

Influência da Indústria 4.0 na sustentabilidade: um enfoque no *Tripple Bottom Line*

1 Introdução

A indústria 4.0 (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, o 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 (Alcácer e Machado, 2018).

Para Martin *et al.* (2017), a I4.0 pode ser considerada como um fluxo inteligente de um sistema de produção, através de sistemas flexíveis 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. De fato, estudos prévios como de Fitzgerald *et al.* (2013) e Ross *et al.* (2016) destacam que as tecnologias digitais estão cada vez mais sendo vistas como ferramentas decisivas para obter vantagem competitiva no atual ambiente competitivo. Para Matt *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. Neste sentido, a transformação digital requer novas capacidades e as organizações necessitam repensar e, possivelmente, reinventar seu modelo de negócio para se manterem competitivas (CARCARY et al., 2016).

A Indústria 4.0 pode ser encarada como uma evolução dos modelos industriais anteriormente adotados ou como uma nova concepção associada ao conceito da sustentabilidade em que é necessário a utilização dos recursos como matéria-prima, energia e água de forma mais eficiente e sustentável.

Nesse novo contexto, surgem questões de como avaliar métodos, processos e ações de adoção das tecnologias habilitadoras que, ao mesmo tempo possam auxiliar na melhoria os indicadores da sustentabilidade em diversos modelos de negócios. Desta forma, diante destas tecnologias habilitadoras da I4.0 há um novo cenário de criação de produtos, processos e

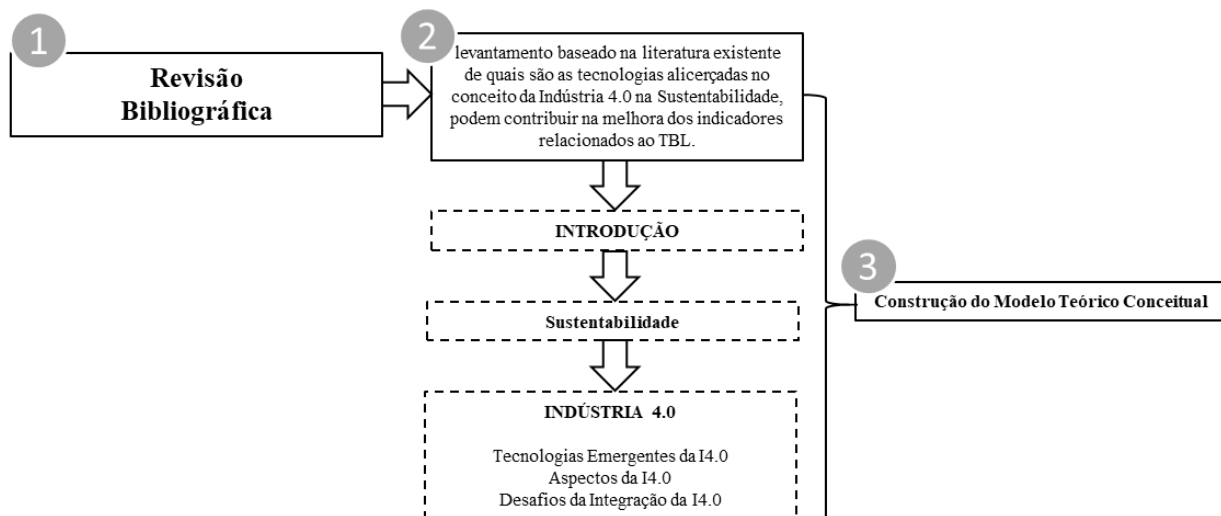
procedimentos integrados, formando um ecossistema digital entre todos os *stakeholders* de uma empresa. Assim, surgimento da manufatura sustentável tem como objetivo causar o mínimo de impacto negativo ao meio ambiente, conservando todos os recursos naturais e de energia, de forma que possa também viabilizar economicamente a segurança dos funcionários e das comunidades em que as empresas estão inseridas.

2 Problema de pesquisa, objetivo e metodologia

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 que norteou esse artigo consiste em conhecer como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir na melhoria dos indicadores relacionados ao *triple bottom line* (TBL). Para responder essa pergunta, o principal objetivo é entender como a literatura trata a adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 para a melhoria dos indicadores da Sustentabilidade (TBL). Assim, as etapas desta pesquisa consistiram em, primeiramente, realizar uma bibliometria sobre como as tecnologias alicerçadas no conceito da Indústria 4.0 podem contribuir na melhora dos indicadores relacionados ao TBL.

