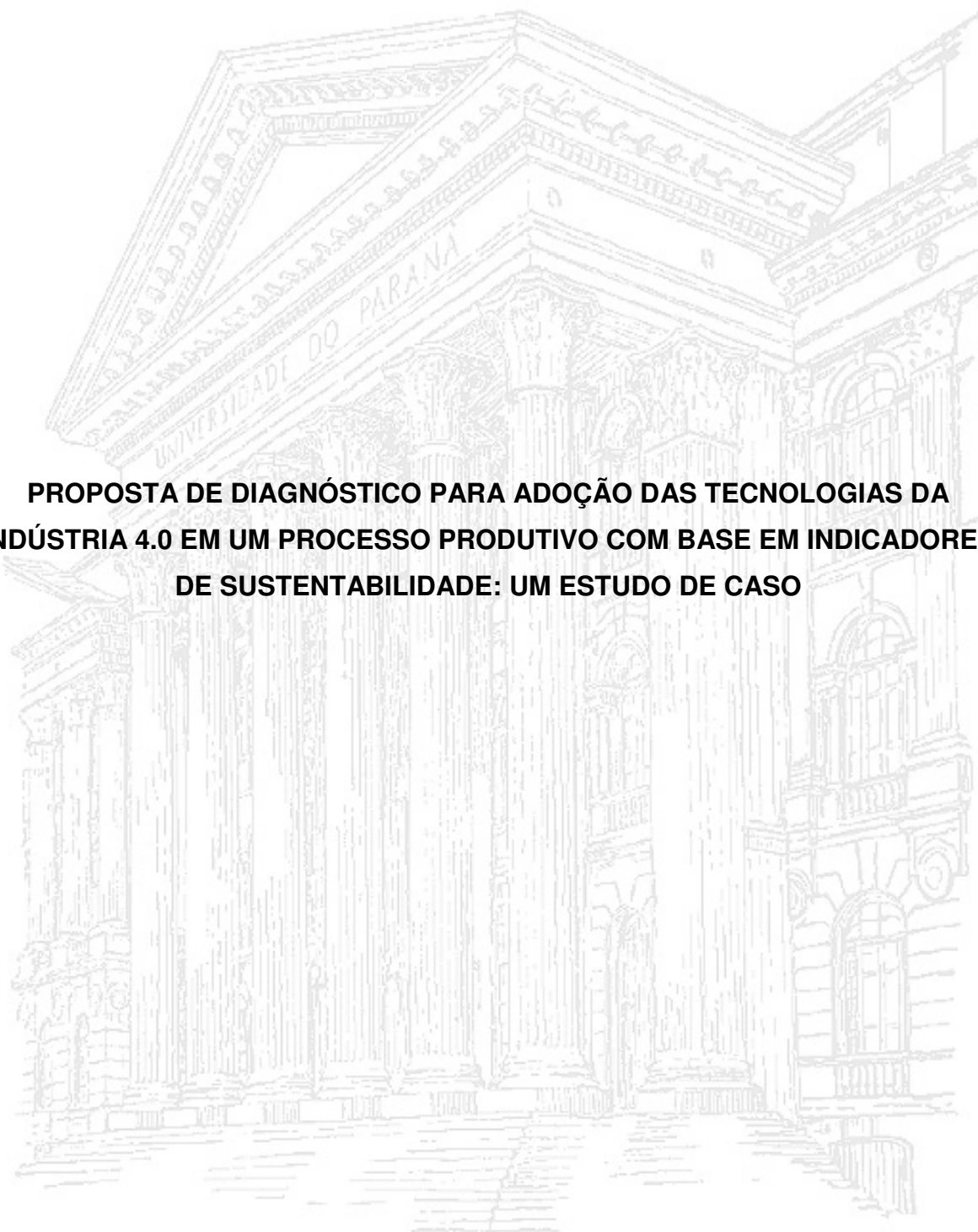


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCOS VINÍCIOS SCHULES



**PROPOSTA DE DIAGNÓSTICO PARA ADOÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA
INDÚSTRIA 4.0 EM UM PROCESSO PRODUTIVO COM BASE EM INDICADORES
DE SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO**

CURITIBA

2018

MARCOS VINICIOS SCHULES

**PROPOSTA DE DIAGNÓSTICO PARA ADOÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA
INDÚSTRIA 4.0 EM UM PROCESSO PRODUTIVO COM BASE EM INDICADORES
DE SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gechele Cleto

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SCH386p Schules, Marcos Vinicios
Proposta de diagnóstico para adoção das tecnologias da indústria 4.0 em um processo produtivo com base em indicadores de sustentabilidade: um estudo de caso / Marcos Vinicios Schules. – Curitiba, 2018.
87 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2018.

Orientador: Marcelo Gechele Cleto.

1. Indicadores de sustentabilidade. 2. Manufatura sustentável. 3. Indústria 4.0. I. Universidade Federal do Paraná. II. Cleto, Marcelo Gechele. III. Título.

CDD: 658.5

TERMO DE APROVAÇÃO

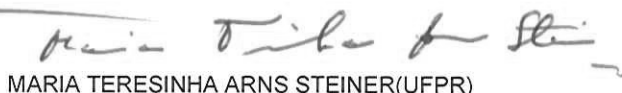
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCOS VINÍCIOS SCHULES**, intitulada: **PROPOSTA DE DIAGNÓSTICO PARA ADOÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM UM PROCESSO PRODUTIVO COM BASE EM INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 26 de Fevereiro de 2018.



MARCELO GEHELE CLETO(UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



MARIA TERESINHA ARNS STEINER(UFPR)



MARCELL MARIANO CORREA MACENO(UFPR)



FERNANDO DESCHAMPS(PUC/PR)

RESUMO

Desde o século XVIII a indústria passou por três revoluções, sendo a primeira caracterizada pela introdução da máquina a vapor, a segunda marcada pelos conceitos de produção em massa e aumento de produtividade e a terceira com o emprego da automação no setor industrial. Atualmente está iniciando a chamada quarta revolução industrial, denominada Indústria 4.0, integrando os objetos físicos com a tecnologia da informação e comunicação, criando assim as fábricas inteligentes. Com a atividade industrial em constante evolução, o objetivo inicial era produzir em grande escala, sem considerar que os recursos naturais são limitados. No ano 1987 apareceu pela primeira vez o termo desenvolvimento sustentável na preocupação de usar os recursos de forma racional para garantir a sobrevivência das futuras gerações. No Brasil, a Indústria 4.0 se encontra em estágio inicial, pois as organizações ainda têm dúvidas sobre os reais benefícios e aplicações destas novas tecnologias. Diante disso, este trabalho vem para contribuir neste tema apresentando uma proposta de método para diagnosticar a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 com base em indicadores de sustentabilidade dentro de um processo produtivo. O método foi aplicado em uma multinacional do setor automotivo na região de Curitiba, onde foi possível identificar, dentro do processo produtivo da empresa, quatro oportunidades para a adoção das tecnologias da Indústria 4.0, impactando principalmente nos indicadores de disponibilidade, desempenho, qualidade, consumo de energia e acidentes de trabalho.

Palavras-chave: Indicadores de Sustentabilidade; Manufatura Sustentável; Indústria 4.0.

ABSTRACT

Since the eighteenth century the industry has undergone three revolutions, the first characterized by the introduction of the steam engine, the second marked by the concepts of mass production and productivity increase and the third with the use of automation in the industrial sector. It is currently initiating the so-called fourth industrial revolution, called Industry 4.0, integrating physical objects with information and communication technology, thus creating smart factories. With the industrial activity in constant evolution, the initial objective was to produce in large scale, without considering that the natural resources are limited. In the year 1987 appeared the term sustainable development in the concern to use the resources of rational form to guarantee the survival of the future generations. In Brazil, Industry 4.0 is in an early stage, because organizations still have doubts about the real benefits and applications of these new technologies. In view of this, this work comes to contribute in this theme presenting a proposal of method to diagnose the use of the technologies of the Industry 4.0 based on indicators of sustainability within a productive process. The method was applied in a multinational of the automotive sector in the Curitiba region, where it was possible to identify, within the company's production process, four opportunities for the adoption of the technologies of Industry 4.0, impacting mainly on indicators of availability, performance, quality, energy consumption and accidents at work.

Keywords: Sustainability Indicators; Sustainable Manufacturing, Industry 4.0

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E GRÁFICOS

FIGURA 1 – OS TRÊS PILARES DA SUSTENTABILIDADE	12
FIGURA 2 – QUANTIDADE DE PLANETAS TERRA PARA SUPORTAR A HUMANIDADE.....	16
FIGURA 3 – MODELO DE OITO PASSOS PARA DEFINIR E MEDIR OS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE.....	29
FIGURA 4 – OS QUATRO ESTÁGIOS DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL.....	35
FIGURA 5 – RESULTADO DA REVISÃO DA LITERATURA	43
FIGURA 6 – OECD SUSTAINABLE MANUFACTURING TOOLKIT.....	51
FIGURA 7 – MÉTODO DE DIAGNÓSTICO.....	52
FIGURA 8 – SITUAÇÃO ATUAL E PROPOSTA	65
FIGURA 9 – MODELO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA AM/PM	66
FIGURA 10 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA REALIDADE AUMENTADA.....	67
FIGURA 11 – OPERAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO DE PALLET	68
FIGURA 12 – SITUAÇÃO ATUAL E PROPOSTA	69
FIGURA 13 – CHECK-LIST DE SEGURANÇA	70
GRÁFICO 1 – CONSUMO DE ENERGIA POR SETORES.....	17
GRÁFICO 2 – EMISSÃO DE CO ₂ POR SETORES.....	17
GRÁFICO 3 – EXPECTATIVA DE VIDA DA POPULAÇÃO BRASILEIRA	18
GRÁFICO 4 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO DE CADA TECNOLOGIA	72

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1 – PROFISSÕES MAIS E MENOS PROPENSAS À AUTOMAÇÃO	19
QUADRO 2 – MODELOS DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE.....	25
QUADRO 3 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PROPOSTOS POR SINGH <i>et al.</i>	31
QUADRO 4 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PROPOSTOS POR WINROTH <i>et al.</i>	33
QUADRO 5 – PALAVRAS-CHAVE E COMBINAÇÕES.....	43
QUADRO 6 – IMPACTOS DA I4.0 NO PILAR SOCIAL DA SUSTENTABILIDADE	44
QUADRO 7 – IMPACTOS DA I4.0 NO PILAR AMBIENTAL DA SUSTENTABILIDADE	45
QUADRO 8 – IMPACTOS DA I4.0 NO PILAR ECONÔMICO DA SUSTENTABILIDADE	45
QUADRO 9 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	48
QUADRO 10 – DEPARTAMENTOS E PROFISSIONAIS DA EMPRESA	54
QUADRO 11 – QUESTÕES PARA AVALIAÇÃO DO GRAU DE DIGITALIZAÇÃO, AUTOMAÇÃO E INTEGRAÇÃO	61
QUADRO 12 – EMPRESAS E TECNOLOGIAS DA I4.0	62
QUADRO 13 – RELAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0 COM AS OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS	71
QUADRO 14 – IMPACTO NOS PRINCIPAIS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	72
TABELA 1 – PARTICIPAÇÃO NO PIB BRASILEIRO POR SETORES (%)....	19
TABELA 2 – DADOS REFERENTES AOS PRINCIPAIS INDICADORES AMBIENTAIS DA EMPRESA.....	57

LISTA DE SIGLAS

AGV	- Automated Guided Vehicle
AHP	- Analytic Hierarchy Process
CAD	- Computer-Aided Design
CNI	- Confederação Nacional da Indústria
CO ₂	- Dióxido de Carbono
CPS	- Cyber-Physical System
ERP	- Enterprise Resource Planning
GPS	- Global Positioning System
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOS	- Internet of Services
IOT	- Internet of Things
ISO	- International Organization for Standardization
I4.0	- Indústria 4.0
kg	- Quilograma
KPI	- Key Performance Indicator
kWh	- Quilowatt-hora
M2M	- Machine-to-Machine
OECD	- Organization for Economic Cooperation and Development
OEE	- Overall Equipment Effectiveness
PIB	- Produto Interno Bruto
RFID	- Radio-Frequency Identification
TBL	- Triple Bottom Line
TI	- Tecnologia da Informação
VSM	- Value Stream Mapping
WCED	- World Commission on Environment and Development

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	PROBLEMÁTICA DE PESQUISA	14
1.2	JUSTIFICATIVA DE PESQUISA	16
1.3	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	SUSTENTABILIDADE: INDICADORES E MODELOS DE AVALIAÇÃO	23
2.2	INDÚSTRIA 4.0	34
2.2.1	CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA 4.0	36
2.2.2	TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	38
2.3	IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SUSTENTABILIDADE.....	42
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	47
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	47
3.2	PROCEDIMENTOS DE PESQUISA.....	48
3.3	MÉTODO DE DIAGNÓSTICO PROPOSTO	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	INFORMAÇÕES E DADOS DA EMPRESA	56
4.2	MAPEAMENTO DO PROCESSO (ETAPA 1)	57
4.3	IDENTIFICAÇÃO DAS APLICAÇÕES E EMPRESAS DA I4.0 (ETAPA 2)	62
4.3.1	OPORTUNIDADE 1 (OP1).....	64
4.3.1.1	Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)	64
4.3.1.2	Proposta de aplicação das tecnologias da I4.0 (ETAPA 4)	64
4.3.2	OPORTUNIDADE 2 (OP2).....	65

4.3.2.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)	65
4.3.2.2 Proposta de aplicação das tecnologias da I4.0 (ETAPA 4)	66
4.3.3 OPORTUNIDADE 3 (OP3)	67
4.3.3.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)	67
4.3.3.2 Proposta de aplicação das tecnologias da I4.0 (ETAPA 4)	68
4.3.4 OPORTUNIDADE 4 (OP4)	69
4.3.4.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)	69
4.3.4.2 Proposta de aplicação das tecnologias da I4.0 (ETAPA 4)	70
4.4 SÍNTESE DAS OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE 1	83
ANEXO A	84
ANEXO B	87

1 INTRODUÇÃO

O ano de 1776 marcou a história da indústria, quando James Watt vende o primeiro motor a vapor na Inglaterra, fato este que originou a chamada Primeira Revolução Industrial, a qual ocasionaria uma importante mudança na indústria, passando do trabalho manual para a mecanização dos trabalhos executados (CORRÊA & CORRÊA, 2009). Mais tarde, outros dois nomes se destacam na evolução da indústria mundialmente: Frederick Taylor e Henry Ford. O primeiro foi um estudioso das formas de aumentar a produtividade nos processos produtivos, ou seja, fazer mais produtos com menos recursos. O segundo foi o responsável pela introdução do conceito de produção em massa e linhas de montagem móvel, onde o produto move-se ao longo da linha e as estações de trabalho ficam estáticas (CORRÊA & CORRÊA, 2009).

As ideias de Taylor e Ford possibilitaram uma ascensão da indústria nunca observada antes, atendendo às necessidades das pessoas daquela época, saindo assim de um modelo de produção artesanal, de baixo volume para um sistema de produção em massa, com altos volumes. Em 1926, a Ford produzia sozinha 2 milhões de automóveis (CORRÊA & CORRÊA, 2009).

No mesmo momento que a indústria vê seu maior crescimento, emerge o primeiro problema do sistema proposto por Taylor e Ford, sendo este a condição de trabalho. O sistema em massa era repetitivo e tedioso, o qual ocasionava um elevado número de absenteísmo e até mesmo alcoolismo entre os trabalhadores (CORRÊA & CORRÊA, 2009).

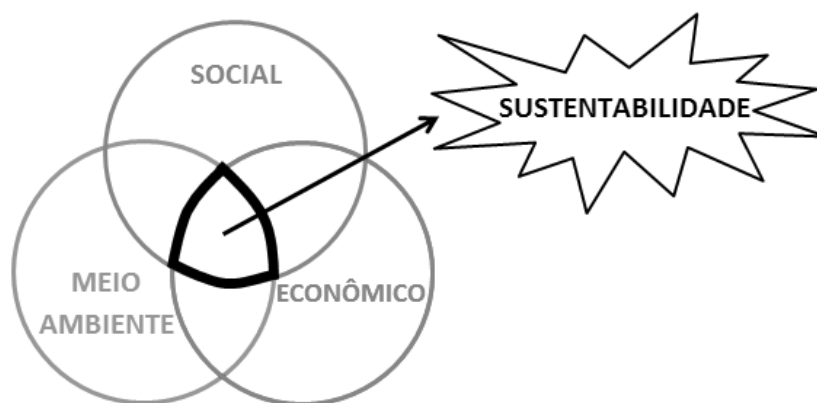
Outro ponto relevante no período de industrialização foi o uso dos recursos. Conforme Silva (2012) o crescimento econômico daquela época não se preocupou com as consequências, como por exemplo: a deterioração do meio ambiente com o aumento da poluição, uso sem controle dos recursos naturais, desigualdade social, entre outros. Então, em 1945, após o final da 2ª Guerra Mundial, surge um novo ator na história da indústria, chamado Taiichi Ohno, o qual vendo o Japão arrasado pela guerra, criaria o chamado Sistema Toyota de Produção, focado na redução de desperdícios e no trabalho evolutivo em formas de eliminá-los, contribuindo assim para a reconstrução da indústria japonesa pós-guerra (CORRÊA & CORRÊA, 2009).

O breve histórico da indústria apresentado elucida um pouco a origem dos pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental, que hoje fazem parte da estratégia de negócios de muitas empresas.

O termo desenvolvimento sustentável teve sua primeira definição formal no ano de 1987, na chamada Comissão de Brundtland. No documento *Our common future*, o termo foi definido como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a habilidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades (WCED, 1987).

No passado, sustentabilidade estava relacionada somente às questões ambientais, como uso dos recursos naturais, poluição, entre outros. Foi no ano de 1994 que John Elkington estabelece um conceito de desenvolvimento sustentável mais abrangente, o chamado *Triple Bottom Line* (TBL). O TBL incorpora os valores sociais e ambientais às medidas econômicas de uma corporação, formando assim os três pilares da sustentabilidade, conforme ilustra a Figura 1 (SILVA, 2012; GARETTI & TAISCH, 2012).

FIGURA 1 – OS TRÊS PILARES DA SUSTENTABILIDADE



FONTE: Traduzido de Garetti & Taisch (2012)

Mais recentemente dentro das organizações, emerge o conceito de manufatura sustentável. Conforme a definição do Departamento de Comércio dos Estados Unidos, é a criação de produtos manufaturados através de processos que tenham mínimo impacto negativo ao meio ambiente, conservem energia e recursos naturais,

sejam seguros para os empregados e comunidades, e economicamente viáveis (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2011).

O grande desafio da manufatura sustentável é como implementar processos e criar produtos que não degradem o meio ambiente, tragam benefícios para a sociedade como um todo e sejam viáveis economicamente. Neste contexto, alguns autores destacam a importância da tecnologia no desenvolvimento sustentável dentro das organizações. De acordo com Jovane *et al.* (2008) é a tecnologia que possibilita a transformação dos recursos naturais em produtos para atender as necessidades humanas, considerando assim a tecnologia como um quarto pilar da sustentabilidade. Conforme Arena *et al.* (2009) o mundo industrializado atual não é capaz de sobreviver sem uma evolução contínua da tecnologia e esta faz parte do desenvolvimento sustentável. Sendo assim, se a humanidade deseja evoluir, é preciso evidenciar o papel da tecnologia dentro do conceito de desenvolvimento sustentável (GARETTI & TAISCH, 2012).

Com o desenvolvimento da tecnologia e seu importante papel dentro das organizações, um novo conceito foi introduzido pelo governo alemão, no ano de 2011, a chamada Indústria 4.0, marcando assim o início de uma Quarta Revolução Industrial (QIN *et al.*, 2016; HERMANN *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2015). A Primeira Revolução Industrial foi baseada no uso de energia hidráulica e a vapor, a Segunda Revolução Industrial foi marcada pelo início da produção em massa e uso da eletricidade e a Terceira Revolução Industrial aconteceu com a introdução da Tecnologia da Informação (TI) nos processos industriais. Devido ao impacto em tecnologia esperado pela Indústria 4.0, esta está sendo considerada a Quarta Revolução Industrial (ANDERL, 2015).

Sendo assim, o termo Indústria 4.0 é uma referência aos avanços recentes em tecnologia, integrando objetos físicos, fatores humanos, máquinas inteligentes, linhas de produção e processos em um novo modelo de cadeia de valor inteligente, interligada e ágil (SCHUMACHER *et al.*, 2016). O conceito de Indústria 4.0 é um passo a frente no sentido de criar um modelo industrial mais sustentável, principalmente na dimensão ambiental da sustentabilidade, com uso eficiente dos recursos como matéria-prima, energia e água. A Indústria 4.0 é também uma oportunidade na criação

de valor nas três dimensões da sustentabilidade: econômica, social e ambiental (STOCK & SELIGER, 2016).

As empresas de manufatura ao redor do mundo estão enfrentando vários desafios devidos aos recentes avanços em questões ambientais, econômicas, sociais e tecnológicas (SCHUMACHER *et al.*, 2016). Assim, esse trabalho busca propor um método para diagnosticar a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 com base em indicadores de sustentabilidade dentro do processo produtivo.

O modelo proposto neste trabalho é para ser aplicado na avaliação de um processo produtivo já existente, o qual ainda não possui tecnologias da I4.0 implementadas, buscando assim tornar o processo mais sustentável. Sendo assim, este modelo não contempla questões como novos modelos de negócios, uma das características da I4.0.

