UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Ciências Aplicadas

DANILO ALBERTINI DA SILVA

ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA INDUSTRIA 4.0 PARA A SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO NO SEGMENTO ORTOPÉDICO

ANALYSIS OF INDUSTRY 4.0 CONTRIBUTION TO SUSTAINABILITY: A CASE STUDY IN THE ORTHOPEDIC SEGMENT

LIMEIRA

2020

DANILO ALBERTINI DA SILVA

ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DA INDUSTRIA 4.0 PARA A SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO NO SEGMENTO ORTOPEDICO

Dissertação apresentada a Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Manufatura, na Área de Pesquisa Operacional e Gestão de Processos.

ORIENTADORA:
PROFª DRª MURIEL DE OLIVEIRA GAVIRA

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO DANILO ALBERTINI DA SILVA E ORIENTADO PELA PROF.ª DRª MURIEL DE OLIVEIRA GAVIRA.

LIMEIRA
2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Renata Eleuterio da Silva - CRB 8/9281

Si38a

Silva, Danilo Albertini da, 1991-
Análise da contribuição da indústria 4.0 para a sustentabilidade : um estudo de caso no segmento ortopédico / Danilo Albertini da Silva. – Limeira, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Muriel de Oliveira Gavira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Sustentabilidade. 2. Indústria 4.0. 3. Manufatura. 4. Administração da produção. 5. Implantes ortopédicos. I. Gavira, Muriel de Oliveira, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Analysis of industry 4.0 contribution to sustainability : a case study in the orthopedic segment
Palavras-chave em inglês:
Sustainability
Industry 4.0
Manufacturing
Production management
Orthopedic implants
Área de concentração: Pesquisa Operacional e Gestão de Processos
Titulação: Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura
Banca examinadora:
Muriel de Oliveira Gavira [Orientador]
Ieda Kanashiro Makiya
Robert Eduardo Cooper Ordoñez
Data de defesa: 22-07-2020
Programa de Pós-Graduação: Engenharia de Produção e de Manufatura

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)
- ORCID do autor: https://orcid.org/0000-0003-0888-5539
- Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/8555836788848111

Folha de Aprovação

Autor(a): Danilo Albertini da Silva
Título: Análise da contribuição da indústria 4.0 para a sustentabilidade: um estudo de caso no segmento ortopédico
Natureza: Dissertação
Área de Concentração: Pesquisa Operacional e Gestão de Processos
Instituição: Faculdade de Ciências Aplicadas – FCA/Unicamp
Data da Defesa: Limeira-SP, 22 de julho de 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Muriel de Oliveira Gavira (orientadora)
Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA/Unicamp

Profa. Dra. Ieda Kanashiro Makiya (membro)
Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA/Unicamp

Prof. Dr. Robert Eduardo Cooper Ordoñez (membro externo)
Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM/Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DEDICATÓRIA

"Dedico este trabalho

... ao Deus que concede liberalmente sabedoria aos homens e profere de sua boca a inteligência e o discernimento. Ao Rei Eterno sejam Honra e Glória pelos séculos dos séculos. Amém.

... aos meus pais, que sempre me apoiaram incondicionalmente e me ensinaram o valor do esforço, do trabalho e da família.

... a minha esposa e meu filho, que personificam o significado do amor todos os dias."

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente ao Deus que, mesmo sendo autor de toda a vastidão do universo, escolheu se importar com o sonho de pequenos seres como eu.

Agradeço a minha orientadora Muriel, cuja paciência, dedicação e visão integral foram os pilares que sustentaram a construção desse projeto. Obrigado pelas incontáveis horas e imensurável esforço aplicados na mediação do conhecimento e na transformação de algumas ideias abstratas em um trabalho concreto. Que nunca falte ao mundo grandes mestres como você.

Agradeço aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia de Produção e Manufatura da FCA e, em especial, aos professores Giocondo, Ieda, Robert e Aroldo pelas contribuições fundamentais para a condução e conclusão da pesquisa.

Agradeço a minha esposa Denize por estar comigo desde sempre e por ser minha melhor aliada em todas as batalhas em entramos.

Agradeço ao meu filho Enzo por ser compreensivo e companheiro se abstendo de inúmeros partidas de futebol e videogame para me fazer companhia em dias de estudo.

Agradeço também aos meus pais pelo exemplo de trabalho e esforço e pelos ensinamentos que me trouxeram até aqui.

E, não menos importante, agradeço a minha gerente e mentora profissional Marrie Freitas pela confiança e pelas lições diárias de garra, foco e persistência que me ajudaram a entender que a vontade de vencer pode ser maior do que qualquer obstáculo.