A bibliometria tem um papel relevante na análise da produção científica relacionada às capacidades, uma vez que seus resultados retratam o grau de desenvolvimento de uma área do conhecimento. Assim, com esta etapa, pretende-se construir os mapas dos principais clusters de pesquisadores, artigos mais relevantes, linhas teóricas mais sólidas e aceitas e etc.

Posteriormente, essa literatura foi sistematizada em um modelo teórico-conceitual para descrever a relação das tecnologias da I4.0 quanto a melhora dos indicadores relacionados ao TBL, apresentando as oportunidades de utilização na Figura 1.



Fonte: Autores (2020)

A primeira etapa desta pesquisa consistiu em realizar uma revisão sistemática da literatura, através de uma análise bibliométrica (CARVALHO, FLEURY; LOPES, 2013; LOPES; CARVALHO, 2018).

A base de dados escolhida para amostra inicial foi a Web of Science 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 <i>Scopus</i>
Palavras-Chave	<i>(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))</i>
Quantidade de Pesquisas Encontradas	10

Fonte: Autores (2019)

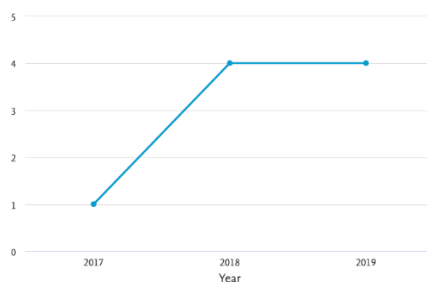
3 Resultados

3.1 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 2 nota-se um crescente interesse da comunidade acadêmica em analisar o cenário da Indústria 4.0 e a sustentabilidade. Observa-se que o maior pico de publicações tem vista no ano de 2018 e 2019. Foi identificado o número de ocorrências em cada documento, conforme apresentado no Quadro 2 e na Figura 3. 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. O Quadro 2 apresenta a relação dos principais autores e a relação do número de citações na base de dados *Scopus*.

A Figura 4 identifica os países com maiores números de publicação, de acordo com os 10 documentos obtidos. A maioria dos artigos são oriundos da Alemanha, na sequência Áustria e Estados Unidos.

Figura 2 – Publicações por Ano



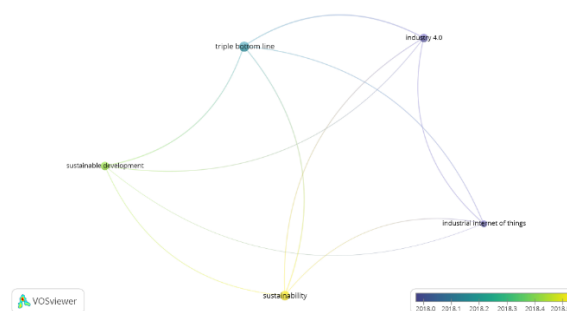
Fonte: *Scopus* (2019)

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: Autores (2019)

Figura 3 – Sobreposição pelas palavras-chave



Fonte: Vosviewer (2019)

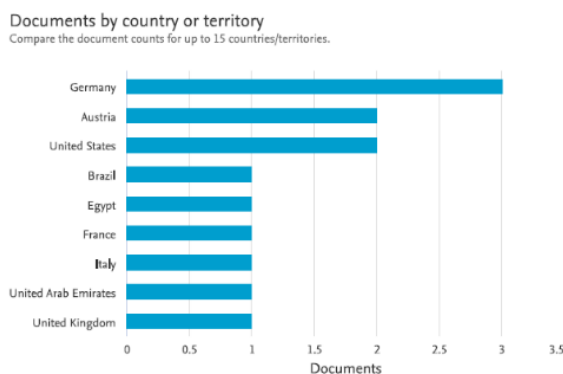
Quadro 3 – Artigos sobre Indústria 4.0, Sustentabilidade e TBL