1.1 PROBLEMÁTICA DE PESQUISA

A limitação no uso dos recursos naturais e a necessidade de produzir bens que atendam às necessidades humanas com baixa taxa de poluição e resíduos durante todo o ciclo de vida, têm desafiado as empresas à revisão de suas estratégias de produção e a desenvolver inovações tecnológicas usando os recursos de forma sustentável. Diante disso, as empresas têm enfrentado algumas dificuldades em implementar processos de manufatura sustentáveis, principalmente em relação a cultura da produção tradicional e do aumento indesejado dos custos em desenvolver inovações tecnológicas e alternativas robustas. Isto representa um novo paradigma tecnológico para cientistas e engenheiros, demonstrando a importância da manufatura sustentável como um fator competitivo (BORK *et al.*, 2016).

De acordo com Singh *et al.* (2014), a estratégia em adotar a manufatura sustentável está ligada a três componentes: (1) seleção dos indicadores apropriados para medir a sustentabilidade dentro do processo produtivo; (2) ferramenta de avaliação para identificar as áreas mais críticas; (3) ajustar o sistema para tornar a manufatura cada vez mais sustentável.

Em relação à seleção dos indicadores, conforme Paju *et al.* (2010), não há um consenso de um padrão de indicadores de sustentabilidade. Sendo assim, a

existência de muitos indicadores é capaz de causar confusão entre as empresas quando estas buscam selecionar um conjunto operacional de indicadores para avaliar a sustentabilidade (JOUNG *et al.*, 2012). No que diz respeito às ferramentas de avaliação de sustentabilidade, há vários modelos de avaliação, contudo somente alguns deles apresentam uma abordagem integral, considerando as dimensões ambiental, econômica e social da sustentabilidade. Na maioria dos casos, o foco é em apenas uma dimensão (SINGH *et al.*, 2012). O desenvolvimento de modelos de avaliação e indicadores que efetivamente contribuem para aumentar a sustentabilidade nos processos de manufatura ainda está na fase de desenvolvimento (HELLENO *et al.*, 2016).

Vários esforços estão sendo realizados para tornar a produção cada vez mais sustentável. A Indústria 4.0 tem como um de seus objetivos tornar os processos produtivos mais eficientes, principalmente no uso dos recursos de forma consciente e sem desperdício. No Brasil, o conceito ainda é recente e conforme uma pesquisa da Confederação Nacional das Indústrias (CNI), realizada em 2016, 42% das empresas não conhecem a importância das tecnologias da Indústria 4.0 para a competitividade industrial. Ainda de acordo com a pesquisa, as três principais barreiras que as empresas brasileiras enfrentam para adotar as tecnologias da Indústria 4.0 são o alto custo de implantação, falta de clareza na definição do retorno sobre o investimento e estrutura e cultura da empresa.

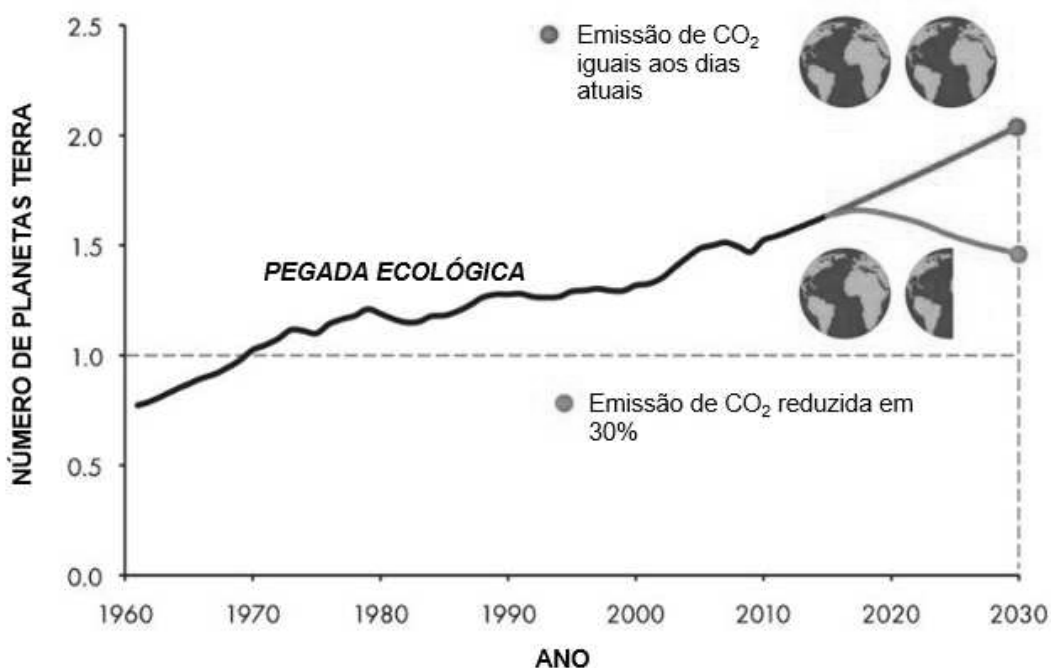
Enquanto em alguns países a Indústria 4.0 já se encontra em um estágio avançado, o Brasil enfrenta alguns desafios como: buscar a incorporação e o desenvolvimento das novas tecnologias da Indústria 4.0 e fazer isso com uma certa agilidade, evitando assim perder sua competitividade com outros países. O baixo conhecimento sobre as tecnologias e seus benefícios indica a necessidade de um esforço de disseminação de conhecimento sobre o tema (CNI, 2016).

Conforme Arena *et al.* (2009), o mundo industrializado não é capaz de sobreviver sem um desenvolvimento e evolução contínua da tecnologia, sendo esta parte do desenvolvimento sustentável. Diante deste panorama, surge a questão de pesquisa: **Como identificar as oportunidades de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 considerando os indicadores de sustentabilidade em um processo produtivo?**

1.2 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA

A ideia de que os recursos naturais são infinitos e que a capacidade regenerativa do ambiente é capaz de compensar a ação humana não é mais aceitável (GARETTI & TAISCH, 2012). Segundo estudos da *Global Footprint Network*, no ano de 2016, foram necessários 1,6 planetas do tamanho da Terra para prover todos os recursos naturais que a humanidade utilizou durante o ano (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2017). Isso significa que em 2016 foram usados 60% a mais de recursos do que a Terra é capaz de regenerar no período de um ano. O dióxido de carbono produzido foi muito maior do que as florestas são capazes de absorver, as pescas e colheitas foram realizadas em um período muito mais rápido que eles podem se reproduzir e crescer novamente (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2017). De acordo com a Figura 2, se o consumo dos recursos naturais continuar no mesmo ritmo atual, em 2030, serão necessários dois planetas do tamanho da Terra para atender essa demanda.

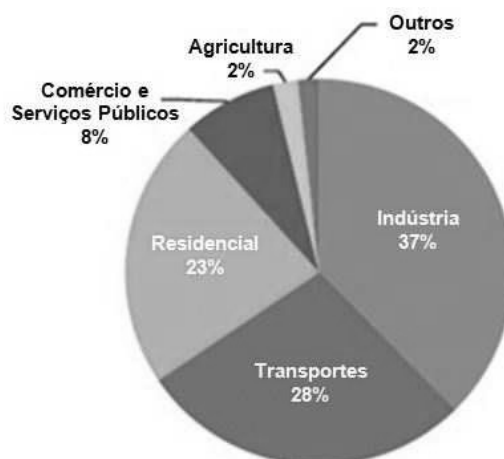
FIGURA 2 – QUANTIDADE DE PLANETAS TERRA PARA SUPORTAR A HUMANIDADE



FONTE: Global Footprint Network (2017)

A indústria representa uma importante parcela no consumo de recursos naturais e na emissão de poluentes ao meio ambiente. Conforme demonstra o Gráfico 1, a indústria consome 37% de toda energia produzida no mundo, sendo esta derivada das mais diversas fontes como carvão, óleo, gás natural, hidrelétricas, entre outros.

GRÁFICO 1 – CONSUMO DE ENERGIA POR SETORES



FONTE: International Energy Agency (2016)

Em relação à emissão de dióxido de carbono (CO_2), a indústria está entre os três setores que mais emitem CO_2 ao meio ambiente, como é possível observar no Gráfico 2. O setor de eletricidade e aquecimento representa a maior parcela (42%), seguido pelo setor de transportes (23%) e a indústria representando 19% de todo CO_2 emitido ao meio ambiente.

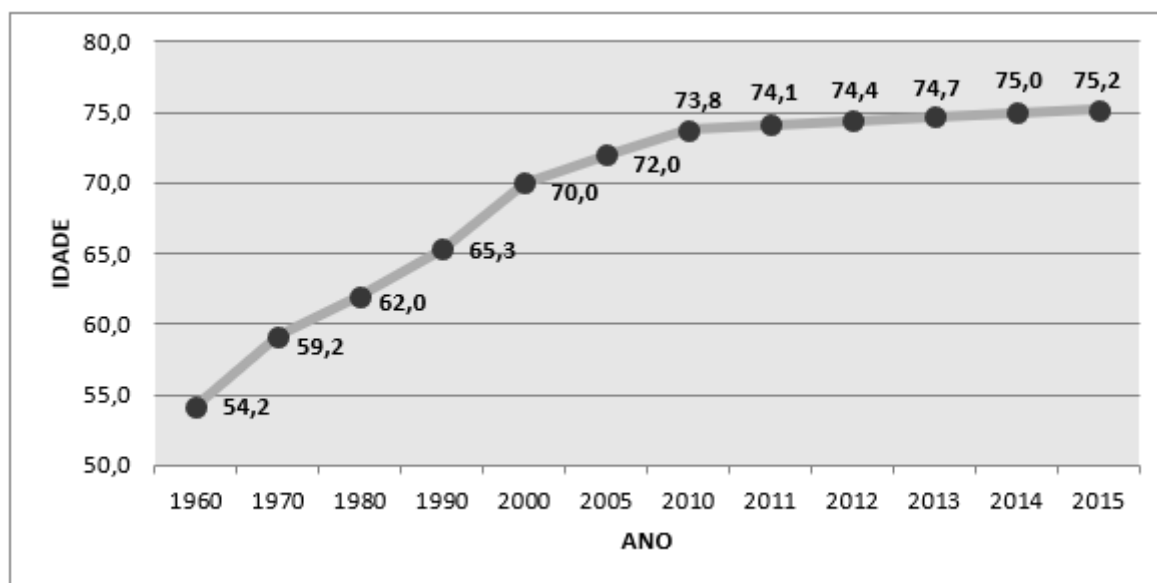
GRÁFICO 2 – EMISSÃO DE CO_2 POR SETORES



FONTE: International Energy Agency (2016)

A expectativa de vida do brasileiro teve forte aumento nas últimas cinco décadas. O Gráfico 3 ilustra a evolução da expectativa de vida do brasileiro, que passou de 54,2 anos em 1960, para 75,2 em 2015.

GRÁFICO 3 – EXPECTATIVA DE VIDA DA POPULAÇÃO BRASILEIRA



FONTE: Banco Mundial (2017)

Com o aumento da expectativa de vida, as pessoas permanecem no mercado de trabalho por mais tempo, exercendo as mais diversas atividades e novas profissões acabam surgindo. De acordo com o Fórum Econômico Mundial, 65% das crianças que entram na escola nos dias atuais, vão exercer funções e atividades que ainda não existem atualmente (WEF, 2016)

A automação é uma realidade na indústria, principalmente nas atividades repetitivas e de precisão. Porém, no futuro, o trabalho de diversos profissionais diferentes poderá ser parcial ou completamente automatizado com a evolução da tecnologia (SCHWAB, 2016). O Quadro 1 apresenta algumas profissões mais propensas e outra menos propensas à automação.

QUADRO 1 – PROFISSÕES MAIS E MENOS PROPENSAS À AUTOMAÇÃO

MAIS PROPENSAS	
Probabilidade	Profissão
0,99	Operadores de telemarketing
0,98	Árbitros, juízes e outros profissionais desportivos
0,97	Corretores de imóveis
0,97	Mão de obra agrícola
0,94	Entregadores e mensageiros
MENOS PROPENSAS	
Probabilidade	Profissão
0,0040	Coreógrafos
0,0042	Médicos e cirurgiões
0,0043	Psicólogos
0,0065	Analistas de sistemas de computador
0,0130	Gerente de vendas

FONTE: Schwab (2016)

A participação da indústria no PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro também tem grande representatividade. Considerando os três maiores setores: agropecuária, indústria e serviços, no ano de 2015, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a indústria foi responsável por 22,3% de toda riqueza produzida no país, conforme ilustra a Tabela 1.

TABELA 1 – PARTICIPAÇÃO NO PIB BRASILEIRO POR SETORES (%)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
AGROPECUÁRIA	5,1	5,2	5,4	5,2	4,8	5,1	4,9	5,3	5,0	5,0
INDÚSTRIA	27,7	27,1	27,3	25,6	27,4	27,2	26,0	24,9	23,8	22,3
Extrativa Mineral	3,5	3,0	3,8	2,2	3,3	4,4	4,5	4,2	3,7	2,0
Transformação	16,6	16,6	16,5	15,3	15,0	13,9	12,6	12,3	12,0	11,8
Prod. e distrib. de eletricidade, gás, água e esgoto	3,2	3,0	2,6	2,7	2,8	2,7	2,4	2,0	1,9	2,7
Construção	4,3	4,6	4,4	5,4	6,3	6,3	6,5	6,4	6,2	5,9
SERVIÇOS	67,2	67,7	67,3	69,2	67,8	67,7	69,1	69,9	71,2	72,7

FONTE: IBGE (2016)

A atividade industrial, ao mesmo tempo que representa um importante setor na geração de riqueza de um país, é também um dos setores que mais contribui para o esgotamento dos recursos naturais e poluição do meio ambiente. Diante deste cenário, há uma necessidade bem reconhecida de cada vez mais implantar os conceitos de sustentabilidade dentro das organizações (JAYAL *et al.*, 2010). Com o esgotamento de recursos, poluição ambiental, estagnação econômica, leis mais rigorosas e a busca por produtos que não agridem ao meio ambiente, as empresas precisam estabelecer e atingir metas cada vez mais rigorosas de sustentabilidade (HAAPALA *et al.*, 2013; FENG *et al.*, 2010).

Tornar a manufatura sustentável é um processo desafiador e complexo, pois envolve vários fatores como: tecnologia e engenharia, economia, gestão ambiental, saúde e bem-estar das pessoas que moram e trabalham, desejos sociais e estratégias governamentais (ROSEN & KISHAWY, 2012). As empresas ainda enfrentam vários obstáculos para implementar a sustentabilidade em seus processos e produtos, tais como: alto custo de investimento, longo período de tempo para retorno do investimento, limitações em tecnologia, falta de ferramentas de apoio às decisões, falta de indicadores e métricas apropriados, falta de informação e de uma ferramenta padrão de avaliação do impacto ambiental estão entre as principais barreiras para tornar os sistemas sustentáveis (ESMAEILIAN *et al.*, 2016).

A Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0 pode contribuir de forma substancial para tornar os processos produtivos mais sustentáveis. Esta revolução terá forte impacto dentro das organizações, como por exemplo em novas tecnologias de produção, cultura organizacional e empregados, bem como terá grande impacto fora das organizações, principalmente nas áreas sociais e ambientais (GABRIEL & PESSL, 2016).

Na dimensão social, principalmente em relação ao futuro do mercado de trabalho, a forte relação entre pessoas e máquinas na Indústria 4.0 vai contribuir em uma grande mudança no ambiente de trabalho, onde o trabalho muscular vai ser realizado por máquinas, enquanto as pessoas serão condutoras e coordenadoras dentro dos processos produtivos, exigindo assim novos profissionais com novas habilidades (GABRIEL & PESSL, 2016). Em relação ao meio ambiente, de acordo com Gabriel & Pessl (2016), as tecnologias da Indústria 4.0 possibilitarão um contínuo

gerenciamento no consumo de energia e recursos. Sendo assim, com informações detalhadas sobre o uso da energia e dos recursos ao longo de todo processo produtivo, os sistemas poderão ser otimizados continuamente, contribuindo assim para o uso racional dos recursos sem desperdício, reduzindo os níveis de poluição, o que afeta o bem estar dos empregados e de toda a comunidade.

O Instituto McKinsey (2015) destaca alguns dos principais impactos e resultados esperados da Indústria 4.0 até o ano de 2025:

- Aumento de 10 – 25% em produtividade;
- Redução de 10 – 40% nos custos em manutenção;
- Redução de 10 – 25% em acidentes de trabalho;
- Redução de 10 – 20% no consumo de energia.

Observa-se que a Quarta Revolução Industrial vem para contribuir nos três pilares da sustentabilidade, ilustrando assim a importância de se entender como sustentabilidade e Indústria 4.0 estão relacionadas dentro das organizações.

1.3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O principal objetivo deste trabalho é propor um método para diagnosticar a utilização das tecnologias da Indústria 4.0 com base em indicadores de sustentabilidade dentro do processo produtivo em uma empresa de manufatura.

Para isso, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar os modelos de avaliação e indicadores de sustentabilidade aplicados em indústrias de manufatura;
2. Definir as principais características e tecnologias da Indústria 4.0;
3. Levantar os principais impactos da Indústria 4.0 em sustentabilidade;
4. Propor um método de diagnóstico das tecnologias da I4.0 que podem ser empregadas no processo produtivo com base em indicadores de sustentabilidade;
5. Aplicar o método de diagnóstico em uma empresa de manufatura, identificando as oportunidades de melhorias e apresentando as propostas de aplicação das tecnologias da I4.0 para cada oportunidade encontrada.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta uma contextualização sobre o tema, seguido da problemática e justificativa da pesquisa e finalizando com o objetivo geral e objetivos específicos.

No Capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica sobre os temas sustentabilidade, Indústria 4.0 e os impactos da Indústria 4.0 em sustentabilidade. São apresentados os principais modelos de avaliação e indicadores de sustentabilidade, as principais características e tecnologias da Indústria 4.0 e os impactos esperados em sustentabilidade com a adoção da I4.0.

O Capítulo 3 é referente ao método de pesquisa. Neste capítulo é descrito a classificação da pesquisa, os procedimentos adotados e apresentado o método de diagnóstico proposto no trabalho

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados da pesquisa de campo, a aplicação do método de diagnóstico e realizado uma discussão das oportunidades identificadas no processo para aplicação das tecnologias da I4.0 que impactam os indicadores de sustentabilidade.

O Capítulo 5 é destinado às considerações finais, com as limitações encontradas no trabalho e também são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O referencial teórico deste trabalho está dividido em três temas principais: primeiro, relacionado aos indicadores e modelos de avaliação de sustentabilidade; segundo, as principais iniciativas e tecnologias da Indústria 4.0 e por fim os impactos esperados em sustentabilidade com a adoção da I4.0.

2.1 SUSTENTABILIDADE: INDICADORES E MODELOS DE AVALIAÇÃO

O sucesso de um negócio não pode ser medido apenas por indicadores financeiros e econômicos. Sendo assim, é necessário a definição de um grupo de indicadores para se ter uma visão holística de sustentabilidade (TAN *et al.*, 2015). Combinando indicadores das dimensões ambiental, econômica e social e avaliando esses indicadores de forma integrada é possível medir a sustentabilidade em uma escala muito maior do que com indicadores individuais. (JOUNG *et al.*, 2012).

Um indicador, de acordo com Waas *et al.* (2014), é uma representação operacional de um atributo (qualidade, característica, propriedade) de um dado sistema, por uma variável quantitativa ou qualitativa (números, gráficos, cores, símbolos), incluindo seu valor, relacionado a um valor de referência. Para Jain & Rachuri (2014) há uma distinção entre indicador e métrica. Enquanto o indicador é uma medida sumária que fornece informações sobre o estado ou alteração do sistema que está sendo medido; a métrica é o valor de medição usado para avaliar indicadores específicos.

Há três principais objetivos em estabelecer indicadores dentro das organizações: aumentar conscientização e compreensão das questões que ele indica, ajudar na tomada de decisões e medir a realização dos objetivos estabelecidos (PAJU *et al.*, 2010). Para Tan *et al.* (2015), os indicadores são ferramentas indispensáveis dentro das organizações para medir o progresso ao longo do tempo, identificar os problemas para melhorar o desempenho no futuro como também identificar problemas que foram negligenciados no passado.

O sucesso na aplicação dos indicadores está ligado a algumas características que estes precisam apresentar. Entre as principais características, os indicadores precisam ser:

- Mensuráveis: o indicador precisa ser fácil e simples de ser medido, de forma quantitativa ou qualitativa, em uma perspectiva multi-dimensional como econômica, social e ambiental (FENG & JOUNG, 2009; FENG *et al.*, 2010; JOUNG *et al.*, 2012);
- Relevantes: o indicador deve fornecer as informações úteis sobre aquilo que está sendo medido, abordando os principais aspectos e objetivos da organização (FENG & JOUNG, 2009; FENG *et al.*, 2010; JOUNG *et al.*, 2012; TAN *et al.*, 2015);
- Compreensíveis: o indicador precisa ser de fácil entendimento pela comunidade em geral, mesmo por aqueles que não são especialistas da área (FENG & JOUNG, 2009; FENG *et al.*, 2010; JOUNG *et al.*, 2012; TAN *et al.*, 2015; JASINSKI *et al.*, 2016);
- Confiáveis: os dados dos indicadores precisam ser de fontes confiáveis e seguras para alcançar o objetivo desejado (FENG & JOUNG, 2009; FENG *et al.*, 2010; JOUNG *et al.*, 2012);
- Práticos: os indicadores precisam ser práticos em relação às ferramentas, tempo e recursos disponíveis para análise e avaliação (CHEN *et al.*, 2013; JASINSKI *et al.*, 2016);
- Fácil acesso aos dados: os indicadores precisam ter como base os dados e informações que estão disponíveis ou podem ser facilmente coletados (FENG & JOUNG, 2009; FENG *et al.*, 2010; JOUNG *et al.*, 2012);
- Gerenciáveis: a organização pode decidir o número e os tipos de indicadores a aplicar para alcançar o objetivo desejado (FENG *et al.*, 2010).