RESUMO

Um dos maiores desafios do cenário atual é encontrar o equilíbrio entre o atendimento das demandas do mercado e a garantia da sustentabilidade ambiental, social e econômica principalmente com relação à bens e serviços fundamentais para a manutenção e melhoria da qualidade de vida, como os implantes ortopédicos. Paralelamente, a forma que a indústria transforma as demandas do mercado em bens e serviços também mudou. Hoje, a manufatura avançada caracterizada por um ambiente saturado por informação computacional, altamente conectado à Internet e repleto de novas tecnologias fazem parte do que seria uma nova revolução industrial: a Indústria 4.0 (I4.0). As inovações da I4.0 podem apresentar-se como importantes oportunidades de contribuição à sustentabilidade necessária para que as demandas do mercado sejam atendidas nessa e nas próximas gerações. O objetivo desse trabalho é, então, criar um modelo de análise para avaliar a contribuição da I4.0 para uma produção mais sustentável ao longo de ciclo de vida do produto. Para tanto, esse estudo buscou consolidar os conceitos dos temas sustentabilidade e indústria 4.0 aplicados a gestão da produção, identificando, através de uma revisão sistemática de literatura, possibilidades de correlações já existentes. A partir dessas informações e das lacunas encontradas, foi proposto um *framework* de integração e avaliação do ciclo de vida nas dimensões ambiental, econômica e social. O *framework* foi aplicado por meio de um estudo de caso conduzido em uma empresa do segmento de fabricação de implantes ortopédicos e comparou a cadeia de produção tradicional de um implante com a simulação de uma rota utilizando as tecnologias da I4.0, como a manufatura aditiva. A análise dos indicadores mapeados mostrou ganhos significativos como a redução de consumo de matéria prima em 14%, de energia elétrica e de emissões de CO2 em 28%, mas evidenciou o custo elevado dos equipamentos e insumos, e o risco de redução de postos de trabalho. Os impactos identificados foram relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e por fim, foram sugeridas aplicações adicionais e apontados direcionamentos para novos estudos na área.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Indústria 4.0; Manufatura; Administração da Produção; Implantes Ortopédicos.

ABSTRACT

One of the biggest challenges in the current scenario is to find the balance between meeting market demands and ensuring environmental, social and economic sustainability, especially regarding fundamental goods and services for maintaining and improving quality of life, such as orthopedic implants. At the same time, the way the industry transforms market demands into goods and services has also changed. Today, the advanced manufacturing characterized by an environment saturated with computational information, highly connected to the Internet and full of new technologies is part of a new industrial revolution: the Industry 4.0 (I4.0). The innovations of I4.0 can present themselves as important opportunities to contribute to the sustainability needed to meet the next generation demands. Therefore, the objective of this work is to create an analysis model to assess the contribution of I4.0 to a more sustainable production throughout the product life cycle. Working toward this direction, this study sought to consolidate the concepts of sustainability and industry 4.0 applied to production management, identifying, through a systematic literature review, possibilities of existing correlations. Based on these research findings, a framework for integrating and assessing the life cycle in the environmental, economic and social dimensions was proposed. The framework was applied through a case study conducted in a company in the orthopedic implant manufacturing segment, comparing the traditional production chain against the simulation of a route using I4.0 technologies, such as additive manufacturing. The analysis of the mapped indicators showed significant gains such as the reduction of consumption of raw materials by 14%, and electricity consumption and CO_2 emissions by 28%, but evidenced the high cost of equipment and supplies, and the risk of reducing jobs. The identified impacts were related to the Sustainable Development Goals and, finally, additional applications were suggested and directions for new studies in the area were pointed out.

Keywords: Sustainability; Industry 4.0; Manufacturing; Production Management; Orthopedic Implants;

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ASCV - Avaliação Social do Ciclo de Vida

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CCV - Custeio do Ciclo de Vida

CO2 - Dióxido de Carbono

GrSCM - *Green Supply Chain Management*

I4.0 – Indústria 4.0

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO – *International Organization for Standardization*

LCA – *Life Cycle Assessment*

LCC – *Life Cycle Cost*

MOD - Mão de Obra Direta

MP - Matéria Prima

NR – Norma regulamentadora

ODM – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

ONU - Organização das Nações Unidas

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

P&D – Projeto e Desenvolvimento

PED - Países em Desenvolvimento

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

RDC – Resolução da Diretoria Colegiada

RI – Revolução Industrial

RSL – Revisão Sistemática de Literatura

SBOT - Sociedade Brasileira de Ortopedia e Traumatologia

SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

S-LCA – *Social Life Cycle Assessment*

TBL – *Triple Bottom Line*

TI – Tecnologia de Informação

UHMWPE – *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*

WCED - *World Commission on Environment and Development*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROJEÇÃO DE PIRÂMIDE ETÁRIA BRASILEIRA. 21
FIGURA 2 - OCORRÊNCIA DE DOENÇAS POR FAIXA DE IDADE. 22
FIGURA 3 - ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO. 25
FIGURA 4 - DIAGRAMA ELABORAÇÃO DO TRABALHO. 29
FIGURA 5 - CRITÉRIOS DE BUSCA DA RSL. 31
FIGURA 6 - LEVANTAMENTO DO MATERIAL PARA RSL. 32
FIGURA 7 - *TRIPPLE BOTTOM LINE.* 37
FIGURA 8 - FATORES DE IMPACTO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL. 38
FIGURA 9 - LINHA DO TEMPO DOS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. 41
FIGURA 10 - OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO DO MILÊNIO 42
FIGURA 11 - EVOLUÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE PROCESSO 46
FIGURA 12 - INTEGRAÇÃO ENTRE *LEAN* E *GREEN MANUFACTURING* 48
FIGURA 13 - DESDOBRAMENTO DA *GREEN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT.* 48
FIGURA 14 – ACV ESTRUTURA GERAL 51
FIGURA 15 - INTEGRAÇÃO DAS ANÁLISES DE ACV ÀS DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE. 52
FIGURA 16 - REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS. 54
FIGURA 17 - ARTIGOS PUBLICADOS POR ANO QUE CONTÊM OS TEMAS DE I.4.0 E SUSTENTABILIDADE. 66
FIGURA 18 - AUTORES COM MAIS PUBLICAÇÕES SOBRE I4.0 E SUSTENTABILIDADE ENTRE 2014 E 2019. 66
FIGURA 19 - COAUTORIA DOS ARTIGOS DA RLS. 67
FIGURA 20 - PUBLICAÇÕES POR REVISTA CONTENDO AS PALAVRAS CHAVE I4.0 E SUSTENTABILIDADE. 68
FIGURA 21 - PALAVRAS-CHAVE MAIS UTILIZADAS NOS ARTIGOS DA RLS. 69
FIGURA 22 – INTERLIGAÇÃO ENTRE AS PALAVRAS-CHAVE MAIS UTILIZADAS. 70
FIGURA 23 - CORRELAÇÃO ENTRE I4.0 E DEMAIS PALAVRAS-CHAVE. 71
FIGURA 24 - CORRELAÇÃO ENTRE *SUSTAINABILITY* E DEMAIS PALAVRAS-CHAVE. 71
FIGURA 25 - CONTRIBUIÇÕES POR PAÍS CONSIDERANDO O PRINCIPAL AUTOR DE CADA ARTIGO. 72
FIGURA 26 - CONTRIBUIÇÕES POR PAÍS DE TODOS OS AUTORES. 73
FIGURA 27 - MAPA DE CONTRIBUIÇÕES POR PAÍS. 73