Título	Autores	Ano	Journal	Número de Citações
<i>Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0</i>	Kiel, D., Müller, J.M., Arnold, C., Voigt, K.-I.	2017	International Journal of Innovation Management 21(8),1740015	30
<i>The Avon River Basin in 2050: Scenario planning in the Western Australian Wheatbelt</i>	O'Connor, M.H., McFarlane, M., Fisher, J., MacRae, D., Lefroy, T.	2005	Australian Journal of Agricultural Research 56(6), pp. 563-580	14
<i>Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025</i>	Müller, J.M., Voigt, K.-I.	2018	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology 5(5), pp. 659-670	10
<i>Cooperation in R & D and eco-innovations: The role in companies' socioeconomic performance</i>	Tumelero, C., Sbragia, R., Evans, S.	2019	Journal of Cleaner Production 207, pp. 1138-1149	02
<i>Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers</i>	Birkel, H.S., Veile, J.W., Müller, J.M., Hartmann, E., Voigt, K.-I.	2019	Sustainability (Switzerland) 11(2),384	01
<i>State of apps targeting management for sustainability of agricultural landscapes. A review</i>	Eichler Inwood, S.E., Dale, V.H.	2019	Agronomy for Sustainable Development 39(1),8	00

<i>Exploring organizational sustainability of Industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company</i>	Baccini, A.M., Margherita, E.G.	2018	Sustainability (Switzerland) 11(1),36	00
<i>A framework to help decision makers to be environmentally aware during the maintenance of cyber physical systems</i>	Sénéchal, O., Trentesaux, D.	2019	Environmental Impact Assessment Review, 77, pp. 11-22.	00
<i>The industrial internet of things models, challenges and opportunities in sustainable manufacturing</i>	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
<i>Proposing a sustainability course in industrial, manufacturing and systems engineering program</i>	Garbie, I.H., Bashir, H.A.	2018	IISE Annual Conference and Expo 2018	00

Fonte: Scopus (2019)

Figura 4 – Relação de Documentos pelo país de contribuição



Fonte: Scopus (2019)

A revisão da literatura foi realizada a partir da leitura desses artigos somada a outros artigos que não entraram nos filtros, lidos na íntegra em que foram encontradas contribuições relevantes à construção do modelo.

4 Revisão da literatura

4.1 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 *et al.* (2016), as três revoluções anteriores levaram à quebra de paradigmas quanto à 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

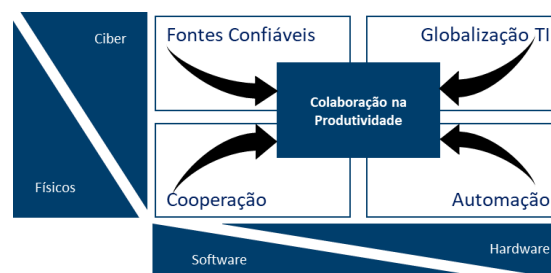
e a terceira caracterizada pela inserção da automação. A quarta revolução industrial é reconhecida pela introdução da Internet das Coisas (IoT) no contexto do desenvolvimento dos processos autônomos de manufatura, no que tange à integração de serviços juntos aos processos de manufatura em fábricas inteligentes, 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 et. al., 2016).

A utilização das tecnologias da I4.0 obteve um grande avanço, pois segundo Santos *et al.*, (2018), tem como objetivo tornar os sistemas de produção mais colaborativos e flexíveis, através da fusão entre o mundo físico e virtual, formando os sistemas ciber- físicos (CPS). Nesses sistemas, 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 ambiental.

Segundo Schuh *et al.*, (2014) o sistema pode ser classificado em dois níveis: o primeiro é destacado pelo nível de sistema ciber-físico e o segundo é atribuído aos elementos de um sistema de produtividade relacionados ao sistema ciber-físico.

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), fontes confiáveis, automação e cooperação (Figura 5).

Figura 5– Modelo facilitador da colaboração da produtividade



Fonte: Schuh et al. (2014)