Várias organizações internacionais e nacionais têm buscado definir grupos de indicadores e modelos para avaliar a sustentabilidade. Foram identificados 24 principais modelos de avaliação de sustentabilidade e alguns trabalhos relacionados aos indicadores de sustentabilidade aplicados em manufatura. O Quadro 2 ilustra 24 modelos de avaliação encontrados na literatura.

QUADRO 2 – MODELOS DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE

MODELOS DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE		Trabalhos
1	Global Report Initiative (GRI)	Labuschagne <i>et al.</i> (2005); Feng & Joung (2009); Singh <i>et al.</i> (2012); Joung <i>et al.</i> (2012); Chen <i>et al.</i> (2013); Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
2	Barometer of Sustainability	Chen <i>et al.</i> (2013)
3	Composite Sustainable Development Index	Chen <i>et al.</i> (2013)
4	Coral	Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
5	Dow Jones Sustainability Index (DJSI)	Feng & Joung (2009); Feng <i>et al.</i> (2010); Joung <i>et al.</i> (2012); Chen <i>et al.</i> (2013)
6	Environmental Performance Index (EPI)	Joung <i>et al.</i> (2012); Feng & Joung (2009); Tan <i>et al.</i> (2015)
7	Environmental Pressure Indicators for the European Union (EPI-EU)	Feng & Joung (2009); Feng <i>et al.</i> (2010); Joung <i>et al.</i> (2012);
8	Environmental Sustainability Indicators	Feng & Joung (2009); Joung <i>et al.</i> (2012)
9	ETHOS	Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
10	ETHOS-SEBRAE	Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
11	European Environmental Agency Core Set of Indicators (EEA-CSI)	Joung <i>et al.</i> (2012)
12	Ford Product Sustainability Index	Feng & Joung (2009); Feng <i>et al.</i> (2010); Joung <i>et al.</i> (2012); Chen <i>et al.</i> (2013)
13	GM Metrics for Sustainable Manufacturing	Feng & Joung (2009); Feng <i>et al.</i> (2010); Chen <i>et al.</i> (2013); Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
14	Icheme Sustainability Metrics	Labuschagne <i>et al.</i> (2005); Singh <i>et al.</i> (2012); Chen <i>et al.</i> (2013); Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
15	Indicator database	Feng & Joung (2009)
16	INMETRO	Zuanazzi <i>et al.</i> (2016)
17	ISO 14031 Environmental Performance Evaluation	Feng & Joung (2009); Joung <i>et al.</i> (2012); Tan <i>et al.</i> (2015)
18	ITT Flygt Sustainability Index	Chen <i>et al.</i> (2013)
19	OECD Sustainable Manufacturing Toolkit	Feng & Joung (2009); Feng <i>et al.</i> (2010); Joung <i>et al.</i> (2012); Tan <i>et al.</i> (2015)
20	Rapid Basin-wide Hydropower Sustainability Assessment Tool	Chen <i>et al.</i> (2013)
21	Sustainability Assessment in Mining and Minerals Industry	Chen <i>et al.</i> (2013)
22	Sustainable Development Framework (SDF)	Chen <i>et al.</i> (2013)
23	Sustainable Manufacturing Indicator Repository (SMIR)	Joung <i>et al.</i> (2012), Tan <i>et al.</i> (2015)
24	United Nations Commission on Sustainable Development Indicators (UNCSD)	Labuschagne <i>et al.</i> (2005); Feng & Joung (2009); Feng <i>et al.</i> (2010); Singh <i>et al.</i> (2012); Joung <i>et al.</i> (2012)

FONTE: O Autor (2017)

A partir dos trabalhos de Labuschagne *et al.* (2005), Feng & Joung (2009), Feng *et al.* (2010), Joung *et al.* (2012), Singh *et al.* (2012), Chen *et al.* (2013), Tan *et al.*

(2015) e Zuanazzi *et al.* (2016), foi realizado uma breve análise dos 24 modelos de avaliação de sustentabilidade apresentados no Quadro 1.

1. *GRI (Global Report Initiative)*: Criado em 1997 pela UNEP (*United Nations Environment Programme*) em conjunto com a CERES (*Coalition for Environmentally Responsible Economics*) é um conjunto de mais de 70 indicadores usado para avaliar os três pilares da sustentabilidade: social, ambiental e econômico. É um dos modelos mais conhecido mundialmente, porém alguns indicadores são difíceis de se avaliar e não há uma orientação clara de quais e como aplicá-los dentro das empresas;
2. *Barometer of Sustainability*: Proposto em 1997, considera apenas os aspectos ambientais e sociais e precisa ser adaptado para aplicar dentro de uma organização;
3. *Composite Sustainable Development Index*: Metodologia criada por Krajnc e Glavic em 2005 utilizada para avaliar os três pilares da sustentabilidade dentro das empresas;
4. *Coral*: Desenvolvido em 2002 por Eliza Coral, avalia o nível de sustentabilidade empresarial com foco no planejamento estratégico;
5. *Dow Jones Sustainability Index (DJSI)*: Ferramenta criada em 1999, onde o foco é avaliar o desempenho financeiro, juntamente com a avaliação das três dimensões da sustentabilidade. 12 critérios são avaliados, mas devido à sua complexidade, uma grande quantidade de dados e informações são requeridas;
6. *Environmental Performance Index (EPI)*: Desenvolvido pela Universidade Yale, é um conjunto de 20 indicadores com foco nas dimensões ambiental e social da sustentabilidade, não considerando a dimensão econômica;
7. *Environmental Pressure Indicators for the European Union (EPI-EU)*: Lista de mais de 60 indicadores que avaliam as ações humanas com impacto negativo ao meio ambiente;
8. *Environmental Sustainability Indicators*: Criado pela Universidade Yale para avaliar o impacto ambiental em determinadas regiões e países, é um

conjunto de 68 indicadores o qual foi complementado mais tarde pelo EPI (*Environmental Performance Index*);

9. *Ethos*: O Ethos é um instituto brasileiro criado em 1982 e criou um Guia de Elaboração de Relatório e Balanço Anual, onde são sugeridos indicadores nas três dimensões da sustentabilidade, com um destaque maior para o aspecto social;

10. *Ethos – Sebrae*: Este modelo foi criado em 2003, em parceria do Instituto Ethos com o Sebrae (Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas), proporcionando uma ferramenta para avaliar a responsabilidade social e o desenvolvimento sustentável em micro e pequenas empresas;

11. *European Environment Agency Core Set of Indicators (EEA-CSI)*: Conjunto de indicadores usado para reportar principalmente os aspectos ambientais em países da União Européia;

12. *Ford Product Sustainability Index*: Modelo formado por oito indicadores nas dimensões social, ambiental e econômica com foco na indústria automotiva, principalmente na avaliação do ciclo de vida do produto;

13. *GM Metrics for Sustainable Manufacturing*: Projeto criado pela General Motors em 2009, onde são avaliados 33 indicadores divididos em 6 categorias de sustentabilidade: impacto ambiental, consumo de energia, bem estar pessoal, segurança ocupacional, custos de manufatura e gerenciamento de resíduos;

14. *Icheme Sustainability Metrics*: Desenvolvido pelo Instituto dos Engenheiros Químicos (Institution of Chemical Engineers) em 2002, o modelo avalia 50 indicadores nos três aspectos da sustentabilidade, mesmo sendo considerado um modelo simples pelos autores, exige uma grande quantidade de dados que nem sempre são fáceis de se obter;

15. *Indicator Database*: Criado em 1993 por Maureen Hart, um grupo de 409 indicadores são listados com o objetivo de avaliar a sustentabilidade dentro de uma plataforma online;

16. *Inmetro*: Criado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e tecnologia (Inmetro) em 2012, é uma plataforma de sete princípios, cada um deles composto por um conjunto de indicadores, que servem como referência

para avaliar a sustentabilidade dos processos produtivos dentro das empresas;

17. *ISO 14031 Environment Performance Evaluation*: Modelo padrão internacional formado por 155 indicadores, com especificações para as organizações desenvolverem seus próprios indicadores de desempenho nas três dimensões da sustentabilidade;

18. *ITT Flygt Sustainability Index*: Desenvolvido pela Universidade de Mälardalen da Suécia, é formado por 40 indicadores, sendo aplicado para avaliar os pilares econômico, social e ambiental dentro das empresas;

19. *OECD Sustainable Manufacturing Toolkit*: Criado pela *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) para monitorar as condições ambientais no desenvolvimento dos países membros da organização. O modelo é composto por 46 indicadores que abrange principalmente o aspecto ambiental da sustentabilidade;

20. *Rapid Basin-wide Hydropower Sustainability Assessment Tool*: Desenvolvido pela Agência Internacional de Desenvolvimento dos Estados Unidos em 2010, o modelo contempla 53 critérios de avaliação dentro do conceito de sustentabilidade;

21. *Sustainability Assessment in Mining and Minerals Industry*: Modelo criado para avaliar e melhorar a sustentabilidade no setor de mineração, composto por 132 indicadores nos três pilares da sustentabilidade;

22. *Sustainable Development Framework (SDF)*: Desenvolvido pela Comissão Europeia em 2009, é formado por mais de 100 indicadores divididos em 10 temas relacionados às três dimensões da sustentabilidade;

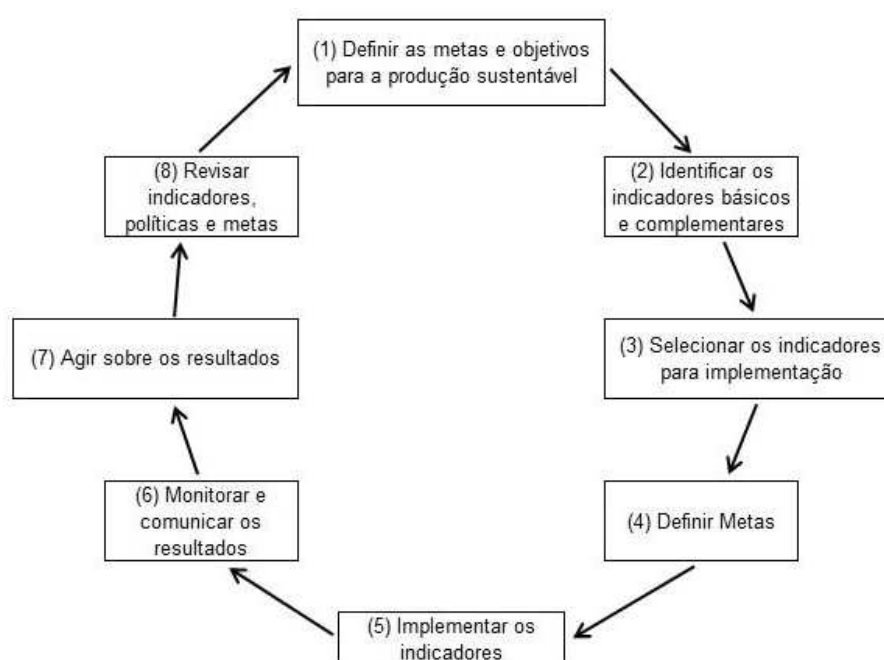
23. *Sustainable Manufacturing Indicator Repository (SMIR)*: Criado em 2010 pelo NIST (National Institute of Standards and Technology), o modelo apresenta 212 indicadores, contemplando os aspectos social, ambiental e econômico da sustentabilidade;

24. *United Nations Commission on Sustainable Development Indicators (UNCSD)*: Criado pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, o modelo foi finalizado em 2006 contendo 96 indicadores dentro das três dimensões da sustentabilidade.

Diante da quantidade de modelos de avaliação de sustentabilidade e de sua complexidade, definir os indicadores relevantes para cada dimensão da sustentabilidade e entender como eles se conectam com o objetivo de alcançar um processo sustentável é um grande desafio das organizações (HELLENO *et al.*, 2016). O sucesso do método de avaliação depende diretamente da seleção dos indicadores apropriados (SINGH *et al.*, 2016). Vários autores têm buscado definir um conjunto de indicadores, dentro das três dimensões da sustentabilidade, com o objetivo de diminuir a complexidade no processo de seleção de indicadores, tornando o método de avaliação mais eficiente e com resultados que contribuam para um processo produtivo mais sustentável dentro das empresas.

O trabalho de Veleva & Ellenbecker (2001) apresenta um conjunto de 22 indicadores, divididos em seis aspectos: uso de energia e material, ambiente natural, justiça social e desenvolvimento da comunidade, desempenho econômico, empregados e produtos. Além disso, é apresentado um modelo com oito passos de como definir e medir os indicadores de sustentabilidade nas organizações, conforme ilustra a Figura 3.

FIGURA 3 – MODELO DE OITO PASSOS PARA DEFINIR E MEDIR OS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE



FONTE: Traduzido de Veleva & Ellenbecker (2001)

Com base em doze modelos de avaliação de sustentabilidade e em mais de cem artigos, Chen *et al.* (2014) desenvolveu um modelo de 133 indicadores, aplicado para pequenas e médias empresas. As principais características do modelo são: avaliação rápida, aplicação no nível de produção, aplicabilidade genérica e visão holística de sustentabilidade. Com base no método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), Harik *et al.* (2014) apresentou um modelo de avaliação para medir o desempenho da sustentabilidade em indústrias de manufatura. Em seu modelo, a sustentabilidade foi dividida em quatro pilares: econômico, social, ambiental e manufatura. Um total de 44 indicadores foram identificados como relevantes, sendo 10 na dimensão econômica, 14 na social, 13 na ambiental e 7 na dimensão manufatura.

Em seu trabalho, Tan *et al.* (2015), tendo como base quatro modelos de avaliação de sustentabilidade internacionalmente reconhecidos (Environmental Performance Index, OECD Sustainable Manufacturing Toolkit, Sustainable Manufacturing Indicador Repository e ISO 14031) apresentou 40 indicadores para pequenas e médias empresas em Cingapura, divididos em quatro dimensões: proteção ambiental, crescimento econômico, bem-estar social e gerenciamento de desempenho. Jasinski *et al.* (2016), por meio de uma revisão da literatura, desenvolveu um modelo de avaliação de sustentabilidade com base em 26 critérios, separados em quatro categorias: impacto econômico, ambiental, recursos e social. O modelo foi avaliado por 50 especialistas dos Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha, Suécia e Itália e sua aplicação tem foco na indústria automotiva.

No Brasil, o trabalho de Zuanazzi *et al.* (2016) contribuiu para o tema, ao apresentar um modelo de avaliação de sustentabilidade voltado para pequenas e médias empresas, com o objetivo de incentivá-las a adotar os indicadores de sustentabilidade como parte de suas práticas gerenciais. O modelo teve como base os modelos propostos pelo GRI, Ethos, Coral, Ethos-Sebrae, Icheme e GM. Na dimensão econômica, 15 indicadores foram propostos divididos em quatro aspectos: desempenho econômico, distribuição do valor econômico gerado por *stakeholders*, investimentos e presença de mercado; na dimensão ambiental, foram 28 indicadores separados em 6 aspectos: materiais, energia, água, terra, emissão de efluentes / resíduos e geral; na dimensão social, ao todo foram 47 indicadores distribuídos em

9 aspectos, sendo eles: emprego, saúde e segurança no trabalho, treinamento e educação, valores transparência e governança, comunidade, diversidade e igualdade de oportunidades, fornecedores, consumidores / clientes e compliance.

A lógica *fuzzy* foi usada como método no trabalho de Singh *et al.* (2016) para identificar os indicadores mais relevantes de sustentabilidade, aplicadas em pequenas e médias empresas na Malásia. O Quadro 3 apresenta os indicadores selecionados por Singh *et al.*, a partir da revisão da literatura, com base nos modelos do GRI, ISO 14031, Dow Jones Sustainability Indexes e OECD Sustainable Manufacturing Toolkit.

QUADRO 3 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PROPOSTOS POR SINGH *et al.*

Desempenho Econômico	Custo de Manufatura	Redução em custo de material
		Custo associado ao trabalho
		Diminuição no custo de energia
		Diminuição no custo de entrega
		Aumento no custo de reciclagem
		Redução do custo na disposição dos resíduos
		Aumento no custo de proteção ambiental
	Qualidade	Aumento na confiabilidade de entrega
		Diminuição no percentual de refugo
		Diminuição no percentual de retrabalho
	Capacidade de resposta	Diminuição no tempo de entrega final
		Diminuição no tempo de entrega na manufatura
		Diminuição no tempo de desenvolvimento de produtos
Flexibilidade	Aumento na flexibilidade da demanda	
	Aumento na flexibilidade de entrega	
	Aumento na flexibilidade de produção	
Desempenho Social	Bem estar do empregado	Número médio de horas de treinamento
		Diminuição na rotatividade de funcionários
		Diminuição no número de acidentes
		Aumento na satisfação profissional
		Melhorias nas condições de trabalho
		Nível de participação dos trabalhadores na tomada de decisões
	Bem estar do cliente	Aumento na satisfação do cliente
		Divulgação de informações sobre produtos e serviços
		Nível de avaliação de saúde e segurança do produto
		Disponibilidade de devolução / garantia
	Bem estar da comunidade	Número de projetos comunitários
		Diminuição no número de não conformidade
		Disponibilidade da política de trabalho infantil

Desempenho Ambiental		Composição da força de trabalho
		Salário comparado ao salário mínimo local
		Envolvimento da comunidade na tomada de decisões
	Uso de material	Diminuição da intensidade do material
		Diminuição na porcentagem de uso de matéria-prima
		Aumento no uso de material reciclado / remanufaturado / reutilizado
		Diminuição no percentual de uso de materiais perigosos
	Uso de energia	Diminuição no consumo total de energia
		Aumento na porcentagem do uso de energia renovável
		Aumento na porcentagem de energia economizada
	Uso de água	Diminuição no consumo total de água
		Aumento na porcentagem do uso de água reciclada
	Desperdício	Diminuição no total de resíduos gerados
		Aumento do nível de resíduos recicláveis / remanufaturados / reutilizáveis
		Diminuição na porcentagem de resíduos enviados a aterros sanitários
		Diminuição na porcentagem de desperdício de material perigoso
		Diminuição na porcentagem de desperdício de água
Emissão	Diminuição na emissão de CO ₂	
	Diminuição na emissão de gases causadores do efeito estufa	

FONTE: Traduzido de Singh *et al.* (2016)

O trabalho de Winroth *et al.* (2016) teve como objetivo identificar um conjunto de indicadores que tenham como principal foco a sustentabilidade dentro das organizações e contribuir na tomada de decisão dos gerentes de produção. Um total de 52 indicadores foi encontrado na revisão da literatura, sendo que 47 deles se mostraram relevantes para avaliação da sustentabilidade. O resultado foi obtido através de uma *survey* com gerentes de produção na Suécia e pelo emprego de uma análise estatística, onde 20 dos 52 indicadores se mostraram relevantes para os gerentes e 27 apresentaram um valor estatisticamente significativo. O Quadro 4 ilustra os 52 indicadores avaliados no trabalho.

QUADRO 4 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PROPOSTOS POR WINROTH *et al.*

DIMENSÃO	CATEGORIA	INDICADOR
Ambiental	Recursos Naturais	Uso da terra (m ²)
		Uso da água (m ³ /ano)
		Taxa de água reciclada (%)
	Energia	Uso de energia (kWh)
		Taxa de energia perdida por ociosidade (%)
		Fração de energia renovável (%)
	Material	Material usado por unidade de produção (kg/peça ou m ³ /peça)
		Taxa de refugo (%)
		Taxa de refugo de processo (%)
		Quantidade de material reutilizado ou reciclado (%)
		Uso de material em embalagem (kg/ano ou m ³ /ano)
		Uso de processos aditivos (kg/ano ou m ³ /ano)
	Desperdícios e emissões	Quantidade de aditivos de processo reciclados (%)
		Desperdícios (kg)
		Desperdício perigoso (kg)
		Emissão de substâncias que agredem a camada de ozônio (kg)
		Emissão de gases que causam o efeito estufa (kg)
	Legislação Ambiental e conformidade	Emissão de outros gases que afetam o meio ambiente (kg)
		Acidentes ambientais (Nº/ano)
	Econômica	Empregados
Valor agregado por funcionário (\$/Nº)		
Custo de empregado em relação à venda (%)		
Média do custo salarial por hora (\$/h)		
Clientes		Nível relativo da média salarial (%)
		Número de clientes (Nº)
		Reclamações de clientes (Nº/unidade ou Nº/ordem)
Despesas em Desenvolvimento		Número de novos clientes por ano (Nº/ano)
		Taxa de novos produtos (%/ano)
Operação da Produção		Parte do <i>budget</i> aplicado em pesquisa e desenvolvimento (%)
		Eficiência Global do Equipamento (OEE) (%)
		Produtividade (ritmo de produção) (Nº/h)
		Taxa de desempenho do trabalho manual (%)
		Utilização de trabalho manual (%)
		Precisão na entrega (%)
Fornecedor		Tempo de entrega da produção (dias, h)
	Manutenção (h/unidade)	
	Número de fornecedores (Nº)	
	Paradas causadas por fornecedores (h/ano)	

Social	Saúde e Segurança	Número de acidentes ou incidentes (Nº/ano)
		Ausência devido a lesões ou doença relacionada ao trabalho (%)
	Educação e Treinamento	Número de horas de treinamento por empregado (h)
		Nível de educação (%)
	Relação trabalho-gestão	Taxa de funcionários temporários (%)
		Taxa de satisfação dos funcionários (%)
		Taxa de funcionários que são acionistas (%)
	Diversidade e oportunidades iguais	Taxa de homem e mulher (%)
		Porcentagem de empregados envolvidos em atividades de melhoria contínua (%)
		Número de equipes de melhorias interfuncionais (Nº)
	Capital Humano	Número de novos funcionários por ano (Nº)
		Rotatividade de funcionários (%/ano)
		Apoio para os funcionários em atividades físicas, saúde e medicina (\$/funcionário)
		Porcentagem de promoção no último ano (%/ano)

FONTE: Traduzido de Winroth *et al.* (2016)

A próxima seção é destinada a revisão da literatura sobre a Indústria 4.0, destacando suas principais características e tecnologias.

