3, p. 165–185, 2003.

EVANS, S.; VLADIMIROVA, D.; HOLGADO, M.; VAN FOSSEN, K.; YANG, M.; SILVA, E. A.; BARLOW, C. Y. Business model innovation for sustainability: Towards a unified perspective for creation of sustainable business models. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, n. 5, p. 597-608, 2017.

FENG, S. C.; JOUNG, C. B. An overview of a proposed measurement infrastructure for sustainable manufacturing. In: **Proceedings of the 7th Global Conference on Sustainable Manufacturing,** Chennai, India. p. 360, 2009.

FENG, S. C.; JOUNG, C. B.; LI, G. Development overview of sustainable manufacturing metrics. In: **Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering**, Hefei, PRC. 2010.

FITZGERALD, M.; KRUSCHWITZ, N.; BONNET, D.; WELCH, M. Embracing digital technology: A new strategic imperative. **MIT sloan management review**, v. 55, n. 2, p. 1-12, 2014.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GILCHRIST, A. Introducing Industry 4.0. In: **Industry 4.0**. Apress, Berkeley, CA, p. 195-215, 2016.

HAJI, L. M.; AHMAD, O. M.; ZEEBAREE, S. R.; DINO, H. I.; ZEBARI, R. R.; SHUKUR, H. M. Impact of cloud computing and internet of things on the future internet. **Technology Reports of Kansai University**, v. 62, n. 5, p. 2179-2190, 2020.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: **2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)**. IEEE, p. 3928-3937, 2016.

JASINSKI, D.; MEREDITH, J.; KIRWAN, K. A comprehensive framework for automotive sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production,** v. 135, p. 1034-1044, 2016.

JOUNG, C. B.; CARRELL, J.; SARKAR, P.; FENG, S. C. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. **Ecological Indicators,** v. 24, p. 148-157, 2012.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0 – Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt am Main: **Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance**, Acatech, 2013.

KANG, H. S.; LEE, J. Y.; CHOI, S.; KIM, H.; PARK, J. H.; SON, J. Y.; DO NOH, S. 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.

KIEL, D.; MÜLLER, J. M.; ARNOLD, C.; VOIGT, K. I. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. **International journal of innovation management,** v. 21, n. 8, p. 1740015, 2017.

KLIMANT, P.; KOLLATSCH, C.; SCHUMANN, M. Augmented reality solutions in mechanical engineering. In: **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, p. V003T04A067, 2016.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A. C.; VAN ERCK, R. P. Assessing the sustainability performances of industries. **Journal of cleaner production,** v. 13, n. 4, p. 373-385, 2005.

LASI. H.; FETKKE. P.; KEMPER H. G.; FELD. T.; HOFFMANN. M. Industry 4.0. **Business & information systems engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LEYH, C.; MARTIN, S.; SCHÄFFER, T. Industry 4.0 and Lean Production—A matching relationship? An analysis of selected Industry 4.0 models. In: **2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)**. IEEE, p. 989-993, 2017. https://doi.org/10.15439/2017F365.

LOPES, A. P. V. B. V.; CARVALHO, M. M. Evolution of the open innovation paradigm: Towards a contingent conceptual model. **Technological Forecasting and Social Change,** v. 132, p. 284-298, 2018.

MARQUES, K. Manufatura aditiva: o futuro do mercado industrial de fabricação e inovação. **EESC-Escola de Engenharia de São Carlos, USP-Universidade de São Paulo**, 2014.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Transformações digitais no Brasil:** insights sobre o nível de maturidade digital das empresas no país. 2019. Disponível em: https://www.mckinsey.com/br/our-insights/transformacoes-digitais-no-brasil#. Acesso em: 01 jun. 2020.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** São Paulo: Elsevier, 2018.

MILES, M. B.; HUBERMAN, A. Michael. **Qualitative data analysis:** An expanded sourcebook. Sage, 1994.