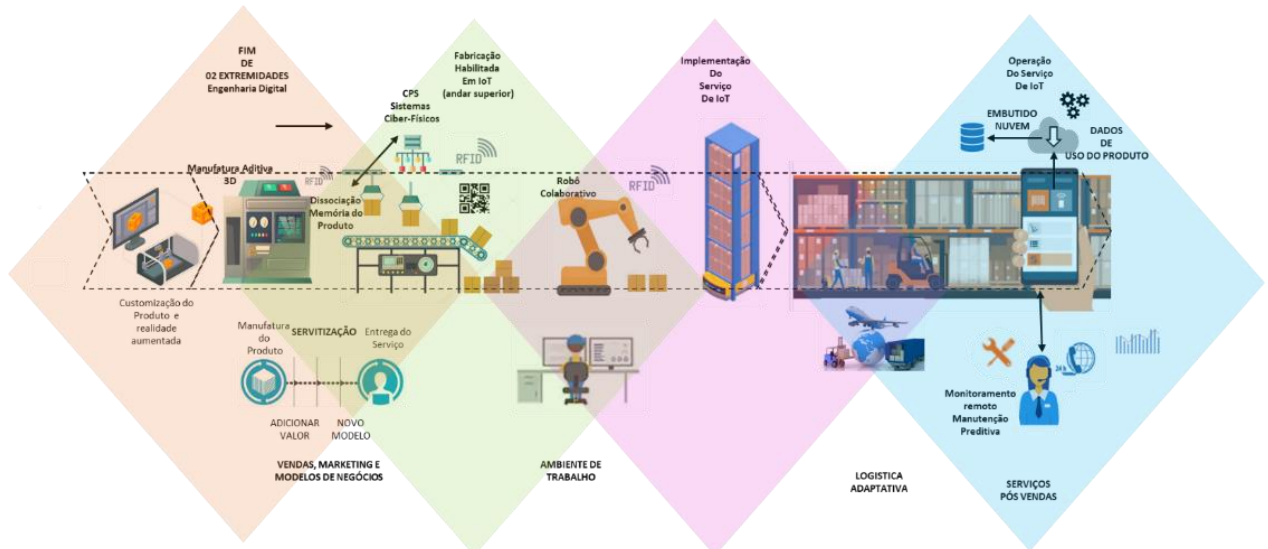
Estes quatro elementos servem para formar o sistema CS (Ciber-Físicos) envolvendo a integração entre humano-humano, máquina-humano e, máquina-máquina. Este sistema tem sido adotado cada vez mais nas organizações para aumento de produtividade e melhoria na

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.

É necessário haver sinergia entre os quatro elementos, uma vez que a ausência de qualquer um deles impossibilita o desenvolvimento do outro. 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 valor 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 – Indústria 4.0 na cadeia de valor



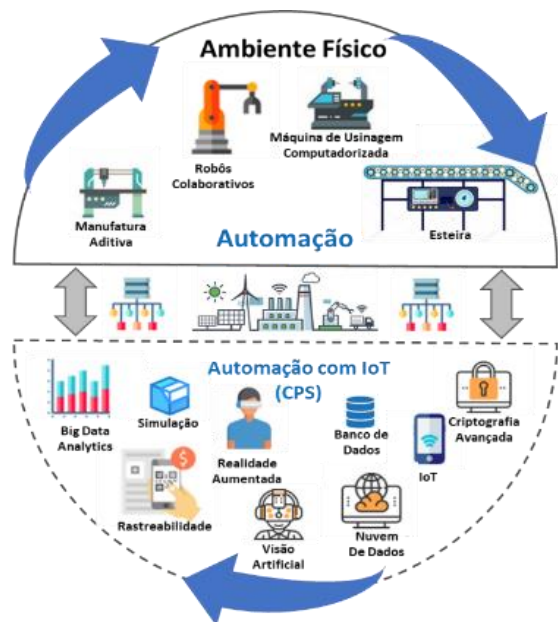
Fonte: Autores (2020)

Na aplicação de CPS, a IoT pode ser vista em cenários visando a integração entre diversos níveis e processos do produto ao consumidor. Este modelo permite o acompanhamento, consulta e intervenção por diferentes elos da cadeia, inclusive externos (fornecedores, clientes e serviços). Um cliente pode acompanhar o ciclo de desenvolvimento de um produto e além disso, obter informações sobre o estado de manutenção de um determinado produto durante o pós-venda através 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.

Diante da transformação digital da manufatura, novas tecnologias são implementadas com o objetivo de melhorar significativamente a produtividade nas fábricas. Além disso, impactam diretamente o contexto do TBL, pois melhoram as condições de trabalho onerosos e perigosos com a inserção de robôs industriais e colaborativos, favorecem o uso racional de matéria-prima e promovem a eficiência energética. Para isso, as tecnologias habilitadoras da I4.0 são destacadas em nove pilares, conforme Figura 7.