2.2 INDÚSTRIA 4.0

Desde o final do século XVIII a indústria passou por três revoluções: a primeira caracterizada pelo trabalho mecânico, possível pelo uso dos motores a vapor; a segunda, já no início do século XX, foi marcada pela introdução da eletricidade, com a introdução dos conceitos de produção em massa e linhas de montagem; a terceira ocorreu no início dos anos 70, com o uso da tecnologia da informação e de robôs para tornar a produção automatizada. Em 2011, o governo alemão introduziu o conceito de Indústria 4.0, a qual está sendo denominada da quarta revolução industrial, com o uso dos sistemas ciber-físicos, onde os processos físicos são integrados com as tecnologias de comunicação e informação (WAN *et al.*, 2015; SANDENGEN *et al.*, 2016). A Figura 4 ilustra como aconteceram as quatro revoluções industriais ao longo do tempo, relacionando estas com o grau de complexidade.

FIGURA 4 – OS QUATRO ESTÁGIOS DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL



FONTE: Adaptado de Sandengen *et al.* (2016)

O termo Indústria 4.0 apresenta diferentes definições, sendo algumas delas mostradas a seguir:

- É a integração de máquinas e dispositivos físicos complexos com sensores e softwares, usados para prever, controlar e planejar melhores resultados empresariais e sociais (SHAFIQ *et al.*, 2015);
- Conceito baseado na integração das tecnologias de informação e comunicação com a tecnologia industrial, dependente dos sistemas ciber-físicos para construir uma indústria digital e inteligente, tornando a manufatura mais digital, orientada pela informação, customizada e verde (ZHOU *et al.*, 2015);
- Termo coletivo para as tecnologias e conceitos da organização da cadeia de valor. Dentro de uma estrutura modular das indústrias inteligentes (*smart factory*), sistemas ciber-físicos monitoram o processo físico, criando uma cópia virtual e tomando decisões descentralizadas (GILCHRIST, 2016);
- Uma revolução baseada na aplicação de tecnologias avançadas no nível de produção, trazendo novos valores e serviços para os clientes e para a própria organização. É capaz também de aumentar a flexibilidade e

qualidade dos sistemas produtivos para preencher a demanda por novos e inovadores modelos de negócios e tornar os serviços mais ágeis (KHAN & TUROWSKI, 2016).

A Indústria 4.0 possibilitará um grande avanço nos sistemas produtivos. Entre os principais benefícios estão:

- Maior flexibilidade: os processos serão mais dinâmicos e estruturados, capazes de reagir de forma mais rápida e flexível nas mudanças de demanda que ocorrem em um curto espaço de tempo (SHAFIQ *et al.*, 2015; CNI, 2016);
- Redução dos prazos de entrega e lançamento de novos produtos no mercado: com acesso às informações e dados em tempo real, é possível realizar tomadas de decisão mais rápidas, influenciando diretamente os prazos de entrega e lançamento de novos produtos (CNI, 2016);
- Customização em massa: uma linha de produção mais flexível e a comunicação instantânea entre os componentes de toda a cadeia produtiva, possibilitam que a produção possa se adaptar a pequenos lotes para atender as necessidades individuais de cada cliente com alto grau de eficiência (SHAFIQ *et al.*, 2015; CNI, 2016);
- Aumento da eficiência no uso dos recursos: as tecnologias da indústria 4.0 permitem o controle do processo de forma inteligente, evitando assim desperdícios, impactando na redução dos custos (CNI, 2016).

O conceito de Indústria 4.0 ainda é abrangente e dentro desse contexto, suas principais características e tecnologias 4.0 são apresentadas nas próximas seções.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 possui características distintas, sendo as principais delas:

- Integração Horizontal: os sistemas de tecnologia de informação em diferentes empresas raramente estão interligados, sendo assim, não há uma integração entre fornecedores e clientes (SANDENGEN *et al.*, 2016). A integração horizontal se refere à integração de toda a cadeia de fornecedores, onde as informações e dados estarão disponíveis para toda

a cadeia, possibilitando uma cadeia de valor totalmente automatizada (GILCHRIST, 2016). Com este modelo de integração, novas redes de valor e modelos de negócio podem surgir (WANG *et al.*, 2015);

- **Integração Vertical:** uma organização é formada por vários sistemas físicos e de informação, como atuadores e sensores, controles, gerenciamento da produção, manufatura e planejamento corporativo. A integração dos sensores e atuadores em diferentes níveis, até chegar o nível de planejamento dos recursos (ERP) é denominada integração vertical (WANG *et al.*, 2015). Esta integração torna a produção mais flexível e reconfigurável, permitindo assim que as empresas possam reagir de forma rápida e eficaz diante de variáveis como nível de demanda, nível de estoque, defeitos de máquinas e atrasos imprevistos (GILCHRIST, 2016);
- **Interoperabilidade:** é a capacidade de todos os componentes envolvidos no sistema estarem conectados, se comunicarem e operarem juntos via Internet das Coisas (IOT), incluindo pessoas, fábricas inteligentes e tecnologia (GILCHRIST, 2016). O sucesso dessa característica está em estabelecer um padrão de comunicação entre os vários sistemas ciber-físicos de diferentes fabricantes (HERMANN *et al.*, 2015);
- **Virtualização:** é a capacidade que os sistemas ciber-físicos possuem para monitorar os processos e máquinas dentro de uma empresa. Os dados obtidos pelos sensores estão ligados a modelos de plantas virtuais e de simulação, criando assim uma cópia do mundo físico (HERMANN *et al.*, 2015). Assim, engenheiros e planejadores podem customizar, alterar e testar mudanças ou melhorias isoladamente, sem interferir no processo físico (GILCHRIST, 2016);
- **Descentralização:** a crescente demanda por produtos individualizados dificulta o controle dos sistemas de forma centralizada, assim, com base nos conceitos da Indústria 4.0, os diferentes sistemas dentro das organizações são capazes de tomar decisões de forma autônoma. Para garantir a qualidade e a rastreabilidade dos produtos, é necessário saber a localização do produto em todo o sistema e a qualquer momento. As etiquetas com a tecnologia RFID (Identificação por Radiofrequência) permitem a

comunicação entre produtos e máquinas, onde as decisões de quais passos seguir dentro do processo são tomadas de forma independente, sem a necessidade de um planejamento e controle centralizado (HERMANN *et al.*, 2015);

- Modularidade: dentro dos conceitos de Indústria 4.0, as indústrias precisam ser flexíveis, ou seja, se adaptar facilmente as mudanças de características dos produtos, flutuações sazonais e variação de demanda por exemplo (HERMANN *et al.*, 2015). Com linhas de produção mais flexíveis e individualizadas (modular), a substituição, expansão ou a implantação de melhorias podem ser realizadas sem afetar o sistema produtivo como um todo (GILCHRIST, 2016);
- Capacidade em tempo real: os dados e informações são coletados e analisados em tempo real (SHAFIQ *et al.*, 2015);
- Orientação para serviço: além de fornecer produtos, a Indústria 4.0 tem potencial para criar novos serviços através da internet dos serviços (IOS), os quais podem beneficiar tanto o ambiente interno como o ambiente externo à organização (GILCHRIST, 2016).

As características apresentadas trazem benefícios tanto para a empresa como para os clientes. Para a empresa estas características permitem uma tomada de decisão mais rápida, evita longos atrasos e perdas de produção como também é capaz de reduzir os índices de refugo e retrabalho. Para o cliente, uma maior variedade de produtos é oferecida e com uma velocidade muito mais rápida, atendendo cada vez mais suas exigências.

2.2.2 TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Conforme Arena *et al.* (2009) não é possível encontrar soluções reais para a questão da sustentabilidade sem considerar a tecnologia como parte integral do problema. Na indústria 4.0 surgem os chamados sistemas ciber-físicos (CPS), um termo introduzido pelo Dr. James Truchard, em 2006, definido como a integração do mundo virtual com o físico (ZHOU *et al.*, 2015). Nos CPS são estabelecidas redes que integram máquinas, sistemas de armazenamento e instalações da produção, de

forma que estas sejam capazes de trocar informações de forma autônoma. Esta integração contribui para uma melhoria em todo o processo industrial envolvendo manufatura, engenharia, uso de material, cadeia de suprimentos e gerenciamento do ciclo de vida (SHAFIQ *et al.*, 2015).

Novas tecnologias emergem com o conceito de Indústria 4.0, as quais são apresentadas a seguir.

- Comunicação máquina-para-máquina (M2M): é a tecnologia central para integrar o mundo físico com o virtual dentro do ambiente de produção da Indústria 4.0, possibilitando a troca de informações entre os CPS de forma autônoma e inteligente (BECHTOLD *et al.*, 2014);
- Big Data: em manufatura, vários microprocessadores são instalados nas máquinas para capturar os dados de produção, gerando assim um conjunto de dados complexos em que as tecnologias convencionais de processamento de dados não são capazes de gerenciar e analisar toda essa informação. A tecnologia Big Data utiliza novos sistemas e metodologias para processar todos os dados, provenientes das mais diversas fontes, de forma eficiente, rápida e confiável. Os principais benefícios dessa tecnologia são: otimização dos processos, acuracidade nas tomadas de decisão, redução de custos e melhoria na eficiência operacional (ZHOU *et al.*, 2015; KANG *et al.*, 2016);
- Internet das Coisas (IOT): o termo Internet das Coisas foi criado e popularizado pelo trabalho do Auto-ID Center, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1999 e mais tarde, em 2002, o termo foi difundido por Kevin Ashton, com o artigo intitulado “*The internet of things*” (BERGWEILER, 2015). Com o desenvolvimento da tecnologia de informação e comunicação, há uma visão de que as coisas, ou os objetos terão a capacidade de se comunicar entre si, surgindo assim o termo internet das coisas (HERMANN *et al.*, 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 *et al.*, 2015);

- Robôs Autônomos ou colaborativos: a introdução de robôs nas linhas de produção não é algo recente, onde desde a década de 70 eles vêm sendo usados principalmente para reduzir o tempo de produção. Porém, na Indústria 4.0 uma nova tecnologia é introduzida, capaz de produzir robôs autônomos, flexíveis e cooperativos que se comunicam entre si. Os atuais robôs já são mais baratos, fáceis de programar, mais leves o que possibilita uma maior flexibilidade nas futuras linhas de produção (SANDENGEN *et al.*, 2016). Com a evolução dos robôs, por meio do uso de sensores e unidades de controle, estes não serão apenas ferramentas utilizadas por humanos, mas sim serão capazes de trabalhar de forma colaborativa e até mesmo executar tarefas que até então eram apenas executadas por pessoas (GILCHRIST, 2016);
- Computação / Armazenamento em nuvem: o compartilhamento de dados entre toda a cadeia de valor na Indústria 4.0 é um desafio a ser superado devido à grande quantidade de informações geradas por todo o sistema. Poucas empresas terão a capacidade de armazenar e analisar todo esse volume de dados. O serviço em nuvem é uma tecnologia com a capacidade de armazenar e processar essas informações (GILCHRIST, 2016). De acordo com Zhou *et al.* (2015) a tecnologia em nuvem oferece baixo custo e alto desempenho e além de armazenamento de informações e dados, pode disponibilizar *softwares*, *hardwares* e outros recursos de tecnologia de informação, os quais podem ser utilizados conforme a necessidade de aplicação, disponíveis em tempo real;
- Manufatura Aditiva: é uma tecnologia capaz de converter um modelo 3D, como um arquivo CAD, em um objeto físico, onde a união dos materiais é possível através da aplicação de luz, vibração ultrassônica, laser ou feixe de elétrons. Este processo surgiu nos anos 80 e é muito aplicado nas empresas para produzir protótipos ou componentes de forma individual, devido a sua baixa taxa de produção. Com o avanço da tecnologia, as questões de baixa produtividade e alto custo da manufatura aditiva, os

maiores limitantes da implantação deste processo, serão superados, podendo assim esta tecnologia ser usada na produção de pequenos lotes e produtos customizados, que são características da Indústria 4.0. Destacam-se como potenciais vantagens da manufatura aditiva: construção de peças complexas e baixo peso, eficiência no uso dos recursos e materiais e possibilita uma maior flexibilidade no processo produtivo (BECHTOLD *et al.*, 2014; SANDENGEN *et al.*, 2016; KANG *et al.*, 2016);

- AGVs: os veículos guiados automaticamente (do inglês *Automated Guided Vehicle*) são uma parte importante da Indústria 4.0. AGV podem ser definidos como máquinas automáticas que executam dentro das indústrias as mais diversas tarefas como transporte, levantamento de peso, detecção, entre outras de forma inteligente e autônoma. O emprego dos AGVs dentro das empresas aumenta o grau de automação e eficiência, reduz o custo de mão-de-obra e torna o ambiente de trabalho mais rápido e seguro (WAN *et al.*, 2015).
- Realidade Aumentada: é uma tecnologia usada para aumentar o campo visual do usuário com informações necessárias para desempenhar determinada tarefa. Apresenta como características: habilidade de combinar objetos reais e virtuais, interação em tempo real e capacidade de usar objetos 3D (SYBERFELDT *et al.*, 2017). Em manufatura, a realidade aumentada pode ser aplicada no planejamento de linhas de montagem e processos, em instruções visuais para operadores e técnicos durante o processo. Na manutenção, a realidade aumentada permite que as instruções e informações sejam mostradas diretamente no local onde está sendo executada a tarefa, tornando assim a operação mais rápida e assertiva. A realidade aumentada pode também ser aplicada para visualização de relatórios em tempo real, treinamento e demonstração de produtos para os clientes (KLIMANT *et al.*, 2017)
- Simulação: é uma ferramenta utilizada para testar se um processo está funcionando de forma correta, detectar falhas e implementar melhorias através de modelos virtuais, sem afetar o processo físico. Isso reduz o tempo de desenvolvimento de um novo produto, diminui o número de

paradas em uma linha de produção para introdução de novos processos, melhora a qualidade do produto (BCG, 2015; GILCHRIST, 2016).

Ao avaliar o nível de adoção das tecnologias da Indústria 4.0, alguns pontos precisam ser considerados como:

- Cada indústria apresenta suas particularidades, sendo assim, é preciso diferenciar o tipo de indústria onde a tecnologia será aplicada. Por exemplo, uma indústria de alimentos usará um nível de tecnologia diferente de uma indústria automotiva;
- A situação econômica do país onde a indústria está situada é importante. Países desenvolvidos tem um nível de tecnologia mais avançado do que os países em desenvolvimento, bem como o acesso a essa tecnologia é muito mais fácil, o que deve ser considerado ao implementar os conceitos da Indústria 4.0;
- Devido ao grande volume de dados gerados com as tecnologias da Indústria 4.0, destaca-se a importância da segurança na transmissão desses dados. A comunicação entre diferentes máquinas e dispositivos também exige um protocolo padrão para a troca de informações. A segurança dos dados e a comunicação entre máquinas por meio de um protocolo padrão ainda são algumas barreiras na adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

2.3 IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SUSTENTABILIDADE

São inúmeros os impactos que a Indústria 4.0 terão nas organizações, porém conforme destaca Beier *et al.* (2017), ainda há um número pequeno de estudos que abordam os impactos da digitalização e interligação dos processos industriais em aspectos da sustentabilidade. Com o objetivo de enumerar os possíveis impactos da Indústria 4.0 em sustentabilidade dentro das empresas, uma revisão da literatura foi realizada. Para essa revisão foram utilizadas as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, sendo delimitado o período de 2011 até 2017 para a publicação dos trabalhos, visto que 2011 foi o ano que surgiu o termo Indústria 4.0. A definição das palavras-chave foi um ponto importante na realização da revisão da literatura, pois servem como identificadores e resumem os principais assuntos sobre o tema que se

deseja pesquisar (GOHR *et al.*, 2013). O Quadro 5 ilustra as palavras-chave e combinações usadas na pesquisa.

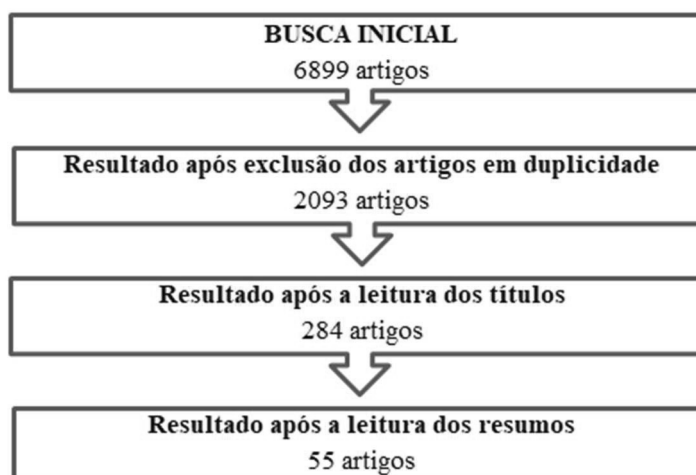
QUADRO 5 – PALAVRAS-CHAVE E COMBINAÇÕES

Industry 4.0	OR	Industrie 4.0	AND	Sustainability
Industry 4.0	OR	Industrie 4.0	AND	Triple Bottom Line
Industry 4.0	OR	Industrie 4.0	AND	Sustainable Manufacturing
Industry 4.0	OR	Industrie 4.0	AND	Environmental Indicator / KPI
Industry 4.0	OR	Industrie 4.0	AND	Economic Indicator / KPI
Industry 4.0	OR	Industrie 4.0	AND	Social Indicator / KPI

FONTE: O Autor (2017)

A busca retornou 6899 artigos, sendo que nem todos estavam relacionados ao tema pesquisado. Sendo assim, um filtro precisou ser realizado com o objetivo de identificar os artigos que apresentassem os impactos da Indústria 4.0 sobre as dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade. O resultado da revisão da literatura é apresentado na Figura 5.

FIGURA 5 – RESULTADO DA REVISÃO DA LITERATURA



FONTE: O Autor (2017)

No primeiro filtro foram excluídos os trabalhos que estavam em duplicidade nas duas bases de dados. Para o segundo filtro, foram lidos os títulos dos artigos. Nesta etapa, foram excluídos os trabalhos onde o título não continha a palavra Indústria 4.0 ou algum termo relacionado à sustentabilidade. No terceiro filtro foi realizada a leitura

dos resumos. Sendo assim, foram excluídos os trabalhos onde o objetivo apresentado no resumo não estava conectado ao tema Indústria 4.0 ou sustentabilidade.

Um número reduzido de trabalhos relaciona a I4.0 com a sustentabilidade. Com isso, para complementar a revisão da literatura, foram adicionados cinco estudos sobre a Indústria 4.0 que trazem contribuições para o tema em estudo, sendo eles: Acatech (2013), Capgemini (2014), BCG (2015), ITA (2015) e PWC (2016). O Anexo A apresenta a relação de todos os trabalhos selecionados na revisão da literatura.

Para atingir o objetivo do estudo, buscou-se nos trabalhos selecionados identificar os impactos da Indústria 4.0 dentro das organizações. Identificado o impacto, este foi avaliado sobre qual pilar da sustentabilidade ele teria influência, ou seja, se este poderia ser encaixado no pilar social, ambiental ou econômico. Sendo assim, foram identificados ao todo 42 possíveis impactos da Indústria 4.0 sobre a sustentabilidade dentro de uma organização.

No pilar social da sustentabilidade alguns possíveis impactos da Indústria 4.0 são: condições de trabalho menos exigente fisicamente, maior inclusão de pessoas com algum tipo de deficiência ou idade avançada, maior qualificação dos empregados, entre outras. O Quadro 6 relaciona 19 possíveis impactos da Indústria 4.0 sobre o pilar social da sustentabilidade identificados na literatura.

QUADRO 6 – IMPACTOS DA I4.0 NO PILAR SOCIAL DA SUSTENTABILIDADE

SOCIAL	1	Maior número de empregados na área de serviços e Pesquisa e Desenvolvimento
	2	Trabalhadores mais qualificados e novas profissões
	3	Condições de trabalho melhores, com maior satisfação e menos estressante
	4	Diminuição no número de trabalhadores que executam tarefas repetitivas e manuais
	5	Maior autonomia / flexibilidade (balanço entre trabalho e vida social)
	6	Amenizar a falta de trabalhadores qualificados
	7	Vida profissional prolongada
	8	Menor hierarquização dentro das empresas
	9	Colaboração entre humanos e máquinas (robôs)
	10	Ambiente de trabalho móvel
	11	Novas e avançadas tarefas de planejamento
	12	Maior desenvolvimento da criatividade
	13	Aumento no desempenho dos trabalhadores
	14	Processo de tomada de decisões otimizado e de forma colaborativa entre pessoas e máquinas
	15	Maior transparência e previsibilidade nos processos
	16	Condições de trabalho menos exigentes fisicamente

	17	Melhores oportunidades profissionais para pessoas com algum tipo de deficiência e com idade mais avançada
	18	Maior proporção de idosos e mulheres nas indústrias
	19	Menor número de acidentes e incidentes de trabalho

FONTE: O Autor (2017)

A Indústria 4.0 também terá impactos no pilar ambiental da sustentabilidade como: redução no consumo de energia, redução no consumo de matéria-prima, menores índices de poluição, entre outros. Os possíveis impactos da Indústria 4.0 no pilar ambiental da sustentabilidade está ilustrado no Quadro 7.