NEELY, A. The evolution of performance measurement research: Developments in the last decade and a research agenda for the next. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 12, p. 1264-1277, 2005.

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

OZANNE, K. L.; PHIPPS. M.; WEAVER, T.; CARRINGTON, M.; LUCHS, M.; JESSE, C.; GUPTA, S.; SANTOS, N.; SCOTT, K.; WILLIAMS, J. Managing the Tensions at the Intersection of the Triple Bottom Line: A paradox theory approach to sustainability management. **Journal of Public Policy & Marketing**, v. 35, n. 2, p. 249-261, 2016.

PALMA, J. M. B.; BUENO, U. S.; STOROLLI, W. G.; SCHIAVUZZO, P. L.; CESAR, F. I. G.; MAKIYA, I. K. Os princípios da Indústria 4.0 e os impactos na sustentabilidade da cadeia de valor empresarial. **6th International Workshop | Advances in Cleaner Production – Academic Work,** 2017.

PERALES, D. P.; VALERO, F. A.; GARCÍA, A. B. Industry 4.0: a classification scheme. **Closing the gap between practice and research in industrial engineering**. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Springer, Cham p. 343-350, 2018. https://doi.org/10. 100/978-3-319-58409-6_38.

PRASAD, S.; TATA, J. Publication patterns concerning the role of teams/groups in the information systems literature from 1990 to 1999. **Information & Management,** v. 42, n. 8, p. 1137-1148, 2005.

RAO, S. K.; PRASAD, R. Impact of 5G technologies on smart city implementation. **Wireless Personal Communications**, v. 100, n. 1, p. 161-176, 2018. https://doi.org/10.1007/s11277-018-5618-4.

RAUCH, E.; DALLINGER, M.; DALLASEGA, P.; MATT, D. T. Sustainability in manufacturing through distributed manufacturing systems (DMS). **Procedia CIRP**, v. 29, p. 544-549, 2015.

ROSS, J.; SEBASTIAN, I.; BEATH, C.; SCANTLEBURY, S.; MOCKER, M.; FONSTAD, N.; KAGAN, M.; MOLONEY, K.; GERAGHTY, K. Designing Digital Organizations. **MIT Center for IS Research,** v. 46, 2016.

SACOMANO, J. B.; GONÇALVES, R. F.; BONILLA, S. H.; DA SILVA, M. T.; SÁTYRO, W. C. **Indústria 4.0**. Editora Blucher, 2018.

SANDENGEN, O. C.; ESTENSEN, L. A.; RØDSETH, H.; SCHJØLBERG, P. High Performance Manufacturing-An Innovative Contribution towards Industry 4.0. In: **6th international workshop of advanced manufacturing and automation**. Atlantis Press, 2016. p. 14-20.

SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: Desafios E Oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento,** v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SCHUH, G.; POTENTE, T.; POTENTE, W. C.; WEBER, A. R.; PROTE, J. P. Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. **Procedia Cirp**, v. 19, p. 51-56, 2014.

SCHULES, M. V.; CLETO, M. G. Impactos da Indústria 4.0 em sustentabilidade: uma revisão da literatura. In: **VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2017,** Ponta Grossa. Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2017.

SCOPUS. **Welcome to Scopus preview.** 2009. Disponível em: https://www.scopus.com/home.uri. Acesso em:20 jan. 2021.

SHAFIQ, S. I.; SANIN, C.; SZCZERBICKI, E.; TORO, C. Virtual engineering object/virtual engineering process: a specialized form of cyber physical system for Industrie 4.0. **Procedia Computer Science,** v. 60, p. 1146-1155, 2015.

SOUSA, A. B. L. D.; JABBOUR, C. J. C.; FOROPON, C.; GODINHO FILHO, M. When titans meet–Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 18-25, 2018.

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

SYBERFELDT, A.; DANIELSSON, O.; GUSTAVSSON, P. Augmented reality smart glasses in the smart factory: Product evaluation guidelines and review of available products. **Ieee Access**, v. 5, p. 9118-9130, 2017.