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



Fonte: Autores (2020)

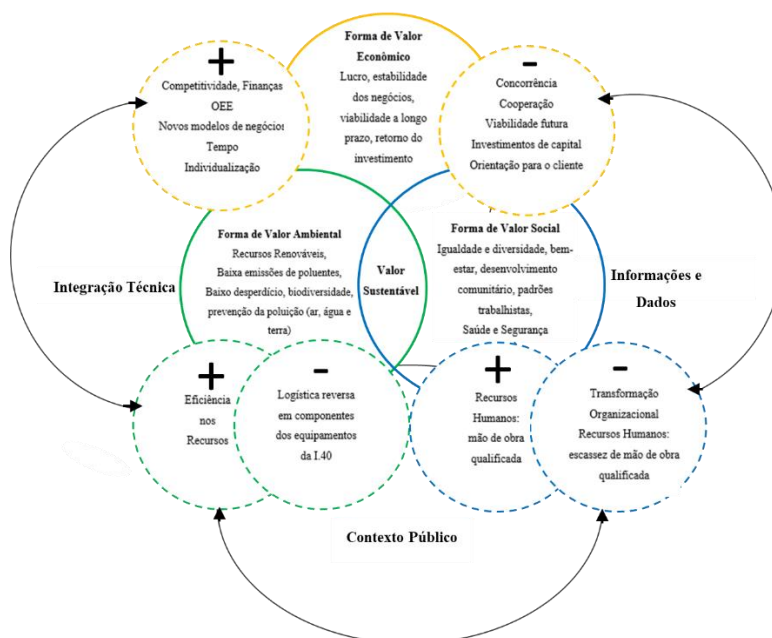
4.2 Sustentabilidade

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. Pode-se observar que houve diversas iniciativas corporativas, ou seja, produzir sem que afetasse as três dimensões da sustentabilidade: 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 das necessidades existentes, ou seja, compreende-se que, com o aumento da demanda pela inserção de tecnologias é necessário que se mantenha os recursos renováveis, as baixas emissões de poluentes, a diminuição do desperdício, mantendo assim, a biodiversidade e prevenindo a poluição de fontes naturais.

De acordo com Evans (2017), a sustentabilidade trata-se de 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.

Figura 8 – O triple bottom line (TBL)



Fonte: Autores (2020)

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. 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.

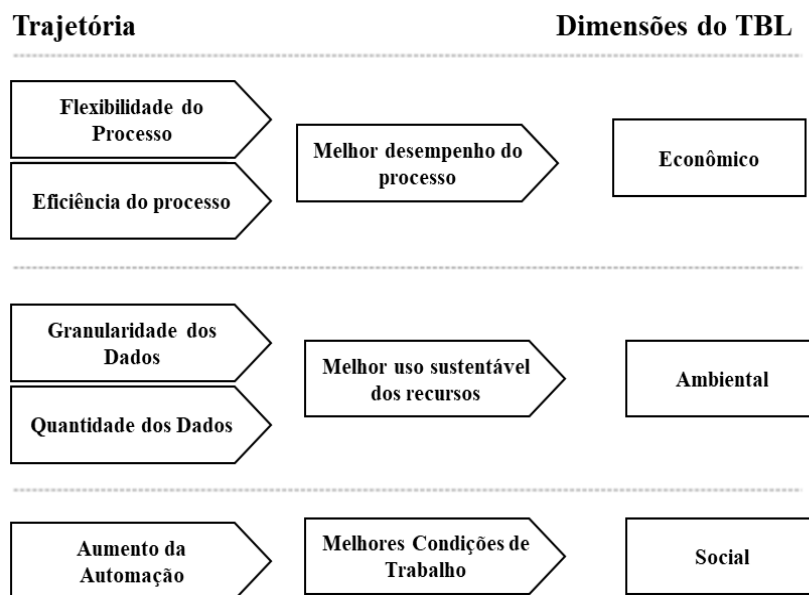
A dimensão econômica do TBL refere-se à atitude organizacional para criar valor e equilibrar custos e receitas na produção e distribuição de bens e serviços. A dimensão econômica do TBL diz respeito às dimensões do desempenho econômico e financeiro das organizações.

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).

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 de maneira conjunta. Embora as organizações busquem, em sua maioria, ter sinergias entre as formas social, ambiental e econômica da sustentabilidade, há grandes esforços sendo realizados para lidar com os conflitos nas três dimensões do TBL.

Braccini e Margherita (2018) apresentam as três dimensões do TBL e a adoção da I4.0 a partir de trajetórias individuais de cunho ambiental, econômico e social (Figura 9). Quanto à 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 desempenho na qualidade e quanto à lucratividade do negócio através da diminuição de perdas produtivas.