QUADRO 7 – IMPACTOS DA I4.0 NO PILAR AMBIENTAL DA SUSTENTABILIDADE

AMBIENTAL	1	Redução no consumo de recursos / matéria-prima
	2	Melhor eficiência no uso da energia
	3	Menores índices de poluição
	4	Menor degradação ao meio ambiente
	5	Redução nas taxas de erro / retrabalho
	6	Redução nos custos de setup
	7	Minimização dos defeitos de qualidade
	8	Custo de produção independente do tamanho dos lotes
	9	Resposta mais rápida as demandas do mercado
	10	Menores prazos de entrega

FONTE: O Autor (2017)

No pilar econômico da sustentabilidade, são impactos da Indústria 4.0: aumento na produtividade e receitas da empresa, novas oportunidades para pequenas e médias empresas, cadeia de valor mais colaborativa, entre outros. O Quadro 8 ilustra os possíveis impactos da Indústria 4.0 sobre o pilar econômico da sustentabilidade.

QUADRO 8 – IMPACTOS DA I4.0 NO PILAR ECONÔMICO DA SUSTENTABILIDADE

ECONÔMICO	1	Maior investimento em pesquisa e desenvolvimento
	2	Aumento na produtividade
	3	Aumento da competitividade e valor adicionado
	4	Aumento nas receitas da empresa
	5	Aumento na flexibilidade dos negócios
	6	Novas oportunidades para PMEs e startups
	7	Abertura de novos segmentos de clientes
	8	Lançamento de novos produtos e aumento de portfólio
	9	Pequenos lotes de produção (lote unitário)

	10	Cadeia de valor mais colaborativa
	11	Produção de acordo com os requisitos individuais dos clientes
	12	Aumento na satisfação dos clientes
	13	Maior integração do cliente na cadeia de valor

FONTE: O Autor (2017)

O trabalho de Stock & Seliger (2016) teve uma grande contribuição para o tema, apresentando as oportunidades que a Indústria 4.0 pode trazer para tornar a manufatura mais sustentável. Para isso, as oportunidades são divididas em macro e micro perspectivas. Macro perspectivas está relacionado ao modelo de negócios e rede de criação de valor, como estes podem se tornar mais sustentáveis com a Indústria 4.0. No que diz respeito às micro perspectivas, os autores apresentaram as oportunidades para tornar a manufatura mais sustentável em relação aos equipamentos, pessoas, organização, processo e produto, demonstrando que a Indústria 4.0 pode ter uma forte relação com a sustentabilidade dentro de uma empresa.

Beier *et al.* (2017) apresentou um estudo de como a digitalização da indústria pode afetar a sustentabilidade em empresas de manufatura, comparando assim empresas de dois países com estrutura industrial bem diferentes: Alemanha, um país altamente industrializado e China, que ainda está em processo de industrialização. Os principais resultados demonstram que a Indústria 4.0 tem forte impacto na dimensão ambiental da sustentabilidade, no que diz respeito ao aumento na eficiência no uso dos recursos e as oportunidades para o uso de fontes de energia renováveis. Outro resultado da pesquisa está relacionado à dimensão social, visto que o aumento da automatização pode ocasionar uma diminuição no número de empregos, principalmente nos países em industrialização como a China.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo é apresentado o enquadramento da pesquisa, bem como os procedimentos que são aplicados para a condução da mesma. Por fim, é proposto o método de diagnóstico aplicado na empresa do estudo de caso.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa é um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais (MARCONI & LAKATOS, 2003). De acordo com Prodanov & De Freitas (2013), a pesquisa científica deve ser sistemática, metódica e crítica, pois tem por objetivo conhecer cientificamente um ou mais aspectos de determinado assunto.

O primeiro passo ao iniciar uma pesquisa é classificá-la quanto aos seus principais aspectos: à natureza, aos objetivos, aos procedimentos e à abordagem. Em relação à natureza, essa pesquisa classificou-se como básica, pois procura desenvolver novos conhecimentos científicos sem a preocupação direta com suas aplicações e consequências práticas, envolvendo verdades e interesses universais (GIL, 2008; PRODANOV & DE FREITAS, 2013).

Quanto aos objetivos, a pesquisa tem por finalidade proporcionar uma visão geral sobre o assunto a ser investigado, sendo assim classificada como exploratória. Este tipo de pesquisa é aplicado quando o tema em estudo é pouco explorado, sendo difícil formular hipóteses precisas e operacionalizáveis (GIL, 2008).

No que diz respeito aos procedimentos, a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso foram os métodos aplicados. A pesquisa bibliográfica, conforme Prodanov & De Freitas (2013), é capaz de colocar o pesquisador em contato direto com todo o material já escrito sobre o assunto. O estudo de caso é um método aplicado quando surgem questões do tipo “como” e “por que” sobre o assunto do estudo em questão e o pesquisador tem pouco ou nenhum controle (YIN, 2001). De acordo com Gil (2008), o estudo de caso é caracterizado por ser um método profundo e exaustivo, permitindo amplo conhecimento sobre o tema em estudo, tendo como principais propósitos: (a)

explorar situações da vida real cujos limites não estão claramente definidos; (b) descrever a situação do contexto em que está sendo feita determinada investigação; (c) explicar as variáveis causais de determinado fenômeno em situações muito complexas que não possibilitam a utilização de levantamentos e experimentos.

Em relação à abordagem da pesquisa, esta foi classificada como qualitativa, pois como define Prodanov & De Freitas (2013), quando o objetivo de um trabalho é gerar entendimento, descrição, descoberta, generalização ou hipóteses sobre determinado tema, a abordagem qualitativa é aplicada. O Quadro 9 resume a classificação da pesquisa.

QUADRO 9 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	Quanto à natureza	BÁSICA Desenvolver novos conhecimentos sem a preocupação da aplicação prática
	Quanto aos objetivos	EXPLORATÓRIA Proporcionar uma visão geral sobre o assunto a ser investigado
	Quanto aos procedimentos	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA Contato direto com todo o material já escrito sobre o assunto
		ESTUDO DE CASO Método profundo e exaustivo, onde os limites não estão claramente definidos
	Quanto à abordagem	QUALITATIVA Gerar entendimento, descrição, descoberta, generalização ou hipóteses sobre o tema em estudo

FONTE: O Autor (2017)

Na próxima seção são detalhados os procedimentos utilizados para a condução da pesquisa.

3.2 PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

A pesquisa pode ser definida como o processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico, com o objetivo de descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos (GIL, 2008). Sendo

assim, é necessário desenvolver um roteiro ou procedimento para execução da pesquisa, desde a fase inicial, quando ainda pouca informação se tem sobre o assunto, até a fase final, onde depois de um longo período de estudo e investigações, são apresentados os resultados e as conclusões da pesquisa.

O estudo de caso foi o procedimento adotado neste trabalho, por envolver um estudo profundo de determinado tema, com objetivo de ampliar e detalhar conhecimento (YIN, 2001). Para atingir os objetivos da pesquisa, o trabalho precisa seguir um certo rigor metodológico, fazendo-se necessário definir os métodos e técnicas para coleta de dados e um planejamento para a condução do estudo de caso (MIGUEL, 2007).

Prodanov & De Freitas (2013) apresentam uma sequência de cinco etapas para o desenvolvimento de uma pesquisa científica:

- a) Preparação da pesquisa: seleção, definição e delimitação do tópico ou problema a ser investigado; revisão bibliográfica; planejamento para a condução da pesquisa; formulação de hipóteses e construção de variáveis;
- b) Trabalho de campo (coleta de dados);
- c) Processamento dos dados (sistematização e classificação dos dados);
- d) Análise e interpretação dos dados;
- e) Elaboração do relatório de pesquisa.

Inicialmente foram definidos os objetivos iniciais a serem alcançados com o desenvolvimento do trabalho, bem como levantados os principais problemas que podem ser solucionados com a aplicação do método proposto. Nesta etapa inicial também foram definidas as prioridades e a metodologia para alcançar os objetivos propostos;

Definido os objetivos do trabalho, foi realizado o referencial teórico sobre o assunto a ser estudado, o qual foi a base para o desenvolvimento de todo o trabalho. Neste caso, o referencial teórico abordou três principais temas: indicadores de sustentabilidade, tecnologias da Indústria 4.0 e os impactos da Indústria 4.0 em sustentabilidade. Somente após um bom referencial teórico foi possível seguir para as etapas seguintes e assim conseguir atingir os objetivos do trabalho de forma satisfatória.

A definição do problema e dos objetivos e o referencial teórico são as fases de preparação do trabalho, onde são levantadas todas as informações necessárias para poder aplicá-lo dentro de uma organização. Para seguir com os próximos passos, é necessário definir os instrumentos de coleta de dados. De acordo com Yin (2001), o estudo de caso baseia-se em seis fontes de evidências: documentos, registros em arquivos, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos.

Para esta pesquisa, optou-se por utilizar as seguintes fontes de evidências:

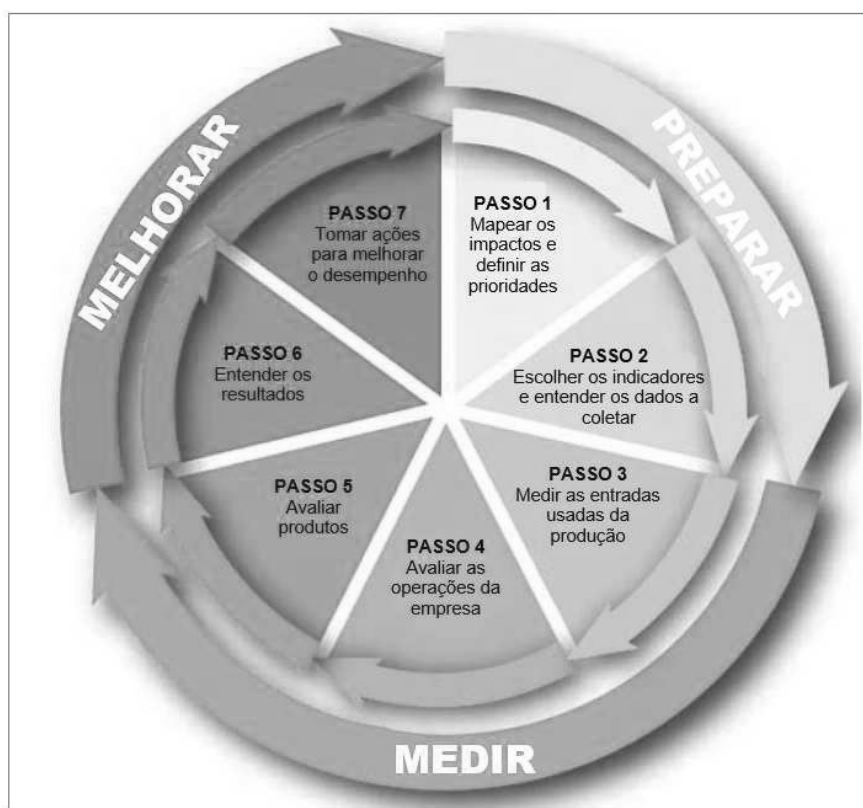
- Observação Direta: através de visitas nos processos produtivos da empresa, mapeando o processo com foco em sustentabilidade e avaliando possíveis processos e oportunidades para implementação das tecnologias da Indústria 4.0;
- Análise Documental: relatórios e projetos da empresa que sejam acessíveis e tenham ligação com o tema em estudo.

Finalizada a fase teórica do trabalho, o passo seguinte foi o desenvolvimento do método de diagnóstico para aplicar na empresa do estudo de caso, o qual é apresentado na próxima seção.

3.3 MÉTODO DE DIAGNÓSTICO PROPOSTO

O método de diagnóstico proposto neste trabalho foi baseado no modelo da OECD (*The Organization for Economic Co-operation and Development*), uma organização reconhecida mundialmente por promover políticas com o objetivo de melhorar o bem-estar econômico e social das pessoas. Este modelo foi escolhido como base por ser um modelo que apresenta baixa complexidade para aplica-lo na avaliação dos indicadores de sustentabilidade dentro de uma organização, ser eficiente principalmente para melhorar o desempenho ambiental e estar de acordo com os objetivos estabelecidos neste trabalho. O modelo criado pela OECD é ilustrado na Figura 6.

FIGURA 6 – OECD SUSTAINABLE MANUFACTURING TOOLKIT



FONTE: Traduzido de OECD (2011)

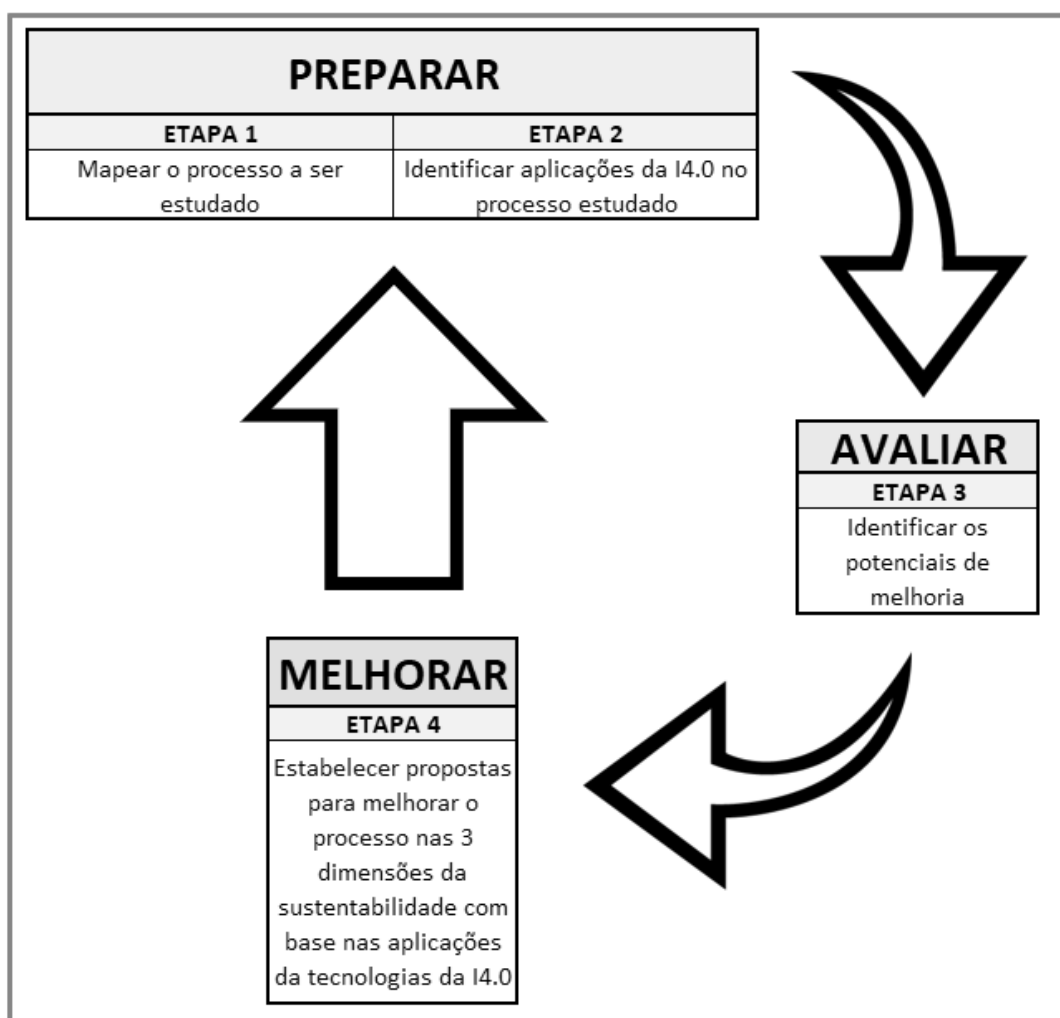
Algumas modificações foram realizadas no modelo para alcançar o objetivo deste trabalho:

- O modelo da OECD está focado nos indicadores ambientais da sustentabilidade. Para isso, fez-se necessário incluir indicadores sociais e econômicos da sustentabilidade, englobando assim os três pilares da sustentabilidade;
- Outro ponto importante a considerar no modelo é a inclusão das tecnologias da Indústria 4.0 e como estas podem ser avaliadas no modelo. Com isso, algumas modificações foram realizadas nas etapas no modelo da OECD, sendo possível incluir a questão da Indústria 4.0 e como esta pode contribuir para melhorar os indicadores de Sustentabilidade dentro de uma organização;
- Para tornar o modelo prático, foram incluídas algumas ferramentas que auxiliam na identificação das oportunidades dentro dos processos

produtivos para torna-los mais sustentáveis, bem como tecnologias da Indústria 4.0 disponíveis atualmente no mercado.

Sendo assim, foi desenvolvido o método de diagnóstico para condução do estudo de caso e alcançar os resultados esperados para o trabalho. O método desenvolvido é apresentado na Figura 7.

FIGURA 7 – MÉTODO DE DIAGNÓSTICO



FONTE: O Autor (2017)

Diferente do modelo da OECD, o método proposto neste trabalho apresenta quatro etapas, as quais são apresentadas em detalhes a seguir.

- Etapa 1: dentro dessa fase é necessário conhecer o processo e identificar as oportunidades de melhoria. Foram selecionados três modelos que a

literatura apresenta de VSM (*Value Stream Mapping*) que auxiliam nessa etapa. Estes VSM têm como diferencial incluir questões de sustentabilidade e Indústria 4.0 ao modelo de VSM padrão. Os modelos selecionados foram:

- *Value Stream Mapping (Sus-VSM)*: proposto por Faulkner & Badurdeen (2014). Neste modelo são incluídas métricas sociais e ambientais ao modelo tradicional do mapeamento de fluxo de valor, sendo possível identificar potenciais pontos de melhorias em questões como consumo de energia, água e matéria-prima; melhorias no bem-estar dos trabalhadores como nível de ruído, exposição a riscos ou excesso de movimentos repetitivos;
- *Value Stream Mapping 4.0*: neste modelo proposto por Meudt *et al.* (2017) é possível identificar oportunidades de digitalização no processo produtivo para então propor melhorias com a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0;
- *Smart Value Stream Mapping (SVSM)*: proposto por Haschemi & Roessler (2017). Este modelo tem por objetivo integrar a chamada Manufatura Digital ou Indústria 4.0 ao modelo tradicional do VSM. O SVSM permite identificar três principais características da Indústria 4.0: nível de digitalização, integração e automação das informações e fluxos de materiais, incluindo fornecedores e clientes.

O Anexo B apresenta um modelo de aplicação do Sus-VSM, do *Value Stream Mapping 4.0* e do SVSM.

- Etapa 2: esta etapa tem por objetivo realizar um *benchmarking* das tecnologias da Indústria 4.0, identificar empresas que trabalham com estas tecnologias e quais são as mais adequadas para cada processo. Enquanto na revisão da literatura são identificadas as tecnologias da Indústria 4.0 de forma mais generalizada, nesta etapa são identificadas as aplicações práticas e comerciais para estas tecnologias.

Com as etapas 1 e 2 concluídas, há informações e dados suficientes para seguir para a fase final do trabalho ou a fase de identificação e propostas de melhorias.

- Etapa 3: com as informações levantadas nas fases 1 e 2, faz-se necessário identificar os potenciais de melhoria, ou seja, identificar onde aplicar e qual

tecnologia aplicar. Para isso, algumas questões precisam ser respondidas nesta etapa para auxiliar na correta identificação das melhorias: Quanto dinheiro posso investir? Qual o tempo disponível para implementar esta tecnologia? Quanto tempo tenho para retornar o investimento aplicado? Quais indicadores de sustentabilidade são mais críticos no processo estudado? Quanto quero melhorar esses indicadores? Tenho pessoal capacitado para trabalhar com esta tecnologia? Essas são algumas questões fundamentais para chegar a última etapa do método;

- Etapa 4: nesta etapa é apresentado o resultado do trabalho. São estabelecidas propostas de quais tecnologias da Indústria 4.0 a aplicar no processo produtivo e como estas podem influenciar nos indicadores de sustentabilidade, de acordo com as estratégias definidas pela organização no início do trabalho.

O Quadro 10 ilustra os departamentos e profissionais a serem envolvidos para a aplicação do método. Este quadro também mostra as principais questões levantadas para que a aplicação do método possa ser realizada. A escolha desses profissionais é de extrema importância, principalmente para as etapas 1 e 3 do método.