TAN, H. X.; YEO, Z.; NG, R.; TJANDRA, T. B.; SONG, B. A sustainability indicator framework for Singapore small and medium-sized manufacturing enterprises. **Procedia CIRP,** v. 29, p. 132-137, 2015.

THOBEN, K. D.; WIESNER, S.; WUEST, T. "Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. **International journal of automation technology**, v. 11, n. 1, p. 4-16, 2017.

U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE. **Sustainable Manufacturing Initiative.** 2011. Disponível em: https://www.oecd.org/sti/ind/45010349.pdf. Acesso em: 20/04/2020.

VOSVIEWER. **Visualizing scientific landscapes.** 2010. Disponível em: https://www.vosviewer.com/. Acesso em: 14 fev. 2021.

WAIBEL, M. W.; STEENKAMP, L. P.; MOLOKO, N.; OOSTHUIZEN, G. A. Investigating the effects of smart production systems on sustainability elements. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 731-737, 2017.

YIN, R. K. **Estudo de caso:** Planejamento e métodos. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In: **2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)**. IEEE, p. 2147-2152, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A

ROTEIRO DE ENTREVISTA

CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO E DO ENTREVISTADO

1. Nome do entrevistado:
2. E-mail do entrevistado:
3. Função do entrevistado:
4. Tempo de experiência:
5. Nome da Organização:
6. Setor de atuação da organização:

   ☐*Manufatura*

   ☐*Manufatura e serviço*

   ☐*Serviço*

   ☐*Setor público*

   ☐*Outros*
7. Número de funcionários:

   ☐ Menos do que 10

   ☐ Entre 10 e 50

   ☐ Entre 51 e 500

   ☐ Mais do que 500

INDÚSTRIA 4.0

BLOCO I - HABILITADORAS DA I4.0

1. Quais são as tecnologias emergentes da Indústria 4.0 que estão inseridas na sua empresa? Ano de implantação?

☐Robôs.

☐Simulação

☐Sistema Ciber-Físicos (CPS).

☐IoT.

☐Segurança Cibernética.

☐Nuvem (cloud).

☐Manufatura Aditiva.

☐Realidade Aumentada.

☐*Big data Analytics*.

Tem alguma que está na iminência de ser implantada? Para que ano? Explique

BLOCO II – IMPACTOS DA I4.0

2) Das Tecnologias utilizadas em sua empresa, o que foi impactado, quanto a inserção das tecnologias no setor que sua empresa está inserida? Justifique sua resposta (detalhes).

→ **Robôs**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **Simulação**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **CPS**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **IoT**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **Segurança Cibernética**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **Cloud (nuvem)**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **Manufatura Aditiva**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **Realidade Aumentada**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

→ **Big Data Analytics**

Tempo de implementação: ____

☐ Flexibilidade no processo

☐ Eficiência no Processo

☐ Granularidade dos Dados

☐ Quantidade de Dados

☐ Automação

BLOCO III – DIMENSÕES E RESULTADOS

Descreva os principais resultados (qualitativamente e quantitativamente). Compare os indicadores antes da implementação, descritos no bloco IV:

→ **Robôs**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **Simulação**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **CPS**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **IoT**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **Segurança Cibernética**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **Cloud (nuvem)**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **Manufatura Aditiva**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **Realidade Aumentada**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

→ **Big data Analytics**

☐ Trouxe melhor desempenho no processo

☐ Trouxe melhor uso sustentável dos recursos

☐ Melhores Condições de Trabalho

BLOCO IV– IMPACTOS NA IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0 SOBRE OS INDICADORES DA SUSTENTABILIDADE

Com o objetivo de analisar os impactos na implementação das tecnologias da I4.0 através dos indicadores da sustentabilidade, foi proposto um quadro para avaliação.