FIGURA 28 - ABORDAGEM DOS ARTIGOS. 75
FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO POR TÉCNICA DE PESQUISA. 75
FIGURA 30 - *FRAMEWORK* PARA IMPLANTAÇÃO DE *SMART FACTORIES.* 83
FIGURA 31 - *FRAMEWORK* CORRELACIONANDO I4.0 E SUSTENTABILIDADE 84
FIGURA 32 - FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA INTEGRAÇÃO DA I4.0 À SUSTENTABILIDADE. 85
FIGURA 33 - *FRAMEWORK* DE APLICAÇÃO DOS RECURSOS DA I4.0 NO PROCESSO. 86
FIGURA 34 - *FRAMEWORK* DE AFERIÇÃO DA SUSTENTABILIDADE 87
FIGURA 35 - *FRAMEWORK* DE INTEGRAÇÃO DA I4.0 À SUSTENTABILIDADE COM ABORDAGEM NO PROCESSO. 87
FIGURA 36 - *FRAMEWORK* DE INTEGRAÇÃO ENTRE I4.0 E SUSTENTABILIDADE APLICADO A CADEIA DE SUPRIMENTOS. 88
FIGURA 37 - *FRAMEWORK* DE INTEGRAÇÃO I4.0 E SUSTENTABILIDADE APLICADO À CADEIA DE SUPRIMENTOS. 89
FIGURA 38 – PERSPECTIVA MACRO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM I4.0 E CICLO DE VIDA DE PRODUTO. 89
FIGURA 39 - *FRAMEWORK* DE INTEGRAÇÃO I4.0 E SUSTENTABILIDADE UTILIZANDO O CONCEITO DE CADEIA DE VALOR. 90
FIGURA 40 - RISCOS ASSOCIADOS A IMPLANTAÇÃO E UTILIZAÇÃO DA I4.0. 93
FIGURA 41 - ETAPAS DO FRAMEWORK PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE. 95
FIGURA 42 – PROJEÇÃO DO *FRAMEWORK* INTEGRANDO I4.0 E SUSTENTABILIDADE NO NÍVEL DE EMPRESA 97
FIGURA 43 – PROJEÇÃO DO *FRAMEWORK* INTEGRANDO I4.0 E SUSTENTABILIDADE NO NÍVEL DE CADEIA 98
FIGURA 44 - FLUXOGRAMA COM PASSOS DO ESTUDO DE CASO. 99
FIGURA 45 - PRÓTESES PARA REPOSIÇÃO DE ARTICULAÇÃO DO JOELHO 101
FIGURA 46 - MAPEAMENTO DO PROCESSO DE MICRO FUNDIÇÃO 103
FIGURA 47 - PROCESSOS MAPEADOS NO FABRICANTE 104
FIGURA 48 - MAPEAMENTO DA CADEIA DA INDÚSTRIA DE PRÓTESES COM DESTAQUE NAS FRONTEIRAS DO SISTEMA ANALISADO. 105
FIGURA 49 – RECORTE DO FORMULÁRIO PARA MAPEAMENTO DOS PROCESSOS. 109
FIGURA 50 - RISCOS OCUPACIONAIS 119

FIGURA 51 - FLUXO DE PROCESSOS PROPOSTO NO FORNECEDOR *TIER 1* PARA A PRODUÇÃO DO COMPONENTE TIBIAL. 122
FIGURA 52 - PROPOSTA DE CADEIA PARA FABRICAÇÃO DO COMPONENTE TIBIAL UTILIZANDO I4.0 122
FIGURA 53 - MÁQUINA EOS M 290 123
FIGURA 54 - MONTAGEM DAS BASES NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO. 124
FIGURA 55 - CONSUMO DE ENERGIA POR PROCESSO EM KW POR UNIDADE FUNCIONAL 131
FIGURA 56 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS E CONSUMO DE MP POR UNIDADE FUNCIONAL 132
FIGURA 57 - APROVEITAMENTO DE MATÉRIA PRIMA NO PROCESSO. 132
FIGURA 58 - GRÁFICO DE KG CO_2E EMITIDO POR UNIDADE 133
FIGURA 59 - RISCOS OCUPACIONAIS E AMBIENTAIS DA CADEIA TRADICIONAL. 135
FIGURA 60 - RISCOS OCUPACIONAIS E AMBIENTAIS DA CADEIA I4.0. 135
FIGURA 61 - GRÁFICO COMPARATIVO DA EXPOSIÇÃO A RISCO OCUPACIONAIS E AMBIENTAIS DAS DUAS CADEIAS. 136
FIGURA 62 - CUSTO DOS LOTES DE FABRICAÇÃO DE COMPONENTES TIBIAIS NAS DUAS CADEIAS EM REAIS/1000. 139
FIGURA 63 - ODS POSITIVAMENTE IMPACTADOS PELA CADEIA I4.0. 140
FIGURA 64 - ACABAMENTO SUPERFICIAL TRABECULADO. 144
FIGURA 65 - OPÇÕES DE APLICAÇÃO DE ACABAMENTO TRABECULADO AO IMPLANTE. 145