Figura 9 – Trajetórias da Sustentabilidade da I4.0



Fonte: Braccini e Margherita (2018)

Na dimensão ambiental é possível obter o melhor uso dos recursos quanto à granularidade e a quantidade dos dados produzidos ao usar as tecnologias digitais, pois obtém-se o melhor aproveitamento do uso dos recursos, ou seja, quanto maior o nível de granularidade, utilizam-se mais da camada no nível de *software* e, conseqüentemente, o menor uso de *hardwares*, disponibilizando servidores e, com isso reduzindo o uso de energia. Por outro lado, isto requer que os componentes de *hardware* tenham maior robustez e maior capacidade do gerenciamento dos dados.

Na trajetória social os autores tratam o avanço da automação por meio das tecnologias habilitadoras da I4.0 criando melhores condições de trabalho dentro das organizações e, em contrapartida, trazendo a necessidade que as empresas criem estruturas organizacionais para readequar a mão de obra existente, requalificando-as ou buscando novos profissionais no mercado.

Palma et. al (2017) realizou um levantamento dos principais autores correlacionando-os com o impacto no TBL. O Quadro 4 apresenta esses resultados.

Quadro 4 - Principais abordagens observadas no contexto da I4.0

Tópico	Exemplos de Impacto da I4.0 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 et al, 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 et al, 2013)	Emprego e qualidade do trabalho

Fonte: Palma et.al (2017)

Similarmente, no Quadro 5 são relacionados os princípios da I4.0. O impacto positivo (+) trata do benefício à sustentabilidade (TBL) e o impacto negativo (-) é tratado como o princípio que não beneficia a sustentabilidade nas organizações. É possível observar que existem desafios relacionados à mão de obra quanto ao pilar social, pois os processos passam a ter funcionalidade de forma autônoma. Além disso, surge a necessidade de mão de obra qualificada para se tornarem desenvolvedores destes processos.

Quadro 5 - 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: Autores “adaptado de” Palma et.al (2017)

Segundo Ozanne *et. al* (2016) há uma grande dificuldade em realizar uma investigação com relação à 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 possam contribuir com os indicadores da sustentabilidade (TBL) nos processos produtivos, pois uma abordagem integrativa e holística entre relação a gestão da tecnologia e a sustentabilidade se faz necessário.

Kagermann *et al.* (2013) também indicam a necessidade de grandes investimentos e rentabilidade incerta quanto a adoção das tecnologias habilitadoras 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 contratação de profissionais qualificados, podendo gerar problemas sociais, uma vez que perfis de trabalho precisam acompanhar as mudanças deste cenário (KIEL *et al.*, 2017).

Vários autores têm investigado os impactos negativos da I4.0. Sobre o estudo realizado por Kiel *et al.* (2017) descrito no Quadro 6, 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 6 – Literatura existente que trata dos aspectos de sustentabilidade da I4.0