APÊNDICE B

Impactos na Implementação das Tecnologias da I4.0 sobre os Indicadores da Sustentabilidade

		→ Robôs		→ Simulação		→ CPS		→ IoT		→ Segurança Cibernética		→ Cloud		→ Manufatura Aditiva		→ Realidade Aumentada		→ Big Data Analytics	
		Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação
Econômico	Transparência de custos																		
	Eficiência, flexibilidade																		
	Personalização e qualidade																		
	Prazos de entrega																		
	Novos modelos de negócios																		
	Grandes investimentos necessários																		
	Rentabilidade incerta																		
	Demanda incerta do cliente																		
Ambiental	Transparência das emissões de gases de efeito estufa																		
	Eficiência de recursos e energia																		
	Redução de resíduos																		
	Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização																		
	Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas																		
Social	Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários																		
	Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos																		
	Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir																		
	Transformação organizacional necessária																		
	Rede, ambiente e política influenciam a adoção da tecnologia																		

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE C

Dados obtidos na entrevista com a Alta Gestão sobre o período (em anos) da implementação da Tecnologia

Tecnologia	Gerência: Segurança, Meio Ambiente e Saúde	Gerência de Projetos	Gerência de Operações	MÉDIA	MEDIANA	CV%
Robôs	3	5	1	3,0	3,0	67%
Simulação	0	0	0	0,0	0,0	0%
CPS	3	0	1	1,3	1,0	115%
IoT	1,5	2	1	1,5	1,5	33%
Cloud	1,5	2	1	1,5	1,5	33%
Segurança Cibernética	1,5	0	0	0,5	0,0	173%
Manufatura Aditiva	0	2	2	1,3	2,0	87%
Realidade Aumentada	1	0	0	0,3	0,0	173%
Big Data Analytics	1	2	0	1,0	1,0	100%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE D

Dados obtidos na entrevista com a Filial A sobre o período (em anos) da implementação da Tecnologia

Tecnologia	Gerência: Segurança, Meio Ambiente e Saúde	Gerência de Projetos	Gerência de Operações	MÉDIA	MEDIANA	CV%
Robôs	3	5	1	3,0	3,0	67%
Simulação	0	0	0	0,0	0,0	0%
CPS	3	0	1	1,3	1,0	115%
IoT	1,5	2	1	1,5	1,5	33%
Cloud	1,5	2	1	1,5	1,5	33%
Segurança Cibernética	1,5	0	0	0,5	0,0	173%
Manufatura Aditiva	0	2	2	1,3	2,0	87%
Realidade Aumentada	1	0	0	0,3	0,0	173%
Big Data Analytics	1	2	0	1,0	1,0	100%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE E

Dados obtidos na entrevista com a Fábrica B sobre o período (em anos) da implementação da Tecnologia

Tecnologia	Gerência: Segurança, Meio Ambiente e Saúde	Gerência de Projetos	Gerência de Operações	MÉDIA	MEDIANA	CV%
Robôs	4	5	5	4,7	5,0	12%
Simulação	0	0	0	0,0	0,0	0%
CPS	0	0	3	1,0	0,0	173%
IoT	1	3	0	1,3	1,0	115%
Cloud	1	3	0	1,3	1,0	115%
Segurança Cibernética	0	0	0	0,0	0,0	0%
Manufatura Aditiva	0	2	0	0,7	0,0	173%
Realidade Aumentada	1	2	0	1,0	1,0	100%
Big Data Analytics	0	1	0	0,3	0,0	173%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE F

Dados obtidos na entrevista com a Fábrica C sobre o período (em anos) da implementação da Tecnologia

Tecnologia	Gerência: Segurança, Meio Ambiente e Saúde	Gerência de Projetos	MÉDIA	MEDIANA	CV%
Robôs	5	5	5,0	5,0	0%
Simulação	0	0	0,0	0,0	0%
CPS	1	0	0,5	0,5	141%
IoT	1	2	1,5	1,5	47%
Cloud	0	0	0,0	0,0	0%
Segurança Cibernética	0	0	0,0	0,0	0%
Manufatura Aditiva	3	0	1,5	1,5	141%
Realidade Aumentada	1	0	0,5	0,5	141%
Big Data Analytics	1	1	1,0	1,0	0%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE G