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARTICIPAÇÃO DOS SEGMENTOS DA ECONOMIA DO PIB MUNDIAL 20
TABELA 2 - TEMPO ESTIMADO DE DURAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS CONSIDERANDO TAXA DE CONSUMO PREVISTA PARA 2030. 23
TABELA 3 - EXPANSÃO DO ACESSO À INTERNET NO MUNDO. 55
TABELA 4 - PRODUTOS E ORIGENS 100
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO DA LIGA ASTM F75 102
TABELA 6 - MAPEAMENTO DE EQUIPAMENTOS DO PROCESSO TRADICIONAL 110
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA PRIMA UTILIZADA NO PROCESSO 113
TABELA 8 - APROVEITAMENTO DO PROCESSO DE MICRO FUNDIÇÃO 113
TABELA 9 - INSUMOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE MICRO FUNDIÇÃO 114
TABELA 10 - FATOR DE EMISSÃO MÉDIO (KGCO_2/KWH) - MENSAL 115
TABELA 11 - MAPEAMENTO DE MÃO DE OBRA DIRETA DA CADEIA TRADICIONAL 118
TABELA 12 - MAPEAMENTO DOS RISCOS OCUPACIONAIS DA CADEIA TRADICIONAL 120
TABELA 13 - MAPEAMENTO DE EQUIPAMENTOS DO PROCESSO I4.0 125
TABELA 14 - MAPEAMENTO DE MOD DA PROPOSTA I4.0 128
TABELA 15 - MAPEAMENTO DE RISCOS OCUPACIONAIS DA PROPOSTA I4.0 128
TABELA 16 - TABELA COMPARATIVA DOS INDICADORES 129
TABELA 17 - CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES POR UNIDADE FUNCIONAL 130
TABELA 18 – ÍNDICES DE RISCO DAS DUAS PROPOSTAS DE CADEIA. 136
TABELA 19 - COMPOSIÇÃO DE CUSTO FINAL DA PEÇA 138
TABELA 20 - IMPACTO AOS ODS POR INDICADOR 140

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - SEIS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 42
QUADRO 2 - DEZESSETE OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 43
QUADRO 3 - VISÕES SOBRE A MANUFATURA 46
QUADRO 4 - PRINCÍPIOS DA I4.0 57
QUADRO 5 - TECNOLOGIAS DA I4.0 58
QUADRO 6 - PRINCIPAIS DESAFIOS PARA IMPLANTAÇÃO DA I4.0 EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO. 60
QUADRO 7 - MARCOS NA HISTÓRICO DOS IMPLANTES ORTOPÉDICOS 62
QUADRO 8 - PRINCIPAIS BIOMATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES 63
QUADRO 9 - ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO DOS ARTIGOS DA RSL. 74
QUADRO 10 - SEGMENTOS DE APLICAÇÃO DOS ARTIGOS DA RSL 76
QUADRO 11 - CONTRIBUIÇÕES DOS ARTIGOS DA RSL 78
QUADRO 12 - RELAÇÃO DE ODS COM I4.0 81
QUADRO 13 - CONTRIBUIÇÕES DE CADA PRINCÍPIO DA I4.0 À SUSTENTABILIDADE. 82
QUADRO 14 - RESUMO DOS FRAMEWORKS DA RSL. 91
QUADRO 15 - OPORTUNIDADES DE CONTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0. 94
QUADRO 16 - INDICADORES DA ACV 108
QUADRO 17 - ARTIGOS DA RSL 161

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA 19
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 23
2. METODOLOGIA 25
2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA 28
2.1.1 ELABORAÇÃO DA PERGUNTA DA RSL 29
2.1.2 DEFINIÇÃO DA BASE DE DADOS E IDENTIFICAÇÃO DE DOCUMENTOS RELEVANTES 30
CAPÍTULO 1 - SUSTENTABILIDADE 33
1.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA 34
1.2 TRIPLE BOTTOM LINE 36
1.2.1 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL (PLANETA) 38
1.2.2 SUSTENTABILIDADE SOCIAL (PESSOAS) 39
1.2.3 SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA (LUCRO) 40
1.3 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 40
1.4 ÂMBITOS DA SUSTENTABILIDADE 44
1.4.1 SUSTENTABILIDADE DE PRODUTO 45
1.4.2 SUSTENTABILIDADE DE PROCESSO 45
1.4.3 SUSTENTABILIDADE DA CADEIA 47
1.5 PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL 49
1.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) 50
CAPÍTULO 2 – INDÚSTRIA 4.0 54
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA 56
2.2 PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS DA I4.0 57
2.4 PRÉ-REQUISITOS E DESAFIOS PARA IMPLANTAÇÃO DA I4.0 59
CAPÍTULO 3 - INDÚSTRIA DE IMPLANTES ORTOPÉDICOS 61
3.1 MARCOS HISTÓRICOS DA INDÚSTRIA ORTOPÉDICA 61
3.2 BIOMATERIAIS 62
3.3 REGULAÇÕES 64
CAPÍTULO 4 - INDÚSTRIA 4.0 E SUSTENTABILIDADE 65
4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DOS RESULTADOS 65
4.2 RESUMO DAS CONTRIBUIÇÕES POR ARTIGO 77
4.3 ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DOS PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS À SUSTENTABILIDADE 81
4.4 FRAMEWORKS DE INTEGRAÇÃO 82
4.5 ANÁLISE DOS RISCOS E OPORTUNIDADES DA IMPLANTAÇÃO 93
CAPÍTULO 5 – PROPOSTA DE FRAMEWORK 95

CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CASO 99
6.1 MAPEAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS ATUAL 100
6.1.1 SELEÇÃO DO IMPLANTE 100
6.1.2 MAPEAMENTO DE PROCESSOS DO FORNECEDOR 102
6.1.3 MAPEAMENTO DE PROCESSOS DA EMPRESA FABRICANTE 103
6.1.4 DELIMITAÇÃO DE FRONTEIRAS 104
6.2 APLICAÇÃO DO MODELO E ACV DA CADEIA ATUAL 106
6.2.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO 106
6.2.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO 108
6.3 IDENTIFICAÇÃO DA APLICAÇÃO DA I4.0 NA CADEIA PRODUTIVA 121
6.4 AFERIÇÃO DO ACV DA CADEIA PROPOSTA 123
6.4.1 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DA CADEIA COM USO DA I4.0 124
6.5 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 129
6.5.1 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS E INTERPRETAÇÃO 129
6.5.2 ANÁLISE DE LOTE MÍNIMO E CUSTO UNITÁRIO DA PEÇA 137
6.5.3 IMPACTOS DAS CADEIAS NOS ODS 139
CAPÍTULO 7 – DISCUSSÃO 141
7.1 ANÁLISE DO NÍVEL DE MATURIDADE DA CADEIA 143
7.2 APLICAÇÕES ADICIONAIS DA I4.0 PARA A SUSTENTABILIDADE DA EMPRESA 144
CONCLUSÃO 146
LIMITES DO TRABALHO 148
TRABALHOS FUTUROS 149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 150
APÊNDICE A – LISTA DE ARTIGOS DA RSL 161

1. Introdução

O cenário contemporâneo é repleto de desafios para todas as empresas e entre os principais está a missão de encontrar o equilíbrio entre o atendimento das demandas do mercado e a garantia da manutenção da sustentabilidade.

A concorrência acirrada, o elevado nível de exigência dos clientes por produtos e serviços de qualidade, a disputa pelos baixos custos e a corrida de inovações são características presentes no mercado de um mundo altamente globalizado e com poucas barreiras para a livre concorrência nos mais diversos segmentos (RODRIGUES; JESUS; SCHÜTZER, 2016). Junto à redução das distâncias proporcionada pela globalização, há uma tendência crescente da necessidade de inovação, individualização e personalização de produtos, uma vez que com mais informação e mais opções de oferta, os consumidores passam a ser mais seletivos, demandando então eficiência nos processos de concepção e fabricação por parte das empresas (BRETTEL *et al.*, 2014).

Se por um lado a agilidade de atendimento das demandas de personalização e inovação revela o aumento da capacidade da indústria, por outro, alimenta a preocupação com a abreviação do ciclo de vida dos produtos e com a utilização dos recursos necessários para a manutenção dos padrões de consumo atuais (SANTOS *et al.*, 2017). Tem-se, então, um aumento da relevância da pauta da sustentabilidade, contemplando o aspecto social, ambiental e econômico tanto dos produtos quanto dos processos de obtenção (PRAUSE, 2015), constituindo importante motivação para que a Organização das Nações Unidas (ONU) elaborasse a Agenda 2030 e os respectivos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) traçados para a garantia da sustentabilidade para as próximas gerações (ONU, 2015).

Entende-se o conceito de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável como a capacidade de manter ou sustentar um sistema ou processo por um determinado tempo (GALLOPÍN, 2003) e a habilidade de atender as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de satisfazer as delas (WCED, 1987), respectivamente.

Paralelamente, a forma que a indústria transforma as demandas do mercado em bens e serviços também mudou no decorrer da história, e hoje a manufatura avançada é caracterizada por um ambiente saturado por informação computacional, altamente conectado à Internet e

repleto de novas tecnologias desenham os contornos de uma nova revolução Industrial (WANG *et al*, 2009): a Indústria 4.0 (I4.0).

Enunciada pela primeira vez em Hannover, Alemanha, em 2011, a I4.0 em poucos anos têm trazido importantes transformações não apenas nas fábricas, mas também no perfil dos mercados (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018). Esses últimos têm apresentado como característica a demanda de produtos cada vez mais complexos, com grau elevado de personalização e com ciclo de vida progressivamente mais curto (PRAUSE, 2015).

Para atender à essas novas demandas é necessária uma pronta resposta da gestão da produção. Segundo O'Brien (1999), a gestão da produção vai além dos processos de manufatura e compreende o projeto, fabricação, distribuição e gestão pós consumo. Assim como as grandes alterações que definiram as revoluções industriais do passado, a I4.0 também abrange toda a cadeia de fornecimento e seus impactos se estendem por todo o ciclo de vida do produto e em todas as etapas da gestão da produção.

Tendo em vista o alcance da nova Revolução Industrial (RI), as inovações da I4.0, divididas em princípios e tecnologias (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018), tem então a possibilidade de apresentar-se como uma importante oportunidade de contribuição à sustentabilidade para que as demandas sociais e do mercado sejam atendidas nessa e nas próximas gerações. Nesse ponto, destacam-se como demandas mais importantes àquelas necessárias para a manutenção e melhoria da qualidade de vida, como os produtos médicos e, em especial, os implantes ortopédicos, como apresentado no tópico Justificativa e Relevância da Pesquisa.