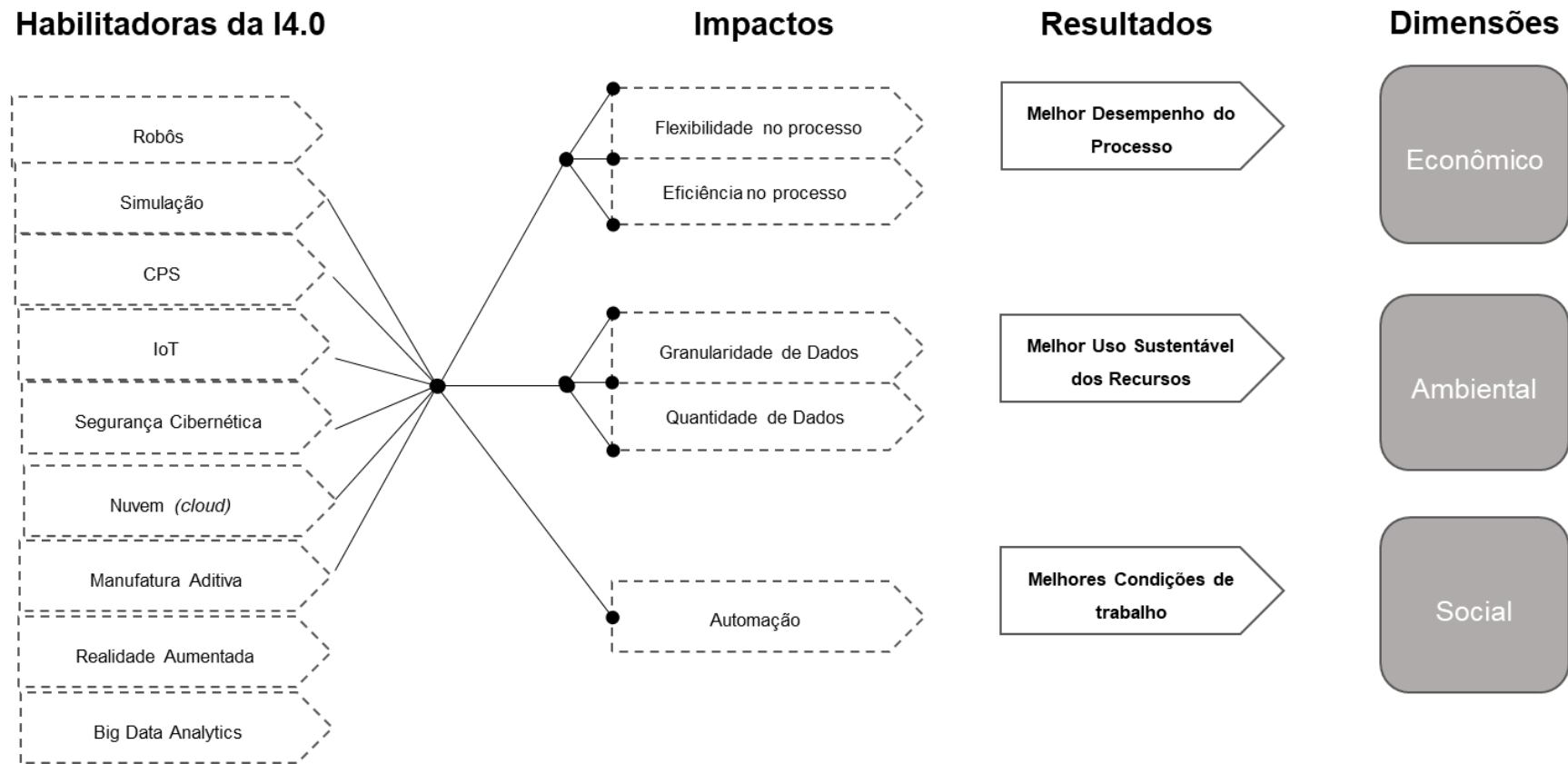
Dimensão do TBL	Breve Visão Geral dos aspectos relevantes	Literatura Encontrada
Econômica	• Maior transparência de custos	Amshoff et al. (2015)
	• Maior eficiência, flexibilidade	Arnold et al. (2016)
	• personalização e qualidade	Hofmann and Rüsch (2017)
	• Prazos de entrega mais curtos	Kagermann et al. (2013)
	• Novos modelos de negócios	Oesterreich and Teuteberg (2016)
	• Grandes investimentos necessários	Peukert et al. (2015)
	• Rentabilidade incerta	Schuhmacher and Hummel (2016)
Ecológica	• Demanda incerta do cliente	Stock and Seliger (2016) Zhou et al. (2017)
	• Transparência das emissões de gases de efeito estufa	Gabriel and Pessel (2016) Hermann et al. (2014)

	<ul style="list-style-type: none"> • Maior eficiência de recursos e energia 	Müller et al. (2017) Qiu et al. (2015)
	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de resíduos 	Sarkis and Zhu (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de processos logísticos, por exemplo, devido à reorganização 	Stock and Seliger (2016)
	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de entrega incorreta e mercadorias estragadas 	
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Salários justos, aprendizado humano e motivação dos funcionários 	Gabriel and Pessel (2016); Herrmann et al. (2014);
	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito pouco claro na criação ou redução de empregos 	Stock and Seliger (2016); Tesch et al. (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> • Redução esperada de tarefas simples, enquanto tarefas criativas podem surgir 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Transformação organizacional necessária 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Rede, ambiente e política influenciam a adoção da IIoT 	

Fonte: Kiel et al. (2017)

Com base na revisão bibliográfica, foi construído o modelo teórico analítico destacado na Figura 10.

Figura 10 – Modelo Teórico Analítico sobre as trajetórias da Sustentabilidade



Fonte: Autores (2020)

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 e 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.