Dados obtidos na entrevista com a Fábrica D sobre o período (em anos) da implementação da Tecnologia

Tecnologia	Gerência de Projetos	Gerência de Operações	MÉDIA	MEDIANA	CV%
Robôs	3	2	2,5	2,5	28%
Simulação	1	1	1	1	0%
CPS	3	2	2,5	2,5	28%
IoT	0	1	0,5	0,5	141%
Cloud	0	2	1	1	141%
Segurança Cibernética	0	0	0	0	0%
Manufatura Aditiva	1	2	1,5	1,5	47%
Realidade Aumentada	1	0	0,5	0,5	141%
Big Data Analytics	1	2	2,5	2,5	28%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE H

Média Obtida dos Entrevistados da Alta Gestão sobre o Impacto das Tecnologias da I4.0

Tecnologia	Flexibilidade no Processo	Eficiência no Processo	Granularidade dos Dados	Quantidade de Dados	Automação
Robôs	60%	80%	40%	0%	75%
Simulação	25%	60%	20%	25%	0%
CPS	60%	60%	20%	50%	25%
IoT	40%	80%	80%	50%	50%
Cloud	40%	60%	80%	50%	50%
Segurança Cibernética	20%	20%	20%	0%	25%
Manufatura Aditiva	80%	60%	20%	0%	0%
Realidade Aumentada	80%	80%	20%	25%	0%
Big Data Analytics	40%	60%	40%	50%	0%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE I

Média Obtida dos Entrevistados da Fábrica A sobre o Impacto das Tecnologias da I4.0

Tecnologia	Flexibilidade no Processo	Eficiência no Processo	Granularidade dos Dados	Quantidade de Dados	Automação
Robôs	50%	67%	0%	0%	67%
Simulação	0%	0%	0%	0%	0%
CPS	50%	50%	0%	0%	100%
IoT	50%	100%	100%	100%	0%
Cloud	0%	100%	67%	100%	0%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	33%	33%	0%	0%	0%
Realidade Aumentada	33%	33%	0%	0%	0%
Big Data Analytics	50%	0%	67%	67%	33%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE J

Média Obtida dos Entrevistados da Fábrica B sobre o Impacto das Tecnologias da I4.0

Tecnologia	Flexibilidade no Processo	Eficiência no Processo	Granularidade dos Dados	Quantidade de Dados	Automação
Robôs	100%	100%	50%	50%	100%
Simulação	0%	0%	0%	0%	0%
CPS	50%	50%	50%	50%	50%
IoT	50%	50%	67%	67%	67%
Cloud	50%	50%	67%	67%	50%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	33%	33%	0%	0%	0%
Realidade Aumentada	50%	33%	0%	0%	0%
Big Data Analytics	0%	0%	33%	33%	0%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE K

Média Obtida dos Entrevistados da Fábrica C sobre o Impacto das Tecnologias da I4.0

Tecnologia	Flexibilidade no Processo	Eficiência no Processo	Granularidade dos Dados	Quantidade de Dados	Automação
Robôs	100%	100%	0%	0%	100%
Simulação	0%	50%	50%	0%	50%
CPS	0%	0%	0%	0%	0%
IoT	50%	100%	100%	0%	0%
Cloud	50%	50%	50%	0%	0%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	0%	0%	0%	0%	0%
Realidade Aumentada	0%	50%	50%	0%	0%
Big Data Analytics	50%	50%	50%	50%	50%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE L

Média Obtida dos Entrevistados da Fábrica D sobre o Impacto das Tecnologias da I4.0

Tecnologia	Flexibilidade no Processo	Eficiência no Processo	Granularidade dos Dados	Quantidade de Dados	Automação
Robôs	0%	50%	0%	0%	100%
Simulação	0%	0%	0%	50%	0%
CPS	0%	100%	0%	0%	0%
IoT	0%	100%	50%	0%	0%
Cloud	50%	0%	0%	0%	0%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	0%	50%	0%	0%	50%
Realidade Aumentada	50%	0%	0%	0%	50%
Big Data Analytics	0%	0%	100%	0%	0%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE M

Média Obtida dos Entrevistados da Alta Gestão sobre as dimensões e resultados relacionado ao TBL.