Logo, considerando o cenário atual marcado pelos fatores disruptivos I4.0 e a necessidade de que as empresas, produtos, processos e cadeias produtivas sejam cada vez mais sustentáveis ao longo de seu ciclo de vida (PRAUSE, 2015), tem-se a seguinte questão de pesquisa:

A Indústria 4.0 pode contribuir para uma produção mais sustentável?

Para responder a essa pergunta, foi escolhido o caso de uma empresa do segmento ortopédico, melhor detalhado no Capítulo 6, e foram definidos os objetivos que guiaram o estudo.

Dada a pergunta e o segmento de aplicação, o objetivo principal do trabalho consiste em criar um modelo de análise para avaliar a contribuição da I4.0 para uma produção mais

sustentável ao longo de ciclo de vida aplicado ao segmento ortopédico. Para tanto, definiram-se como objetivos secundários:

- Consolidar o conhecimento mais relevante sobre os temas sustentabilidade e I4.0 encontrados nas literaturas utilizadas na presente pesquisa e realizar uma análise bibliométrica da literatura existente sobre os temas;
- Propor um modelo teórico (*framework*) que possa avaliar o impacto dos princípios e tecnologias da I4.0 na sustentabilidade em cada etapa da produção e ao longo da cadeia de suprimentos;
- Aplicar o modelo proposto em uma empresa de fabricação de implantes e instrumentais ortopédicos para comparar os impactos na sustentabilidade econômica, social e ambiental de uma cadeia de produção tradicional com uma cadeia que utiliza princípios e tecnologias da I4.0.
- Identificar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que podem ser impactados a partir da análise dos resultados encontrados na aplicação do modelo;

Assim, buscou-se, primeiramente entender os conceitos de cada tema e, posteriormente, identificar as possibilidades de correlações já mapeadas na literatura. Após a análise das possíveis lacunas existentes, o trabalho se propôs a elaborar uma proposta de modelo para análise da sustentabilidade. O modelo foi aplicado através de um estudo de caso em uma empresa de fabricação de implantes e instrumentais ortopédicos, visando então contribuir a um dos segmentos industriais com a demanda mais crescente e de maior importância para as futuras gerações.

1.1 Justificativa e Relevância da Pesquisa

Desde o início da conversão do processo de produção artesanal ao processo de manufatura em escala, a indústria é considerada como um dos pilares que sustenta o crescimento das cidades. De acordo com dados do Banco Mundial (2017), apesar de ter perdido participação nos últimos anos para o segmento de serviços, o segmento industrial ainda é responsável por mais de 25% do total das riquezas produzidas mundialmente, equivalendo a um montante de aproximadamente 20,2 trilhões de dólares por ano (entre 2010 e 2017), conforme expresso na Tabela 1:

Tabela 1 - Participação dos Segmentos da Economia do PIB Mundial

	PIB		Agricultura		Indústria		Serviços		Outros	
	$ Bilhões USD		% PIB		% PIB		% PIB		% PIB	
	2010	2017	2010	2017	2010	2017	2010	2017	2010	2017
Mundo	65.956,70	80.683,80	4,00	4,00	27,00	25,00	63,30	65,10	5,70	5,90
Brasil	2.208,90	2.055,50	4,00	5,00	23,00	21,00	57,60	63,10	15,40	10,90

Fonte: Adaptado de Banco Mundial (2017, s.p.)

O cenário encontrado no Brasil espelha essa configuração. De acordo com levantamento realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), em 2018 a indústria empregou 9,4 milhões de brasileiros e contribuiu cerca de 1,2 trilhão de reais ao PIB nacional, confirmando a importância do segmento como coluna estrutural na construção da economia (CNI, 2018). Logo, considerando o papel essencial das empresas e, principalmente da indústria na economia, não há como desassociar o impacto da mesma na sociedade e no meio ambiente, tampouco ignorar as oportunidades de negócios advindos do caráter disruptivo da I4.0

Para validação do *framework* proposto, optou-se pela indústria de manufatura de próteses e instrumentais ortopédicos. Essa escolha deve-se principalmente às razões de caráter acadêmico e social.

Academicamente, a motivação é a escassez de trabalhos relacionados ao tema. Na área da saúde, muitos são os estudos realizados no tocante à parte biológica e biomecânica, normalmente relacionados à saúde do paciente e ao desempenho do produto (implante ou instrumental) propriamente dito. Assim, contribui à pesquisa considerando uma abordagem focada na indústria de manufatura desses bens num contexto de I.4.0 e de maior sustentabilidade.

Socialmente, existe uma preocupação por parte dos governantes devido ao movimento de transição demográfica do perfil etário populacional por todo o mundo. De acordo com o último relatório técnico “Previsões sobre a população Mundial” da Organização das Nações Unidas (ONU, 2019), devido à fatores como a evolução dos tratamentos médicos e a redução da taxa de natalidade, estima-se que nos próximos 30 anos um sexto da população mundial seja formado por pessoas com mais de 65 anos, número três vezes maior do que o atual e equivalente a cerca de 2 bilhões de habitantes.

Situação idêntica se aplica ao Brasil. A expectativa de vida média do brasileiro hoje já ultrapassa os 75 anos e, segundo dados do IBGE (2017), em 2025 deve ser o sexto país no

mundo com maior número de pessoas idosas. As estimativas do IBGE afirmam que o número de brasileiros com idade superior a 60 anos deve saltar de 15 milhões para 58,4 milhões até 2060 (IBGE, 2017). Outro fator importante é a mudança no perfil desses indivíduos que após os 60 anos continuam trabalhando, se exercitando e levando uma vida ativa (Beltrão *et al.*, 2013).

A Figura 1 resume graficamente os dados do IBGE, tornando ainda mais perceptível o movimento de inversão da pirâmide etária no Brasil.