5 Conclusão

A Indústria 4.0 promove mudanças nos processos de manufatura que, por sua vez, podem contribuir para a sustentabilidade, permitindo que as organizações ajustem suas estratégias de implementação e logrem êxito não somente no ganho de produtividade, mas que possam impactar positivamente na sustentabilidade. Ao mesmo tempo em que a Indústria 4.0 apresenta iniciativas para mudanças na manufatura, as ações e práticas sustentáveis advindas da implementação de tecnologias habilitadoras da I4.0 podem impactar não somente no ganho de produtividade, mas nas áreas social, ambiental e econômica das empresas. Neste sentido, a sustentabilidade tem se tornado tema de crescente interesse pelas organizações, pois atua em coparticipação com a Indústria 4.0.

Muitas iniciativas da Indústria 4.0 limitam-se às operações, dessa maneira, não atingem toda a estrutura das organizações. Assim, existem inúmeros desafios que integrem entre si o tripé da sustentabilidade. Desta forma, este estudo se propôs a entender como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir na melhoria dos indicadores relacionados ao tripé da Sustentabilidade através da proposição de um modelo teórico-conceitual que descreve a relação das tecnologias da I4.0 e o impacto delas nos indicadores relacionados ao TBL. A segunda parte do estudo será a aplicação e validação desse modelo teórico-conceitual em casos reais da indústria brasileira.

Referências

Braccini, A. M., & Margherita, E. G. (2019). Exploring organizational sustainability of industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company. *Sustainability*, *11*(1), 36.

- Carvalho, M. M., Fleury, A., & Lopes, A. P. (2013). An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(7), 1418-1437.
- Perales, D. P., Valero, F. A., & García, A. B. (2018). Industry 4.0: a classification scheme. In *Closing the gap between practice and research in industrial engineering* (pp. 343-350). Springer, Cham.
- Evans, S., Vladimirova, D., Holgado, M., Van Fossen, K., Yang, M., Silva, E. A., & Barlow, C. Y. (2017). Business model innovation for sustainability: Towards a unified perspective for creation of sustainable business models. *Business Strategy and the Environment*, 26(5), 597-608.
- Fitzgerald, M., Kruschwitz, N., Bonnet, D., & Welch, M. (2014). Embracing digital technology: A new strategic imperative. *MIT sloan management review*, 55(2), 1.
- Henning, K. (2013). 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.
- Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. *International Journal of Innovation Management*, 21(08), 1740015.
- Ozanne, L. K., Phipps, M., Weaver, T., Carrington, M., Luchs, M., Catlin, J., ... & Williams, J. (2016). Managing the tensions at the intersection of the triple bottom line: A paradox theory approach to sustainability management. *Journal of Public Policy & Marketing*, 35(2), 249-261.
- Lopes, A. P. V. B. V., & de Carvalho, M. M. (2018). Evolution of the open innovation paradigm: Towards a contingent conceptual model. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 284-298.
- Palma, J. M. B., Bueno, U. S., Storolli, W. G., Schiavuzzo, P. L., Cesar, F. I. G., & Makiya, I. K. (2017). Os princípios da Indústria 4.0 e os impactos na sustentabilidade da cadeia de valor empresarial. In *6th International Workshop Advances in Cleaner Production– Academic Work*. Disponible en: [http://www.advancesincleanerproduction.net/sixth/files/sessoes B \(Vol. 6\)](http://www.advancesincleanerproduction.net/sixth/files/sessoes B (Vol. 6)).
- Ross, J., Sebastian, I., Beath, C., Scantlebury, S., Mocker, M., Fonstad, N., ... & Moloney, K. (2016). Designing digital organizations, vol. 46. MIT Center for IS Research.
- Santos, B. P., Alberto, A., Lima, T. D. F. M., & Charrua-Santos, F. M. B. (2018). Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 4(1), 111-124.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A. R., & Prote, J. P. (2014). Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. *Procedia Cirp*, 19, 51-56.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp*, 40, 536-541.
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). 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*, 83, 121-139.
- Carcary, M., Doherty, E., & Conway, G. (2016, September). A dynamic capability approach to digital transformation: a focus on key foundational themes. In *The European Conference on Information Systems Management* (p. 20). Academic Conferences International Limited.
- Leyh, C., Martin, S., & Schäffer, T. (2017, September). 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)* (pp. 989-993). IEEE.