Tecnologia	Trouxe melhor desempenho no processo	Trouxe melhor uso sustentável dos recursos	Melhores Condições de Trabalho
Robôs	80%	80%	80%
Simulação	40%	40%	20%
CPS	60%	60%	40%
IoT	60%	80%	40%
Cloud	80%	60%	40%
Segurança Cibernética	40%	40%	20%
Manufatura Aditiva	60%	40%	40%
Realidade Aumentada	100%	40%	100%
Big Data Analytics	80%	60%	40%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE N

Média obtida dos entrevistados da Fábrica A sobre as dimensões e resultados relacionado ao TBL

Tecnologia	Trouxe melhor desempenho no processo	Trouxe melhor uso sustentável dos recursos	Melhores Condições de Trabalho
Robôs	100%	67%	100%
Simulação	0%	0%	0%
CPS	50%	0%	100%
IoT	67%	100%	33%
Cloud	100%	67%	33%
Segurança Cibernética	50%	0%	0%
Manufatura Aditiva	0%	67%	0%
Realidade Aumentada	0%	33%	33%
Big Data Analytics	67%	33%	67%

Fonte: Autor, 2021.

APÊNDICE O

Média obtida dos entrevistados da Fábrica B sobre as dimensões e resultados relacionado ao TBL

Tecnologia	Trouxe melhor desempenho no processo	Trouxe melhor uso sustentável dos recursos	Melhores Condições de Trabalho
Robôs	100%	50%	100%
Simulação	0%	0%	0%
CPS	50%	50%	50%
IoT	67%	67%	67%
Cloud	50%	67%	50%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	33%	33%	0%
Realidade Aumentada	50%	0%	67%
Big Data Analytics	0%	33%	0%

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE P

Média obtida dos entrevistados da Fábrica C sobre as dimensões e resultados relacionado ao TBL

Tecnologia	Trouxe melhor desempenho no processo	Trouxe melhor uso sustentável dos recursos	Melhores Condições de Trabalho
Robôs	100%	0%	100%
Simulação	50%	50%	50%
CPS	0%	0%	0%
IoT	100%	100%	100%
Cloud	50%	50%	50%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	0%	0%	0%
Realidade Aumentada	50%	50%	0%
Big Data Analytics	100%	100%	0%

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE Q

Média obtida dos entrevistados da Fábrica D sobre as dimensões e resultados relacionado ao TBL.

Tecnologia	Trouxe melhor desempenho no processo	Trouxe melhor uso sustentável dos recursos	Melhores Condições de Trabalho
Robôs	50%	0%	50%
Simulação	0%	50%	0%
CPS	50%	0%	50%
IoT	50%	50%	0%
Cloud	50%	0%	0%
Segurança Cibernética	0%	0%	0%
Manufatura Aditiva	50%	50%	0%
Realidade Aumentada	100%	0%	50%
Big Data Analytics	100%	50%	0%

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE R

Média obtida dos Entrevistados da Fábrica A quanto aos Impactos na Implementação das Tecnologias da I4.0 sobre os Indicadores Da Sustentabilidade