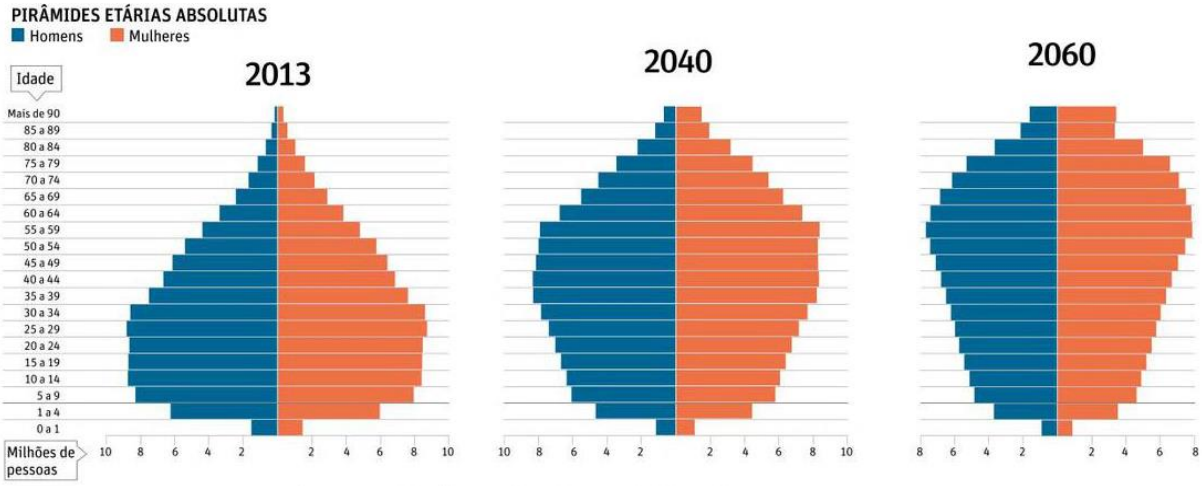
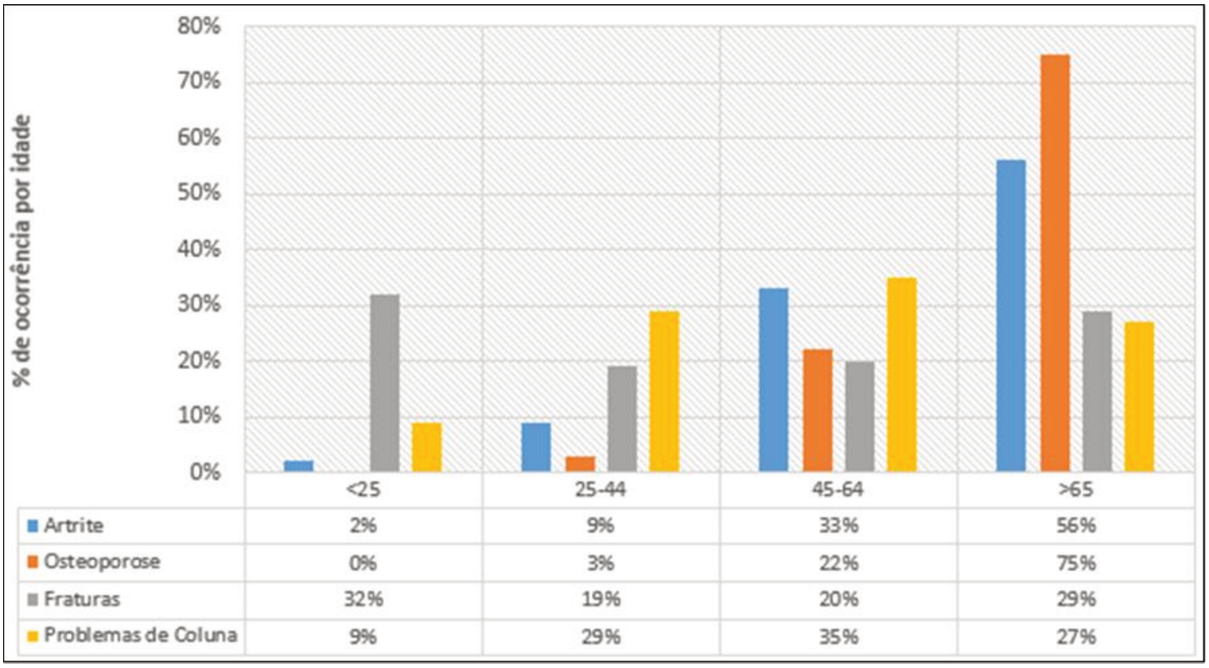


Figura 1 - Projeção de pirâmide etária brasileira.
Fonte: Adaptado de IBGE (2013, s.p.)

Segundo Matos e Araujo (2009), o aumento populacional nessa faixa etária traz consigo uma série de desafios. De acordo com o Ministério da Saúde (2006), as demandas de saúde relativas a patologias crônico-degenerativas devem aumentar, dentre as quais podem-se mencionar principalmente as doenças articulares como osteoartrose ou osteoartrite que se configuram como as principais causas de cirurgias de substituição de articulações por componentes protéticos. (BRASIL, 2006). De acordo com Engelhardt (2007), doenças crônico-degenerativas de ordem ortopédica caracterizam-se pela dificuldade de tratamento sem intervenção cirúrgica, logo, quanto maior o número de pessoas com mais de 60 anos, maior a ocorrência desse tipo de doença e, consequentemente, maior a demanda por cirurgias.