QUADRO 10 – DEPARTAMENTOS E PROFISSIONAIS DA EMPRESA

DEPARTAMENTO	Produção
RESPONSÁVEL	Coordenador / Líder de Produção
TÓPICOS	Como ocorre o fluxo de informações no processo?
	Quais são o principais indicadores no processo?
	Como são coletados e atualizados os indicadores?
	Como é feita a rastreabilidade das peças?
	Como são controlados os índices de refugo e retrabalho
	Quais os equipamentos mais críticos?
DEPARTAMENTO	Manutenção
RESPONSÁVEL	Coordenador / Engenheiro de Manutenção
TÓPICOS	Como é realizada a programação da Manutenção?
	Como é feita a comunicação entre as máquinas / robôs?
	Quais os principais indicadores de Manutenção?
	Quais os principais motivos de parada dos equipamentos?
	Como são realizadas as manutenções preventivas / preditivas e corretivas?
	Como é realizada a aplicação das ferramentas AM e PM
DEPARTAMENTO	Qualidade

RESPONSÁVEL	Coordenador / Engenheiro de Qualidade
TÓPICOS	Quais os principais documentos aplicados no processo para garantir a qualidade?
	Quais as principais ferramentas da Qualidade (CEP, FMEA, MASP, etc.)
	Quais os principais indicadores controlados pela Qualidade?
	Quais as principais causas de refugo e retrabalho?
	Como são realizados os apontamentos no sistema?
DEPARTAMENTO	Planejamento e Controle da Produção
RESPONSÁVEL	Coordenador de PCP
TÓPICOS	Como é o fluxo de uma ordem de produção?
	Como funciona o ERP da empresa e a comunicação com outros sistemas?
	Como são tratados os pedidos especiais?
	Quais os principais indicadores?
	Como é realizada a comunicação com fornecedores?
	Como são realizados os controles de estoque?
DEPARTAMENTO	Engenharia de Processos
RESPONSÁVEL	Coordenador / Engenheiro de Processos
TÓPICOS	Quais são os principais sistemas e como é a integração desses sistemas?
	Quais os principais indicadores do setor?
	São aplicadas ferramentas de simulação no processo?
	Quais os documentos aplicados no controle do processo?
	Como são desenvolvidos os novos processos?
	Como é a comunicação com os outros departamentos?
DEPARTAMENTO	Meio Ambiente
RESPONSÁVEL	Engenheiro / Técnico da Qualidade
TÓPICOS	Como são monitorados os principais indicadores ambientais?
	Como são definidas as metas para esses indicadores?
	Qual a porcentagem de material reciclado aplicado no processo?
	São utilizadas fontes de energia renováveis?
	Como é avaliado o desempenho ambiental da empresa?
	Como é controlado e realizado o descarte dos materiais?

FONTE: O Autor (2017)

No próximo capítulo é apresentado a aplicação do método em um processo produtivo em uma empresa de manufatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os principais resultados encontrados na pesquisa. Primeiramente, é apresentada algumas informações e dados da empresa do estudo de caso. Na sequência, é detalhado a aplicação do método de diagnóstico: o mapeamento do processo da empresa (etapa 1), identificação das aplicações e empresas da I4.0 (etapa 2), potenciais de melhorias no processo estudado (etapa 3) e propostas de aplicação das tecnologias da I4.0 para as oportunidades identificadas (etapa 4). Por fim, é realizado uma síntese dos resultados.

4.1 INFORMAÇÕES E DADOS DA EMPRESA

A empresa do estudo de caso é uma multinacional de grande porte, do setor automotivo, de origem europeia, localizada no estado do Paraná. A escolha de empresa foi de forma intencional, devido ao alto grau de automação de seus processos e por ter os conceitos de *Lean Manufacturing* e sustentabilidade já consolidados dentro da organização, sendo a introdução da Indústria 4.0 um próximo passo na busca de um melhor desempenho nos processos produtivos.

Atualmente, a empresa opera em um turno e emprega 45 funcionários. Os principais processos são montagem, solda manual e solda automática. Ao todo, há 36 robôs que realizam os mais diversos processos, demonstrando assim o alto nível de automação do processo.

O tempo de ciclo, ou seja, o tempo necessário para produzir um produto está em torno de 12 minutos e a eficiência do processo, medida pelo OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) é de 87%, um nível que demonstra a excelência operacional do processo, tendo como meta para os próximos dois anos chegar a um nível de 91%.

A empresa em estudo está localizada em um complexo industrial, com mais duas fábricas do mesmo grupo que produzem diferentes produtos. Devido às características do processo, esta unidade sozinha é responsável pelo consumo de quase 70% de toda água e energia consumida no complexo.

A questão de segurança é um ponto muito relevante para a organização e todo o processo é desenvolvido para evitar qualquer tipo de acidente, sendo que a empresa está há mais de três anos sem acidentes de trabalho com afastamento.

A Tabela 2 apresenta alguns dados referentes ao ano de 2016, disponibilizados pela empresa e apresentados no Relatório de Sustentabilidade 2017, no que diz respeito à matriz energética, consumo de energia e água e emissões. Esses números são de todo o complexo industrial, sendo que a planta onde foi realizado o estudo de caso representa aproximadamente 70% desses valores.

TABELA 2 – DADOS REFERENTES AOS PRINCIPAIS INDICADORES AMBIENTAIS DA EMPRESA

MATRIZ ENERGÉTICA	Eletricidade	79%
	Gás Natural	16%
	GLP	5%
CONSUMO DE ENERGIA (MWh)	Elétrica	40.810,46
	GLP	2.478,11
	Gás Natural	8.487,56
	Diesel	2.777,47
CONSUMO DE ÁGUA	Abastecimento público	29%
	Poços artesianos	71%
EMISSIONES	NOx	15,78 ton
	CO ₂	5076,8 ton
	SO ₂	1,43 ton
	HCFC (R22)	93,8 kg

FONTE: RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE DA EMPRESA (2017)

Outro ponto a destacar em relação à empresa está na questão do destino dos resíduos gerados na planta. Desde 2008 a planta é certificada com aterro zero, ou seja, nenhum resíduo produzido na planta é enviado para aterro sanitário, sendo estes reciclados ou destinados para coprocessamento.

A seguir são apresentados os resultados da aplicação do método de diagnóstico desenvolvido no capítulo 3.

4.2 MAPEAMENTO DO PROCESSO (ETAPA 1)

O mapeamento do processo permite identificar o fluxo das informações, os processos gargalos e os recursos necessários aplicados em todo o processo

produtivo. O Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV) é uma ferramenta aplicada por muitas empresas para encontrar potenciais pontos de melhoria, impactando em qualidade, aumento de produtividade, ergonomia, redução de estoques e até mesmo segurança dos operadores.

No estudo de caso foi aplicado uma junção dos três modelos de MFV: *Value Stream Mapping (Sus-VSM)* (Faulkner & Badurdeen, 2014), *Value Stream Mapping 4.0* (Meudt *et al.*, 2017), *Smart Value Stream Mapping (SVSM)* (Haschemi & Roessler, 2017). Esses modelos incluem questões de sustentabilidade e características da Indústria 4.0, contribuindo assim para atingir o objetivo do trabalho. Procurou-se retirar de cada modelo as características que mais se encaixavam no processo da empresa do estudo de caso.

O processo em estudo tem alto grau de automação, onde cerca de 90% das operações são realizadas por robôs e contempla operações de montagem e soldagem, onde são aplicados três tipos de solda: MAG, solda ponto e solda à laser.

Outro ponto importante a definir ao realizar o mapeamento de processo, com base nos modelos apresentados, é definir os indicadores de sustentabilidade que são avaliados no processo. Com base na relação de indicadores apresentados por Winroth *et al.* (2016) e nas características do processo da empresa do estudo de caso, foram definidos os seguintes indicadores de sustentabilidade para serem avaliados: OEE, Consumo de energia e água e número de acidentes de trabalho.

O OEE está ligado ao pilar econômico da sustentabilidade e foi escolhido este indicador por englobar dados de qualidade, disponibilidade e desempenho do processo, sendo este um dos indicadores mais importante controlado pela empresa. No pilar ambiental foram selecionados os indicadores de consumo de energia e água, pois a energia representa um dos maiores custos em todo o processo e esta unidade do estudo de caso, devido às características do processo, apresenta um alto consumo de energia. Há um grande consumo de água no processo, sendo assim, além do abastecimento público, poços artesianos são utilizados para atender às necessidades da empresa, por isso a relevância deste indicador. Por fim, no pilar social, foi definido o indicador de número de acidentes de trabalho, devido à grande preocupação que a empresa tem com a integridade física de seus funcionários e esta ser exemplo em questões de segurança.

O objetivo ao realizar o MFV neste trabalho é identificar as oportunidades de implementação das tecnologias da Indústria 4.0, por isso, o MFV foi focado no fluxo do processo, nos indicadores medidos no processo, no número de operadores em cada operação e na natureza da operação, se esta é realizada de forma manual ou automática. Também foi avaliado o nível de automação, integração e digitalização do processo. Não foi levantado dados de questões como estoque e tempo das operações, pois a empresa trabalha fortemente com a aplicação das ferramentas do *Lean* e não era uma preocupação da mesma. O MFV realizado na empresa é apresentado no Apêndice 1.

Algumas considerações importantes sobre o MFV:

- As operações estão descritas em uma ordem numérica sequencial para garantir a confidencialidade exigida pela empresa. Ao todo são 23 operações, sendo a maior parte delas operações de solda automatizadas;
- Além dos operadores designados para cada operação, há também três líderes de produção que fazem parte de todo o processo;
- As operações estão balanceadas e o tempo de ciclo atual é de 12 min, sendo uma produção diária por turno de 41 unidades;
- Observa-se também que os indicadores não são medidos de forma individual por operação e o OEE é um dos únicos indicadores medido em três operações diferentes, sendo estes representativos para todo o processo. Os indicadores de consumo de energia e água e número de acidentes de trabalho é medido em todo o processo, não havendo operações específicas onde são medidos.

O MFV da situação atual permitiu identificar os seguintes pontos importantes que precisam ser considerados como oportunidades de melhorias e implantações das tecnologias da Indústria 4.0:

- 1) O fluxo de informações ocorre de forma manual, ou seja, os controles de processo e produção são realizados com marcações em planilhas pelo próprio operador e atualizados no sistema pelo líder de produção;
- 2) Os indicadores e instruções de trabalho são disponibilizados de forma física, expostos em quadros ou guardados em pastas, onde qualquer alteração

exige que todos os documentos sejam atualizados para acesso dos operadores e pessoas ligadas à produção;

- 3) Não é possível identificar as operações que apresentam maior consumo de energia ou água, devido ao fato de não haver controle destes indicadores individualmente por operação e apenas do processo como um todo;
- 4) Na linha principal, o produto percorre as operações sobre um suporte, chamado de *pallet*, o qual inicia na operação 13 e vai até operação 18. Chegando na operação 18, este precisa ser retirado e enviado novamente para a operação 13. Este processo é realizado por um carro elétrico, conduzido por um operador que fica 50% do turno destinado para esta operação;
- 5) Os operadores realizam atividades de manutenção simples diárias nos equipamentos, onde é definido uma rota, as atividades e tempo para execução. Este processo precisa ser registrado em uma planilha para controle de execução das atividades;
- 6) No processo, há um nível alto de automação conforme é visualizado no MFV. Enquanto isso não há uma integração no processo, ou seja, as informações são enviadas nível após nível e nem todas as informações estão acessíveis para todos em tempo real. No processo, ocorrem reuniões diárias entre o líder e os operadores, entre a coordenação e a equipe de suporte (Manutenção, Engenharia, Materiais, PCP e Qualidade) e também entre a gerência e a coordenação. Na questão de digitalização, algumas instruções de trabalho são disponibilizadas de forma digital, sendo estas apenas uma cópia, a qual o operador apenas pode visualizar, não sendo possível qualquer interação com a mesma. Para medir o grau de automação, digitalização e integração do processo, foram utilizadas as questões propostas por Haschemi & Roessler (2017), conforme demonstra o Quadro 11.

QUADRO 11 – QUESTÕES PARA AVALIAÇÃO DO GRAU DE DIGITALIZAÇÃO, AUTOMAÇÃO E INTEGRAÇÃO

DIGITALIZAÇÃO	AUTOMAÇÃO	INTEGRAÇÃO
Como são organizados os processos para clientes e colocação do pedido no fornecedor (via fluxo de trabalho eletrônico, via telefone, e-mail, carta escrita, contato pessoal, etc.)?	É necessária uma intervenção manual para converter pedidos de clientes em ordens de produção / para liberar ordens para fornecedores?	O sistema ERP dos clientes, ERP interno e ERP dos fornecedores são interligados para permitir a colocação direta da ordem de produção ou verificação de inventário, quantidades e capacidades de produção?
Quantos fluxos de trabalho existem e como é o grau de digitalização?	Em que medida a derivação e a entrega das ordens de produção na fabricação é automatizado?	O processo de produção está conectado a sistemas de TI para capturar o real status do equipamento e status da ordem de produção?
Quantos fluxos de informação existem no processo (interno, de entrada e saída)?	Quantos fluxos de informação e materiais existem no geral (interno, entrada e saída) neste processo?	Em que medida armazenamentos físicos e entidades de transporte estão interligadas entre si e com os processos de produção, por exemplo, por sistemas de TI?
Quão grande é o grau de digitalização para esses fluxos de informações (por exemplo, instruções de trabalho, captura de dados de produtividade, rastreabilidade)?	Como são as taxas gerais de automação para o processo de produção (considerando ambos material e fluxo de informação)?	O inventário é suportado de forma online?
Até que ponto os processos logísticos (por exemplo, armazenamento, transporte e comissionamento) são suportados digitalmente?	Até que ponto os processos logísticos (por exemplo, armazenamento, transporte e comissionamento) são automatizados em termos de fluxos de informação e movimento físico de material?	

FONTE: Traduzido de Haschemi & Roessler (2017)

- 7) O OEE é o indicador mais controlado no processo, o qual apresenta um valor em torno de 87%. A meta da empresa é em dois anos passar dos 90%. Esse indicador é medido nas operações 1, 15 e 21. O operador é responsável, no final do turno, por preencher uma planilha com a produção

e os tempos de parada do equipamento. Essa planilha é recolhida pelo líder e atualizada no sistema no dia seguinte.

4.3 IDENTIFICAÇÃO DAS APLICAÇÕES E EMPRESAS DA I4.0 (ETAPA 2)

Diante dos dados e informações coletadas com o MFV, analisando as necessidades e objetivos da empresa, foi possível levantar as oportunidades e propor aplicações das tecnologias da Indústria 4.0 no processo produtivo. O Quadro 12 apresenta um levantamento de empresas nacionais e internacionais e as principais tecnologias da Indústria 4.0 disponíveis no mercado.

QUADRO 12 – EMPRESAS E TECNOLOGIAS DA I4.0

EMPRESA	LINK ELETRÔNICO	TECNOLOGIAS DA I4.0
Advantech	http://www.advantech.com.br/industrial-automation/industry4.0/	Soluções em automação para a I4.0
AGVS	http://www.agvs.com.br/	AGVs
Arburg	arburg.com	Manufatura Aditiva
Archon	archon.ai	Drones
Autaza	https://www.autaza.com/	Inteligência artificial
AXOOM	axoom.com/en/	Plataforma digital / Integração
Bachmann electronic	bachmann.info	Soluções em automação para a I4.0
Balluff	balluff.com	Sensores
Beckhoff Automation	beckhoff.com/TwinCAT-Industrie40	Big Data
Bosch Rexroth AG	https://www.boschrexroth.com/en/xc/trends-and-topics/industry-4-0/connected-industry-1	Aplicações e Produtos da I4.0
Catkin	catkin.eu/en/	Smart logística / Digitalização
Centigrade	centigrade.de/em	Realidade Aumentada / Softwares para integração
DCBrain	dcbrain.com	Inteligência artificial
Essert	https://essert.com/augmented-automation/?lang=en	Soluções em Realidade Aumentada
Expert Teleportation	expert-teleportation.com	Smartglasses / Dispositivos
Festo Didactic	http://www.festo-didactic.com/int-en/highlights/qualification-for-industry-4.0/industry-4.0-at-festo	Treinamento e Exemplos da aplicação da I4.0

GE	https://www.ge.com/digital/predix	Plataforma para Internet Industrial
GoEpik	http://goepik.com.br/	Soluções em Realidade Aumentada
Intelup	http://www.intelup.com.br/pt-BR	Digitalização / Integração de Sistemas
Knapp	https://www.knapp.com/en/	Tecnologias da I4.0 para Logística
KUKA	https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-quantec-pro	Robôs para a I4.0
M&M Software	mm-software.com	Soluções em IOT
MPDV Mikrolab GmbH	mpdv.com	Digitalização / Plataforma de integração em manufatura
Nexxto	https://nexxto.com/	Soluções em IOT
PROXIA Software	proxia.com	Soluções em softwares para a I4.0
Robert Bosch	https://www.bosch.com/products-and-services/connected-products-and-services/industry-4-0/	Aplicações e Produtos da I4.0
SAP	https://www.sap.com/index.html	Soluções em softwares para a I4.0
SAP	https://www.sap.com/brazil/products/technology-platforms/big-data-hadoop.html	Big Data
SICK	https://www.sick.com/br/pt/solucoes-de-identificacao/rfid/c/g93063	RFID
Siemens	https://www.siemens.com/global/en/home/company/topic-areas/future-of-manufacturing/digital-enterprise.html	Digitalização em Manufatura
Tableau	https://www.tableau.com/pt-br	Big Data
Ubimax	http://www.ubimax.com/en/	Soluções em Realidade Aumentada / Smartglasses
Universal Robots	https://www.universal-robots.com/	Robôs colaborativos
Virtalis	virtalis.com	Realidade Virtual
VRMAT	http://www.vrmat.com.br/pt/simulador-virtual-de-soldagem-solvi-4-0/	Simulação aplicada em processos de solda
Wurth	https://www.wuerth-industrie.com/web/en/wuerthindustrie/cteile_management/kanban/ibin_intelligenterbehaelter/ibin.php	Tecnologias da I4.0 para Logística

FONTE: O Autor (2017)

Com base na relação de empresas e tecnologias da I4.0 e nos objetivos da empresa do estudo de caso, foram selecionadas quatro oportunidades para iniciar a

implementação das tecnologias da I4.0. Estas oportunidades são apresentadas a seguir, sendo identificadas como OP1, OP2, OP3 e OP4.

4.3.1 OPORTUNIDADE 1 (OP1)

4.3.1.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)

A digitalização do processo é o primeiro passo para a implementação da I4.0, sendo assim, todos os indicadores e informações do processo precisam estar disponíveis em tempo real para que as ações sejam tomadas com base no que está acontecendo no momento do problema e não sobre dados e informações passadas. O fluxo de informações na empresa estudada depende de pessoas específicas para atualizar o sistema e os dados ficam disponíveis apenas no dia seguinte, logo, as ações são tomadas após a ocorrência do problema.

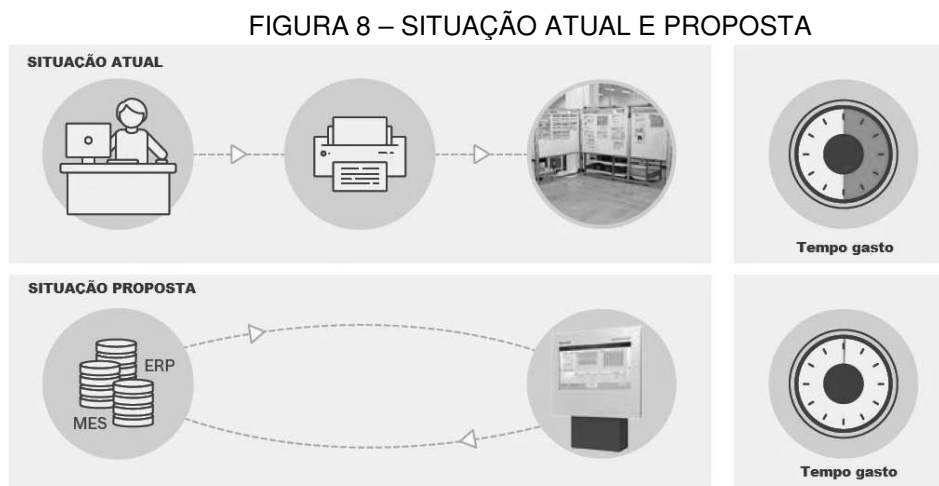
O acesso aos indicadores e informações do processo estão disponíveis em quadros, onde diariamente as informações são impressas fisicamente para serem disponibilizadas em locais específicos no ambiente fabril. Na atual situação, há desperdício de recursos, pois é necessário que as informações sejam atualizadas manualmente, utilizando tempo do líder de produção e um alto volume de papel é desperdiçado todos os dias.

4.3.1.2 Proposta de aplicação das tecnologias da I4.0 (ETAPA 4)

Neste contexto, a tecnologia da Indústria 4.0 mais indicada para ser empregada no processo é o Big Data. O Big Data permite que os dados sejam coletados e apenas os dados relevantes para o processo estejam disponíveis, reduzindo assim custo e tempo na tomada de decisões, impactando diretamente no OEE do processo. O Big Data permite que todas as informações estejam disponíveis de forma online, ou seja, por meio de dispositivos como *smartphone*, *tablet* e *smartwatches*, todos têm acesso às informações em tempo real.

Empresas como SAP e Tableau fornecem soluções de Big Data e Bosch Rexroth e Axiom são empresas que apresentam soluções de plataformas digitais, ou

seja, dispositivos para disponibilizar as informações na produção, de forma visual e sem necessidade de impressão física. A Figura 8 ilustra a situação atual e a proposta, demonstrando o ganho em tempo e como principal vantagem, o acesso às informações em tempo real.



FONTE: Traduzido de Rexroth Bosch Group (2017)

4.3.2 OPORTUNIDADE 2 (OP2)

4.3.2.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)

A empresa trabalha com os conceitos de manutenção autônoma (AM) e manutenção profissional (PM). A manutenção autônoma é realizada pelo próprio operador, onde há uma sequência de tarefas a serem realizadas diariamente, garantindo o correto funcionamento do equipamento. A Figura 9 ilustra um exemplo de aplicação dessa ferramenta.

realizadas com mais eficiência. O emprego da realidade aumentada impacta no OEE, pois aumenta principalmente a disponibilidade do equipamento.