		→ Robôs		→ Simulação		→ CPS		→ IoT		→ Segurança Cibernética		→ Cloud		→ Manufatura Aditiva		→ Realidade Aumentada		→ Big Data Analytics	
		Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação
Econômico	Transparência de custos	4	8	0	0	5	9	3	8	0	0	2	6	4	6	0	0	0	0
	Eficiência, flexibilidade	2	9	0	0	2	9	2	9	0	0	3	6	2	6	0	0	0	0
	Personalização e qualidade	3	8	0	0	4	8	4	8	0	0	4	6	3	4	0	0	0	0
	Prazos de entrega	1	3	0	0	1	3	2	4	0	0	2	3	2	6	0	0	0	0
	Novos modelos de negócios	2	9	0	0	1	9	2	8	0	0	2	4	2	6	0	0	0	0
	Grandes investimentos necessários	8	8	0	0	8	8	8	9	0	0	5	6	6	8	0	0	0	0
	Rentabilidade incerta	2	6	0	0	2	6	2	6	0	0	2	4	2	8	0	0	0	0
	Demanda incerta do cliente	8	9	0	0	8	9	8	9	0	0	5	8	6	7	0	0	0	0
Ambiental	Transparência das emissões de gases de efeito estufa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
	Eficiência de recursos e energia	3	9	0	0	3	9	4	5	0	0	4	5	0	1	0	0	0	0
	Redução de resíduos	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização	2	6	0	0	3	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas	5	8	0	0	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Social	Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários	3	10	0	0	5	10	5	10	0	0	5	10	2	6	0	0	0	0
	Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos	9	10	0	0	6	10	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
	Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir	5	9	0	0	5	10	5	10	0	0	5	10	4	9	0	0	0	0
	Transformação organizacional necessária	4	9	0	0	4	9	3	8	0	0	4	8	3	5	0	0	0	0
	Rede, ambiente e política influenciam a adoção da	2	5	0	0	2	4	4	9	0	0	5	8	3	7	0	0	0	0

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE S

Média obtida dos Entrevistados da Fábrica B quanto aos Impactos na Implementação das Tecnologias da I4.0 sobre os Indicadores da Sustentabilidade

		→ Robôs		→ Simulação		→ CPS		→ IoT		→ Segurança Cibernética		→ Cloud		→ Manufatura Aditiva		→ Realidade Aumentada		→ Big Data Analytics	
		Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação
Econômico	Transparência de custos	1	6	0	0	0	0	1	6	0	0	1	5	0	0	0	4	0	0
	Eficiência, flexibilidade	1	9	0	0	0	0	1	6	0	0	1	8	0	0	0	4	0	0
	Personalização e qualidade	4	7	0	0	0	0	2	7	0	0	1	7	0	0	1	5	0	0
	Prazos de entrega	2	6	0	0	0	0	2	7	0	0	3	8	0	0	2	7	0	0
	Novos modelos de negócios	1	6	0	0	0	0	2	7	0	0	2	7	0	0	1	5	0	0
	Grandes investimentos necessários	1	7	0	0	0	0	1	6	0	0	1	5	0	0	0	4	0	0
	Rentabilidade incerta	1	8	0	0	0	0	1	8	0	0	1	8	0	0	0	4	0	0
	Demanda incerta do cliente	3	8	0	0	0	0	1	6	0	0	1	6	0	0	0	5	0	0
Ambiental	Transparência das emissões de gases de efeito estufa	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Eficiência de recursos e energia	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Redução de resíduos	0	9	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização	0	6	0	0	0	0	1	6	0	0	2	7	0	0	0	0	0	0
	Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas	0	5	0	0	0	0	2	7	0	0	1	8	0	0	0	5	0	0
Social	Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários	3	9	0	0	0	0	2	6	0	0	3	7	0	0	3	8	0	0
	Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos	5	9	0	0	0	0	2	7	0	0	2	6	0	0	3	7	0	0
	Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir	3	8	0	0	0	0	2	7	0	0	2	6	0	0	2	7	0	0
	Transformação organizacional necessária	4	7	0	0	0	0	2	7	0	0	1	5	0	0	3	8	0	0
	Rede, ambiente e política influenciam a adoção da tecnologia	3	7	0	0	0	0	1	6	0	0	1	6	0	0	3	7	0	0

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE T

Média Obtida dos Entrevistados da Fábrica C quanto aos Impactos na Implementação das Tecnologias da I4.0 sobre os Indicadores da Sustentabilidade

		→ Robôs		→ Simulação		→ CPS		→ IoT		→ Segurança Cibernética		→ Cloud		→ Manufatura Aditiva		→ Realidade Aumentada		→ Big Data Analytics	
		Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação
Econômico	Transparência de custos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Eficiência, flexibilidade	5	9	0	0	6	8	6	8	0	0	0	0	7	8	0	0	9	0
	Personalização e qualidade	7	6	0	0	7	7	8	7	0	0	0	0	8	8	0	0	9	0
	Prazos de entrega	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Novos modelos de negócios	9	0	0	0	9	0	9	0	0	0	0	0	9	0	0	0	9	0
	Grandes investimentos necessários	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rentabilidade incerta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Demanda incerta do cliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ambiental	Transparência das emissões de gases de efeito estufa	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Eficiência de recursos e energia	7	8	0	0	8	8	8	8	0	0	0	0	7	8	0	0	8	0
	Redução de resíduos	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
Social	Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários	6	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos	0	0	0	0	4	3	4	3	0	0	0	0	4	3	0	0	4	0
	Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transformação organizacional necessária	6	9	0	0	6	7	6	7	0	0	0	0	6	7	0	0	9	0
	Rede, ambiente e política influenciam a adoção da tecnologia	8	8	0	0	7	7	8	8	0	0	0	0	8	8	0	0	9	0

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE U

Média Obtida dos Entrevistados da Fábrica D quanto aos Impactos na Implementação das Tecnologias da I4.0 sobre os Indicadores da Sustentabilidade

		→ Robôs		→ Simulação		→ CPS		→ IoT		→ Segurança Cibernética		→ Cloud		→ Manufatura Aditiva		→ Realidade Aumentada		→ Big Data Analytics	
		Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação	Antes da Implementação	Pós Implementação
Econômico	Transparência de custos	2	4	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	1	0	1	4	2	4
	Eficiência, flexibilidade	4	8	0	0	0	0	4	7	0	0	2	7	2	2	2	6	2	4
	Personalização e qualidade	3	5	0	0	0	0	3	7	0	0	2	5	1	2	2	7	2	4
	Prazos de entrega	3	6	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	1	1	1	4	1	1
	Novos modelos de negócios	2	4	0	0	0	0	2	6	0	0	0	0	1	2	2	7	1	3
	Grandes investimentos necessários	3	8	0	0	0	0	2	6	0	0	4	7	2	1	3	8	3	5
	Rentabilidade incerta	2	9	0	0	0	0	3	5	0	0	1	1	2	1	3	4	2	2
	Demanda incerta do cliente	3	7	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	1	4	1	3
Ambiental	Transparência das emissões de gases de efeito estufa	1	5	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	1	4	1	2
	Eficiência de recursos e energia	1	6	0	0	0	0	2	6	0	0	0	0	1	1	1	4	2	4
	Redução de resíduos	2	4	0	0	0	0	2	6	0	0	1	4	1	1	2	6	1	3
	Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização	2	5	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	1	4	1	1
	Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas	4	5	0	0	0	0	2	7	0	0	0	0	1	2	1	4	1	2
Social	Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários	3	7	0	0	0	0	2	5	0	0	1	3	1	3	1	6	1	4
	Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos	6	5	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	1	4	1	1
	Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir	5	8	0	0	0	0	3	8	0	0	3	8	2	2	3	8	2	5
	Transformação organizacional necessária	3	5	0	0	0	0	2	7	0	0	2	8	1	2	3	6	1	5
	Rede, ambiente e política influenciam a adoção da tecnologia	3	7	0	0	0	0	2	5	0	0	2	4	1	2	2	6	2	4

Fonte: Autor (2021).