Empresas como a GoEpik e Ubimax fornecem soluções para aplicação da realidade aumentada para as mais diversas atividades em manufatura, conforme ilustra a Figura 10.

FIGURA 10 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA REALIDADE AUMENTADA



FONTE: Ubimax (2017)

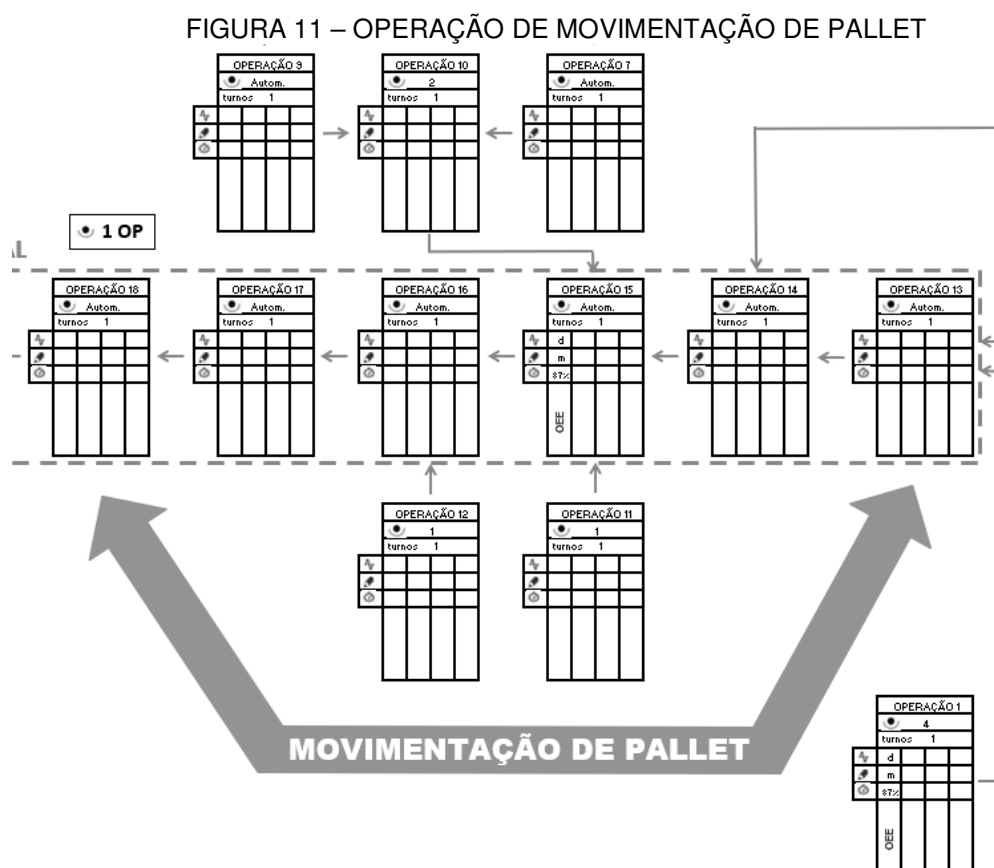
4.3.3 OPORTUNIDADE 3 (OP3)

4.3.3.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)

Dentro de uma indústria há uma grande movimentação de material, pois as linhas precisam ser abastecidas pelas peças que irão formar o produto final. Essa

movimentação, devido ao número de componentes que formam o produto final, é intensa dentro da indústria e pode ser realizada de várias formas, principalmente por meio de carrinhos elétricos conduzidos por um operador e pelos veículos guiados automaticamente (AGV).

O produto final, por ser de grande proporção, caminha na linha principal sobre um suporte, o qual é chamado de pallet. O produto entra na linha principal na operação 13, o qual é colocado sobre o pallet. Quando chega na operação 18, o pallet precisa ser retirado e retorna para a operação 13. A Figura 11 ilustra como é realizada esta operação.



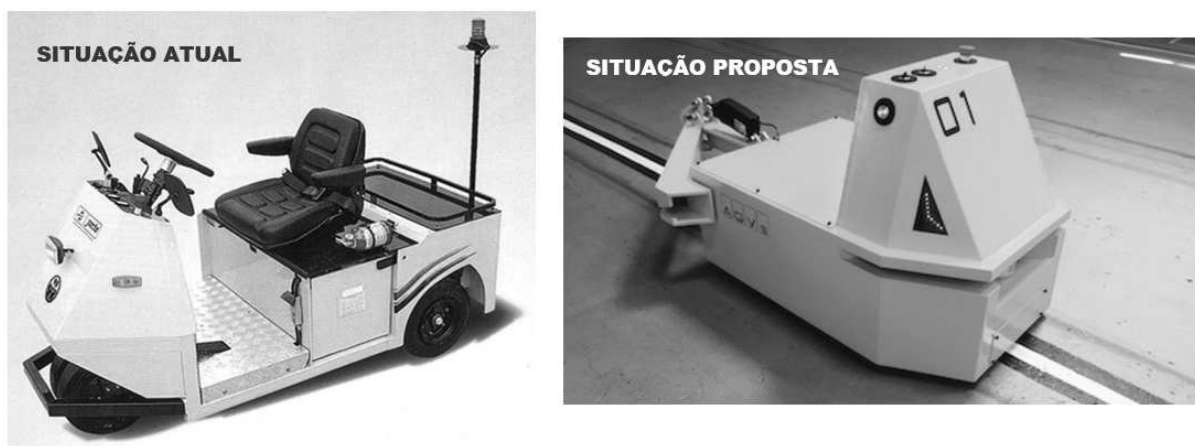
FONTE: O Autor (2017)

4.3.3.2 Proposta de aplicação das tecnologias da I4.0 (ETAPA 4)

Para realizar a movimentação do pallet, um operador fica 50% do turno destinado a esta operação. A tecnologia da I4.0 mais indicada neste processo é a

aplicação de um AGV. Com a implantação do AGV, haverá ganho em produtividade, pois o operador poderá ser destinado para outras atividades, impactando assim no OEE, bem como, o consumo de energia será menor, visto que o carrinho elétrico consome mais energia que um AGV. A Figura 12 ilustra a situação atual e a proposta.

FIGURA 12 – SITUAÇÃO ATUAL E PROPOSTA



FONTE: O Autor (2017)

4.3.4 OPORTUNIDADE 4 (OP4)

4.3.4.1 Potenciais de Melhoria (ETAPA 3)

Para garantir a qualidade do produto final, os operadores seguem as instruções de trabalho (IT), as quais ilustram a melhor forma de realizar determinada operação. Na empresa do estudo de caso, todas as IT são disponibilizadas de forma física, em pastas, dispostas nos postos de trabalho. A segurança ao realizar as operações é uma preocupação constante da empresa, por isso, no início de cada turno o operador precisa realizar o chamado *check-list* de segurança, uma sequência de verificações para garantir a segurança do equipamento e de quem vai operá-lo. Este *check-list* é realizado em forma de preenchimento de planilha, conforme ilustra a Figura 13.

4.4 SÍNTESE DAS OPORTUNIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0

Ao conhecer o processo e identificar as oportunidades de melhoria, observa-se que várias tecnologias da I4.0 podem contribuir para aumentar a produtividade no processo, a qualidade final dos produtos, reduzir o consumo de energia e água, evitar acidentes de trabalho, enfim, vários benefícios podem ser alcançados com a aplicação da I4.0.

Conforme ilustra o Quadro 13, três tecnologias foram identificadas com potencial para serem aplicadas no processo, sendo elas: o Big Data, a realidade aumentada e os AGVs.

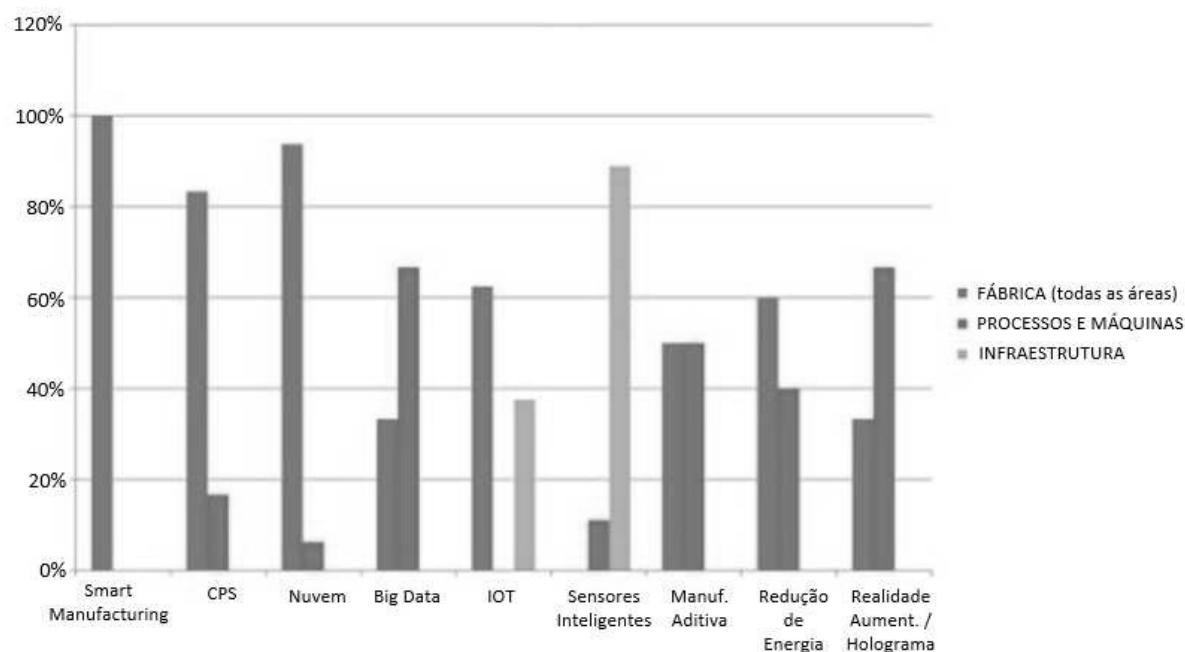
QUADRO 13 – RELAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0 COM AS OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS

Tecnologias da I4.0		OP1	OP2	OP3	OP4
	Big Data	X			
	IOT				
	Robôs Colaborativos				
	Nuvem				
	Manufatura Aditiva				
	AGVs			X	
	Realidade Aumentada / Digitalização		X		X
	Simulação				

FONTE: O Autor (2017)

A aplicação do Big Data e da realidade aumentada são duas tecnologias com maior aplicação dentro dos processos, conforme mostra o trabalho de Kang *et al.* (2016). Por meio de uma *survey* realizada na Coreia do Sul, Estados Unidos e Alemanha, o autor identifica nove tecnologias da I4.0 e relaciona com três áreas: fábrica (todas as áreas), processos e máquinas e infraestrutura. Dentro dessas três áreas, o Big Data e a realidade aumentada são as tecnologias mais aplicadas em processos e máquinas nos países estudados. O Gráfico 4 ilustra o resultado da *survey*.

GRÁFICO 4 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO DE CADA TECNOLOGIA



FONTE: Traduzido de Kang *et al.* (2016)

O Quadro 14 ilustra o impacto nos principais indicadores de sustentabilidade com as oportunidades identificadas.

QUADRO 14 – IMPACTO NOS PRINCIPAIS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

			OP1	OP2	OP3	OP4
Indicadores de Sustentabilidade	OEE	Qualidade	●	●	●	↑
		Disponibilidade	↑	↑	↑	↑
		Performance	↑	↑	↑	↑
	Consumo de água		●	●	●	●
	Consumo de energia		↓	●	↑	●
	Acidente de trabalho		●	●	↑	↑

↑ IMPACTA POSITIVAMENTE

● NÃO IMPACTA

↓ IMPACTA NEGATIVAMENTE

FONTE: O Autor (2017)

Para avaliar os impactos nos indicadores de sustentabilidade com a implementação das tecnologias da I4.0, foram consultados os profissionais envolvidos no processo produtivo da empresa e também os trabalhos de Syberfeldt *et al.* (2017) e Klimant *et al.* (2017).

A realidade aumentada impacta diretamente na disponibilidade, eficiência e qualidade do processo. O estudo de Syberfeldt *et al.* (2017) constatou que a aplicação da realidade aumentada pode trazer ganhos consideráveis em produtividade e qualidade dentro do processo produtivo. Para Klimant *et al.* (2017) a realidade aumentada é capaz de tornar o processo mais eficiente, com ganhos em tempo e dinheiro.

A aplicação das tecnologias da I4.0 vem para contribuir em uma maior inclusão social, estimulando a participação de toda a sociedade na indústria de manufatura, conforme destaca Wan *et al.* (2015). Essas tecnologias também contribuirão para tornar os processos mais inteligentes e verdes. De acordo com Kang *et al.* (2016), a I4.0 deve ser capaz de criar efeitos não apenas em indicadores econômicos, mas ser capaz de criar novos valores que podem contribuir para a sociedade como um todo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria é responsável pela produção de grande parte da riqueza do país, ao mesmo tempo é também um dos setores que mais contribui para o esgotamento dos recursos naturais. Com essa preocupação surge o conceito de desenvolvimento sustentável, de forma a conciliar a evolução da atividade industrial com o uso dos recursos de forma racional, garantindo o bem estar das pessoas tanto dentro como fora das organizações.

A busca por produzir o que o cliente deseja, no menor tempo possível e com o mínimo de desperdícios tem sido o objetivo das organizações e a Indústria 4.0 é mais uma estratégia que está sendo adotada para alcançar este objetivo. As características e tecnologias da Indústria 4.0 têm forte potencial para aumentar a produtividade, diminuir custos com manutenção, evitar acidentes de trabalho bem como reduzir o consumo de energia, além de outros benefícios que ela pode trazer.

Este trabalho teve como objetivo propor um método para diagnosticar as oportunidades de implementação das tecnologias da I4.0 em um processo produtivo e avaliar os impactos em indicadores de sustentabilidade. Identificar as oportunidades e avaliar os benefícios da I4.0 ainda são questões que norteiam as organizações e que geram dúvidas e incertezas sobre a introdução dessas novas tecnologias. Este trabalho teve como principal contribuição ampliar o conhecimento sobre as tecnologias da I4.0 e os impactos em sustentabilidade, bem como apresentar um método prático para iniciar a implementação da I4.0 dentro de uma organização.

A aplicação do método na empresa do estudo de caso se mostrou eficiente, onde foi possível identificar quatro oportunidades para iniciar a implementação das tecnologias da I4.0 e entender os possíveis impactos nos principais indicadores de sustentabilidade medidos pela empresa. Entre as limitações, destaca-se: o baixo conhecimento sobre I4.0 por parte dos profissionais da empresa; a empresa tem interesse na implementação das tecnologias da I4.0, porém ainda os projetos estão em estudo e pouca informação se tem a respeito deste tema; os indicadores de sustentabilidade são medidos em toda a empresa de forma geral, não havendo dados individuais de cada processo, impactando assim no resultado do MFV, dificultando a coleta de dados.

No resultado do estudo de caso, observou-se que a realidade aumentada, o Big Data e os AGVs são as três tecnologias com maior potencial para aplicação na empresa nesta etapa inicial, impactando nas três dimensões de sustentabilidade: OEE (pilar econômico), consumo de energia e água (pilar ambiental) e acidentes de trabalho (pilar social). Esses impactos foram avaliados com base na literatura e na experiência dos profissionais envolvidos no processo.

Para trabalhos futuros, são possíveis sugestões: empregar o método apresentado em uma empresa de outro setor, refinando o método e adaptando-o para outras aplicações; fazer uma avaliação econômica das tecnologias da I4.0 e entender quais delas tem um melhor retorno financeiro na empresa estudada; empregar o método em uma empresa que possua alguma tecnologia da I4.0 implementada e comparar com os resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ACATECH – National Academy of Science and Engineering. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0.** Alemanha, 2013. Disponível em: <http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf>. Acesso em: 18/05/2017.

ANDERL, R. Industrie 4.0 - technological approaches, use cases, and implementation. **at-Automatisierungstechnik**, v. 63, n. 10, p. 753-765, 2015.

ARENA, M.; CICERI, N. D.; TERZI, S.; BENGIO, I.; AZZONE, G.; GARETTI, M. A state-of-the-art of industrial sustainability: definitions, tools and metrics. **International Journal of Product Lifecycle Management**, v. 4, n. 1-3, p. 207-251, 2009.

BANCO MUNDIAL. **Expectativa de vida ao nascer.** Washington, EUA. 2017. Disponível em: < <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN?end=2015&locations=BR&start=1960&view=chart> >. Acesso em: 21/11/2017.

BCG – The Boston Consulting Group. **Industry 4.0 – The future of productivity and growth in manufacturing industries.** 2015. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx>. Acesso em: 14/05/2017.

BECHTOLD, J.; KERN, A.; LAUENSTEIN, C.; BERNHOFER, L. Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View. **Capgemini Consulting**, v. 31, 2014.

BEIER, G., NIEHOFF, S., ZIEMS, T., XUE, B. Sustainability aspects of a digitalized industry—A comparative study from China and Germany. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**. v. 4, n. 2, p. 227-234, 2017.

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

BORK, C. A. S.; DE SOUZA, J. F.; GOMES, J. de O.; CANHETE, V. V. P.; DE BARBA, D. J. Methodological tools for assessing the sustainability index (SI) of industrial production processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 5-8, p. 1313-1325, 2016.

CAPGEMINI. **Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View: sharpening the Picture beyond the Hype.** 2014. Disponível em: <https://www.capgemini.com/consulting-nl/wpcontent/uploads/sites/33/2017/08/industrie_4.0_0.pdf>. Acesso em: 18/05/2017.

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.

CHEN, D.; THIEDE, S.; SCHUDELEIT, T.; HERRMANN, C. A holistic and rapid sustainability assessment tool for manufacturing SMEs. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 63, n. 1, p. 437-440, 2014.

CNI (Confederação Nacional da Indústria). Desafios para Indústria 4.0 no Brasil. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>>. Acesso em: 22/05/2017.

CNI (Confederação Nacional da Indústria). Indústria 4.0: novo desafio para a indústria brasileira. 2016. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-66-industria-4-0/>>. Acesso em: 22/05/2017.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção E Operações: Manufatura E Serviços: Uma Abordagem Estratégica**. Editora Atlas SA, 2ª ed., 2009.

ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 39, p. 79-100, 2016.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 8-18, 2014.

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.

GABRIEL, M.; PESSL, E. Industry 4.0 and sustainability impacts: critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. **Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara**, v. 14, n. 2, p. 131, 2016.

GARETTI, M.; TAISCH, M. Sustainable manufacturing: trends and research challenges. **Production Planning & Control**, v. 23, n. 2-3, p. 83-104, 2012.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

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

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. Earth Overshoot Day. 2017. Disponível em: <<http://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day>>. Acesso em: 18/05/2017.

GOHR, C. F.; SANTOS, L. C.; GONÇALVES, A. M. C.; PINTO, N. O. Um método para a revisão sistemática da literatura em pesquisas de Engenharia de Produção. **XXXIII Enegep**. Salvador – BA, 2013.

HAAPALA, K. R.; ZHAO, F.; CAMELIO, J. *et al.* A review of engineering research in sustainable manufacturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 135, n. 4, 2013.

HARIK, R.; EL HACHEM, W.; MEDINI, K.; BERNARD, A. Towards a holistic sustainability index for measuring sustainability of manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 13, p. 4117-4139, 2014.

HASCHEMI, M.; ROESSLER, M. P. Smart Value Stream Mapping: An Integral Approach Towards a Smart Factory. **Proceedings of the 3rd International Congress on Technology–Engineering & Science**. 2017.

HELLENO, A. L.; DE MORAES, A. J. I.; SIMON, A. T. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: **System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on**. IEEE, 2015. p. 3928-3937.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contas Nacionais Trimestrais**. 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_Indicadores_IBGE/pib-vol-val_201603_caderno.pdf>. Acesso em: 17/05/2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Key world energy statistics**. França, 2016. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics.html>>. Acesso em: 16/05/2017.

ITA – Institute of Technology Assessment. Background Paper on the pilot project “Industry 4.0: Foresight & Technology Assessment on the social dimension of the next industrial revolution”. **Austrian Institute of Technology**. Viena, 2015.

JAIN, S.; RACHURI, S. Maturity Model Concepts for Sustainable Manufacturing. **National Institute of Standards and Technology (NIST)**. 2014.

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

JAYAL, A. D.; BADURDEEN, F.; DILLON, O. W.; JAWAHIR, I. S. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 2, n. 3, p. 144-152, 2010.

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

JOVANE, F.; YOSHIKAWA, L.; ALTING, L. *et al.* The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 641-659, 2008.

KANG, H. S.; LEE, J. Y.; CHOI, S. *et al.* 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.

KHAN, A.; TUROWSKI, K. A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0. In: **Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”(IITI’16)**. Springer International Publishing, p. 15-26, 2016.

KLIMANT, P.; KOLLATSCH, C.; SCHUMANN, M. Augmented Reality Solutions in Mechanical Engineering. In: **ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2017.

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.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype**. 2015. Disponível em: < <http://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>>. Acesso em: 22/05/2017.

MEUDT, T.; METTERNICH, J.; ABELE, E. Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**. v. 66, p. 413-416, 2017.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na Engenharia de Produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Revista Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

OECD (*The Organisation for Economic Co-operation and Development*). **Sustainable Manufacturing Toolkit**. Disponível em: < <https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/>>. Acesso em: 20/06/2017.

PAJU, M.; HEILALA, J.; HENTULA, M.; HEIKKILÄ, A.; JOHANSSON, B.; LEONG, S.; LYONS, K. Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology. In: **Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter**. IEEE, 2010. p. 3411-3422.

PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PWC. **Indústria 4.0: Digitalização como vantagem competitiva no Brasil**. 2016. Disponível em: < <https://www.pwc.com.br/pt/publicacoes/servicos/assets/consultoria-negocios/2016/pwc-industry-4-survey-16.pdf>>. Acesso em: 19/06/2017.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 173-178, 2016.

REXROTH BOSCH GROUP. **Active Cockpit**. Alemanha, 2017. Disponível em: <<https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/manual-production-systems/activecockpit/activecockpit>>. Acesso em: 17/11/2017.

ROSEN, M. A.; KISHAWY, H. A. Sustainable manufacturing and design: Concepts, practices and needs. **Sustainability**, v. 4, n. 2, p. 154-174, 2012.

SANDENGEN, O. C., ESTENSEN, L. A., RØDSETH, H., SCHJØLBERG, P. (2016). High Performance Manufacturing – An Innovative Contribution towards Industry 4.0. In: **International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation (Iwama)**, p.14–20, 2016.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161-166, 2016.

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

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.

SILVA, O. F. M. da. Aplicação de conceitos da manufatura sustentável: pesquisa-ação em uma empresa gráfica. **Dissertação de Mestrado**. UNESP, 2012.

SINGH, R. K.; MURTY, H. R.; GUPTA, S. K.; DIKSHIT, A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, v. 15, n. 1, p. 281-299, 2012.

SINGH, S.; OLUGU, E. U.; FALLAHPOUR, A. Fuzzy-based sustainable manufacturing assessment model for SMEs. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 5, p. 847-860, 2014.

SINGH, S.; OLUGU, E. U.; MUSA, S. N. Development of sustainable manufacturing performance evaluation expert system for small and medium enterprises. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 608-613, 2016.

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.

UBIMAX. Soluções em Realidade Aumentada. Alemanha, 2017. Disponível em: <<http://www.ubimax.com/en/portfolio/#frontline>>. Acesso em: 24/11/2017.

U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE. Sustainable Manufacturing Initiative. 2011. Disponível em: <https://www.oecd.org/sti/ind/45010349.pdf>. Acesso em: 17/02/2017.

VELEVA, V.; ELLENBECKER, M. Indicators of sustainable production: framework and methodology. **Journal of cleaner production**, v. 9, n. 6, p. 519-549, 2001.

WAAS, T.; HUGÉ, J.; BLOCK, T.; WRIGHT, T.; BENITEZ-CAPISTROS, F.; VERBRUGGEN, A. Sustainability assessment and indicators: Tools in a decision-making strategy for sustainable development. **Sustainability**, v. 6, n. 9, p. 5512-5534, 2014.

WAN, J.; CAI, H.; ZHOU, K. Industrie 4.0: enabling technologies. In: **Intelligent Computing and Internet of Things (ICIT), 2014 International Conference on**. IEEE, 2015. p. 135-140.

WANG, S.; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 2015.

WCED (*World Commission on Environment and Development*). **Our Common Future**. 1987.

WEF (*World Economic Forum*). **The Future of Jobs**. Suíça, 2016. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf>. Acesso em: 21/05/2017.

WINROTH, M.; ALMSTRÖM, P.; ANDERSSON, C. Sustainable production indicators at factory level. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 27, n. 6, p. 842-873, 2016.

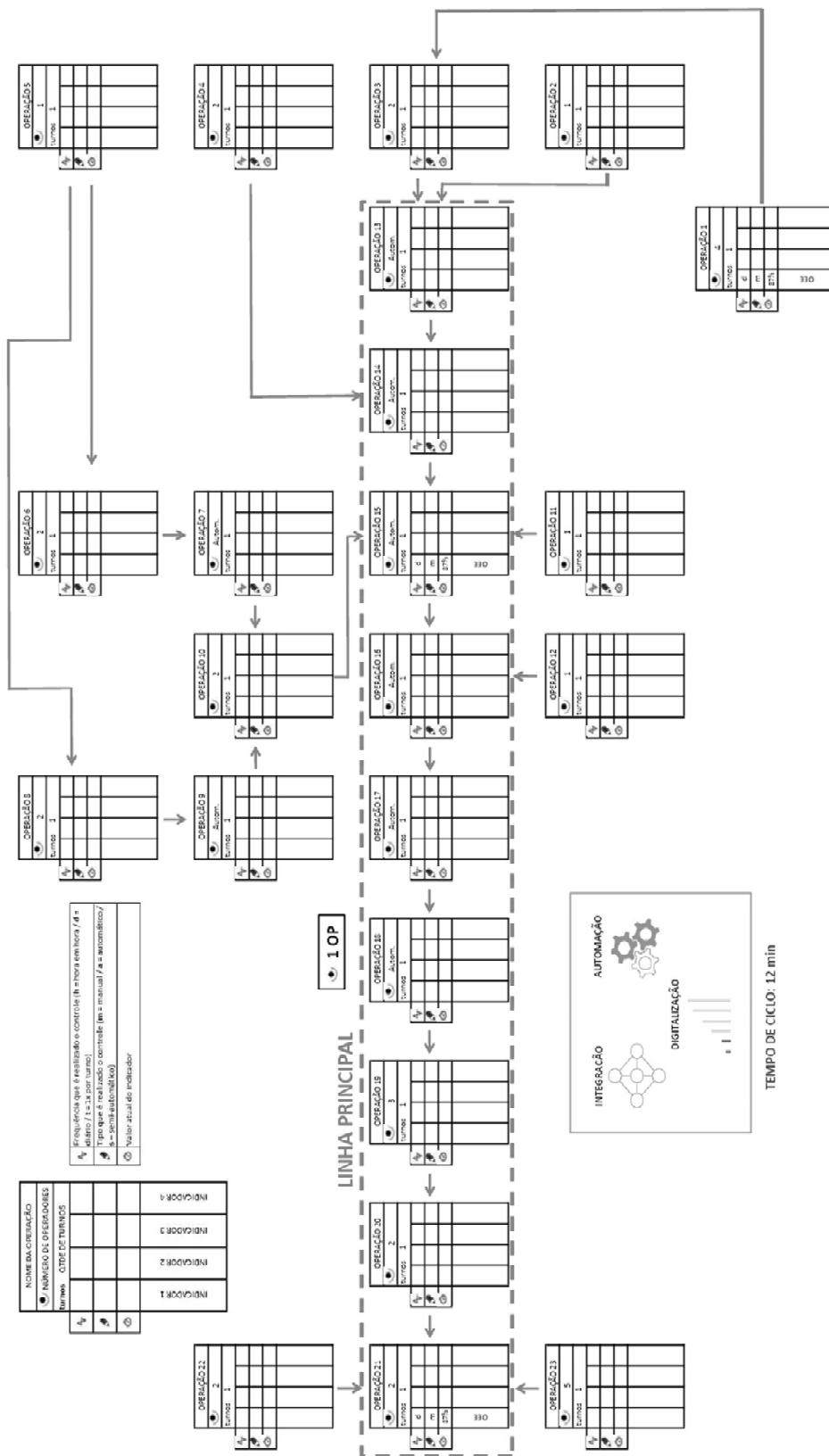
YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In: **Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 2147-2152.

ZUANAZZI, F. A.; HABAS, R. F.; BARICHELLO, R.; DEIMLING, M. F. Desenvolvimento de um modelo para avaliar a sustentabilidade nas micro e pequenas empresas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 163-180, 2016.

APÊNDICE 1

INÍCIO DO PROCESSO



ANEXO A

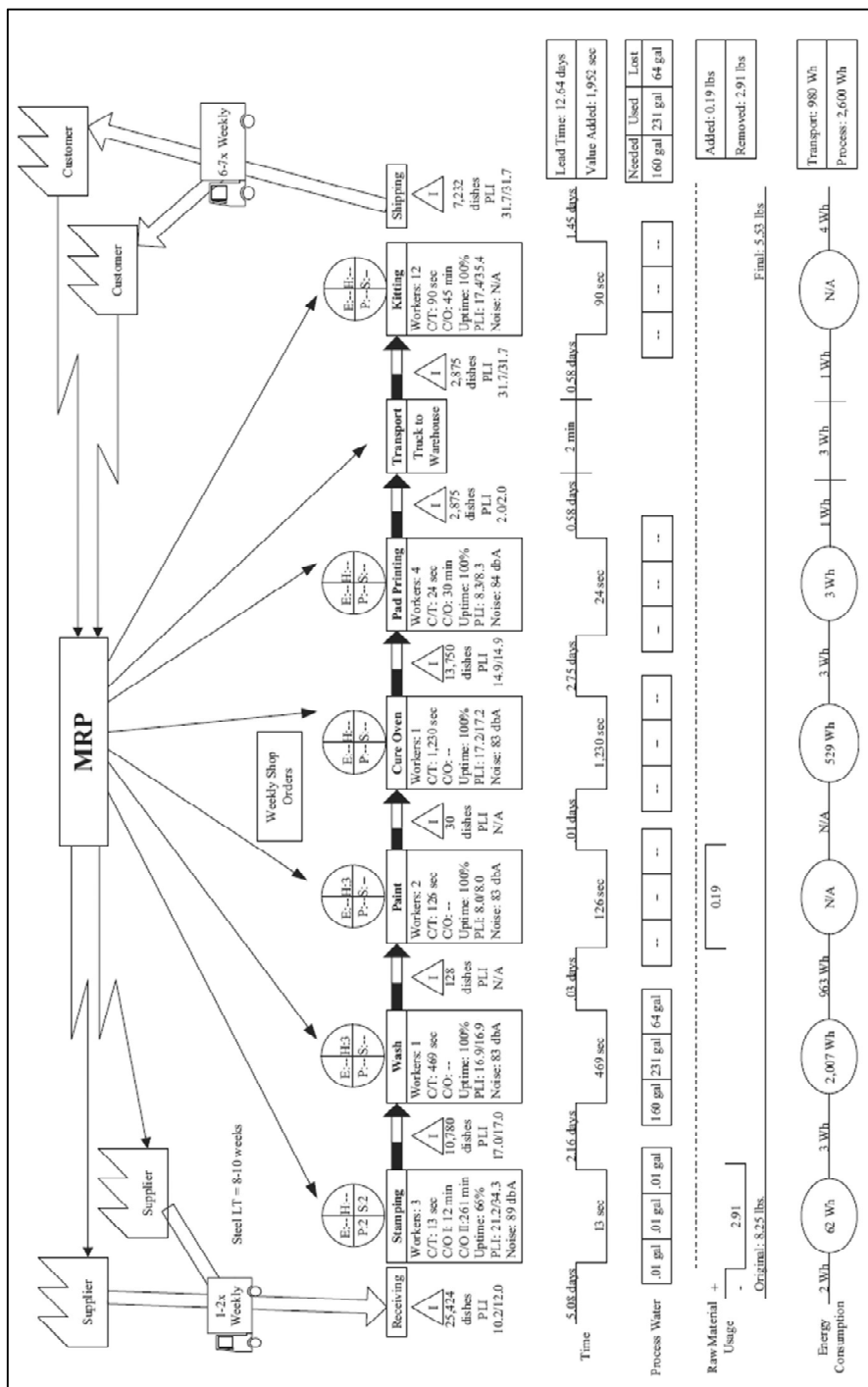
	TÍTULO	AUTORES	ANO
1	Assessing sustainability benefits of cybermanufacturing systems	Song, Z., Moon, Y.	2017
2	Factories of the future: challenges and leading innovations in intelligent manufacturing	Jardim-Goncalves, R., Romero, D., Grilo, A.	2017
3	Global Footprint Design based on genetic algorithms - An "Industry 4.0" perspective	Schuh, G., Potente, T., Varandani, R., Schmitz, T.	2017
4	Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues	Lu, Y.	2017
5	Industry 4.0: Strategy for more sustainable industrial development in smes	Bakkari, M., Khatory, A.	2017
6	On sustainable production networks for Industry 4.0	Prause, G., Atari, S.	2017
7	Smart Value Stream Mapping: An Integral Approach Towards a Smart Factory	Haschemi, M.; Roessler, M. P.	2017
8	On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review	Peralta Álvarez, M. E., Marcos Bárcena, M., Aguayo González, F.	2017
9	Operational Excellence towards Sustainable Development Goals through Industry 4.0	Quezada, L. E., Chiu, A. S. F., Gouvea da Costa, S. E., Tan, K. H.	2017
10	Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal	Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. F. R., Ramos, L. F. P.	2017
11	Society. Personality. Technologies: Social Paradoxes of Industry 4.0	Kamensky, E.	2017
12	Sustainability Aspects of a Digitalized Industry - A Comparative Study from China and Germany	Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T., Xue, B.	2017
13	Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production	Meudt, T.; Metternich, J.; Abele, E.	2017
14	Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles	Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., Iakovou, E.	2017
15	The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0	Preuveneers, D., Ilie-Zudor, E.	2017
16	Toward industry 4.0: Efficient and sustainable manufacturing leveraging MAESTRI total efficiency framework	Ferrera, E., Rossini, R., Baptista, A. J., Evans, S., Hovest, G. G., Holgado, M., Estrela, M. A.	2017
17	"Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and application examples	Thoben, K. D., Wiesner, S. A., Wuest, T.	2017
18	A Complex View of Industry 4.0	Roblek, V., Mesko, M., Krapez, A.	2016

19	A Perspective on Industry 4.0: From Challenges to Opportunities in Production Systems	Khan, A., Turowski, K.	2016
20	A review of sustainable machining engineering: optimization process through triple bottom line	Alvarez, M. E. P., Barcena, M. M., Gonzalez, F. A.	2016
21	Challenges and trends in manufacturing measurement technology - the "Industrie 4.0" concept	Imkamp, D., Berthold, J., Heizmann, M., Kniel, K., Manske, E., Peterek, M., Sommer, K. D.	2016
22	Design principles for industrie 4.0 scenarios	Hermann, M., Pentek, T., Otto, B.	2016
23	Industrie 4.0 Implementations in the Automotive Industry	Segura-Velandia, D., Neal, A., Goodall, P., Conway, P., West, A.	2016
24	Industry 4.0 Development and Application of Intelligent Manufacturing	Cheng, G. J., Liu, L. T., Qiang, X. J., Liu, Y.	2016
25	Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing	Sanders, A., Elangeswaran, C., Wulfsberg, J.	2016
26	Lean Intelligent Production System and Value Stream Practice	Wang, B., Zhao, J. Y., Wan, Z. G., Ma, J. H., Li, H., Ma, J.	2016
27	New Paradigm of Industrial Development of Germany - Strategy "Industry 4.0"	Belov, V. B.	2016
28	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0	Stock, T., Seliger, G.	2016
29	Socio-economic aspects of Industry 4.0	Vacek, J.	2016
30	Statistical KPIs in HMI panels	Ragunathan, K., Ravindranathan, S., Ssm, N.	2016
31	Supply chain wide transformation of traditional industry to industry 4.0	Reddy, G. R. K., Singh, H., Hariharan, S.	2016
32	Sustainability in information and communication technologies' industry: Innovative ambidexterity and dynamic capabilities perspectives	Čirjevskis, A.	2016
33	The role of manufacturing in affecting the social dimension of sustainability	Sutherland, J. W., Richter, J. S., Hutchins, M. J., Dornfeld, D., Dzombak, R., Mangold, J., Friemann, F.	2016
34	Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0	Tamas, P., Illes, B., Dobos, P.	2016
35	Advanced manufacturing technology and new industrial revolution	Zhou, J., Yao, X.	2015
36	Digital manufacturing in smart manufacturing systems: Contribution, barriers, and future directions	Choi, S. S., Jun, C., Zhao, W. B., Noh, S. D.	2015
37	Industrie 4.0-technological approaches, use cases, and implementation	Anderl, R.	2015

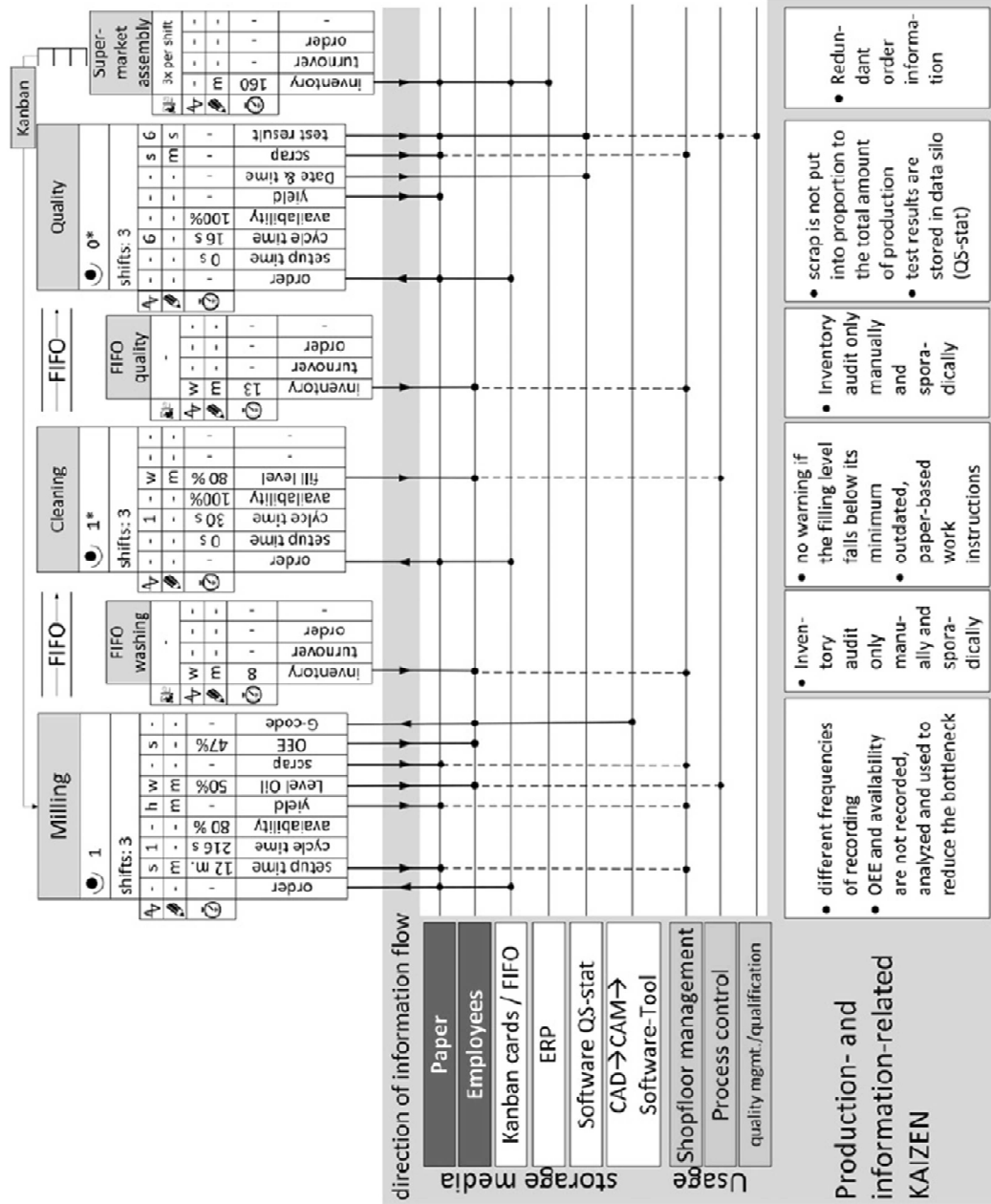
38	Industrie 4.0: Enabling technologies	Wan, J., Cai, H., Zhou, K.	2015
39	Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges	Zhou, K. L., Liu, T. G., Zhou, L. F.	2015
40	Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies	Kolberg, D., Zuhlke, D.	2015
41	Sustainability in manufacturing through distributed manufacturing systems (DMS)	Rauch, E., Dallinger, M., Dallasega, P., Matt, D. T.	2015
42	Sustainable business models and structures for industry 4.0	Prause, G.	2015
43	The Analysis of Industry 4.0 and Lean Production	Huang, H., Li, W. X.	2015
44	The crippled bottom line - measuring and managing sustainability	Isaksson, R. B., Garvare, R., Johnson, M.	2015
45	Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era	Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., Zuhlke, D.	2014
46	Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance	Faulkner, W.; Badurdeen, F.	2014
47	Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm	Shrouf, F., Ordieres, J., Miragliotta, G.	2014
48	A new approach to increasing energy efficiency by utilizing cyber-physical energy systems	Bornschlegl, M., Drechsel, M., Kreitlein, S., Bregulla, M., Franke, J.	2013
49	Industry 4.0-Fields of Action of the Digital Factory to Optimize Resource Efficiency in Production Processes	Kruckhans, B., Meier, H.	2013
50	Industry 4.0: A Best Practice Project of the Automotive Industry	Gruber, F. E.	2013
51	Industry 4.0: The Growing Together of real and virtual Worlds The Internet of Things drives the fourth industrial Revolution	Jopp, K.	2013
52	A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations	Pearson, P. J. G., Foxon, T. J.	2012
53	Key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in automotive companies	Amrina, E., Yusof, S. M.	2011
54	Sustainability science: A review, an analysis and some empirical lessons	Spangenberg, J. H.	2011
55	Sustainability transitions and the nature of technology	Paredis, E.	2011

ANEXO B

Modelo de Mapeamento do Fluxo de Valor Sustentável (*Sus-VSM*) proposto por Faulkner & Badurdeen (2014)



Modelo de Value Stream Mapping 4.0 proposto por Meudt et al. (2017)



Modelo de *Smart Value Stream Mapping (SVSM)* proposto por Haschemi & Roessler (2017)