Além desse público, de acordo com a Sociedade Brasileira de Ortopedia e Traumatologia (SBOT), também compõem o quadro de pacientes de ortopedistas traumas agudos, ou fraturas, traumas desportivos, tumores musculoesqueléticos e problemas de coluna (KARAM; LOPES, 2005).

A Figura 2 resume a ocorrência das principais doenças relacionadas por faixa de idade, destacando a tendência de aumento principalmente levando em consideração a população mais idosa (ENGELHARDT, 2007).



	<25	25-44	45-64	>65
Artrite	2%	9%	33%	56%
Osteoporose	0%	3%	22%	75%
Fraturas	32%	19%	20%	29%
Problemas de Coluna	9%	29%	35%	27%

Figura 2 - Ocorrência de doenças por faixa de idade.
Fonte: Adaptado de Engelhardt (2007, p.17)

Para esses casos, as cirurgias para aplicação de próteses ortopédicas, cuja função é repor a funcionalidade do membro ou articulação da forma mais próxima possível à fisiologia natural (RELVAS et. al., 2009), são consideradas como intervenções de sucesso na medicina, angariando mais de 15% de todo o gasto com dispositivos médicos no Brasil (BRASIL, 2019), dado que espelha a configuração mundial, cujos gastos com a ortopedia cresceram 3,5% no último ano, ultrapassando os 51 bilhões de dólares em 2018 (ORTHOWORLD, 2019).

As matérias primas mais frequentemente utilizadas para confecção desses implantes são normalmente de origem mineral, como por exemplo o cobalto, molibdênio e níquel. Estudos como os de Frosch e Galloupoulos (1989) apontam que, considerando a manutenção das taxas de crescimento populacional e com os padrões de consumo atuais até 2030, a finitude desses recursos deve chegar num prazo inferior à 40 anos.

Tabela 2 - Tempo estimado de duração de recursos naturais considerando taxa de consumo prevista para 2030.

Recurso	**Tempo de Duração (em anos) a partir de 2030**
Alumínio	407
Cobre	26
Cobalto	40
Molibdênio	33
Níquel	16
Platina	39
Carvão Mineral	457
Petróleo	7

Fonte: Adaptado de Frosch e Galloupoulos (1989, p. 146)

Logo, nesse contexto, tendo visto a tendências de crescimento da demanda, importa que a indústria responsável pela fabricação desses equipamentos, sendo implantes ou instrumentais cirúrgicos, esteja preparada para essa expansão encontrando na I4.0 possibilidades para aumentar a eficiência dos processos e reduzir o consumo de recursos para garantir o acompanhamento desse crescimento, o suprimento desses recursos e a sustentabilidade para as futuras gerações.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação, além da introdução, está estruturada da seguinte forma:

- Metodologia: a sessão de metodologia narra o caminho seguido para atingir o objetivo definido. Nela são apresentados o tipo de pesquisa e a abordagem utilizada na pesquisa, bem como os passos da Revisão Sistemática de Literatura.
- Capítulo 1 – Sustentabilidade: traz conceitos e uma a breve introdução histórica da sustentabilidade para contextualização inicial, mostrando na sequência os principais aspectos e dimensões presentes na literatura pesquisada. Os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável também são abordados nesse capítulo.
- Capítulo 2 – Indústria 4.0: traz conceitos e um resumo histórico para contextualização sobre as revoluções industriais, destacando os principais marcos de cada uma. O capítulo traz também os princípios e tecnologias da I4.0 descritos pelos autores da Revisão Sistemática de Literatura
- Capítulo 3 – Indústria de Implantes Ortopédicos: resume a evolução da indústria de implantes ortopédicos destacando a introdução dos principais biomateriais

utilizados. Contém também uma breve sessão sobre as regulações que constituem importantes condicionantes ao segmento.

- Capítulo 4 – Indústria 4.0 e Sustentabilidade: contém os principais pontos da revisão sistemática de literatura que correlacionam I4.0 e sustentabilidade através de análises de risco e oportunidade e de modelos de integração. O capítulo também conta com uma análise bibliométrica da literatura utilizada na pesquisa.
- Capítulo 5 – Proposta de *framework*: traz a proposta de *framework* elaborada com base na revisão sistemática de literatura.
- Capítulo 6 – Estudo de caso: traz os resultados da aplicação do *framework* ao estudo de caso proposto, comparando a cadeia tradicional com a proposta I4.0 por meio de indicadores levantados utilizando técnicas de análise de ciclo de vida.
- Capítulo 7 – Discussão: traz discussões sobre as dificuldades encontradas ao longo da condução do estudo e análises sobre aplicações adicionais da I4.0.
- Conclusão: evidencia os tópicos abordados e não abordados no trabalho, destacando as delimitações da pesquisa e indicando possibilidades de trabalhos futuros.

2. Metodologia

Conforme definem Lakatos e Marconi (1991), a escolha da metodologia adequada delimita o melhor caminho para o atingimento do objetivo do trabalho e é fundamental para a concepção de uma postura amadurecida frente a situações que demandam uma análise de caráter científico. Apesar de haver difícil convergência em relação à tipologia das pesquisas, propôs-se a seguinte classificação com base em Gil (2002), Yin (2015) e Freitas e Jabbour (2011):

- à natureza da pesquisa: básica ou aplicada;
- à abordagem do problema: qualitativa ou quantitativa;
- ao escopo da pesquisa: exploratório, descritivo ou explicativo;
- e aos procedimentos técnicos: pesquisa participante, estudo de caso, levantamento tipo *survey*, pesquisa *ex-post-facto*, pesquisa-ação, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental ou pesquisa experimental.

A Figura 3 resume o modelo de enquadramento metodológico proposto pelos autores, destacando a escolha para o trabalho atual em cada categoria:

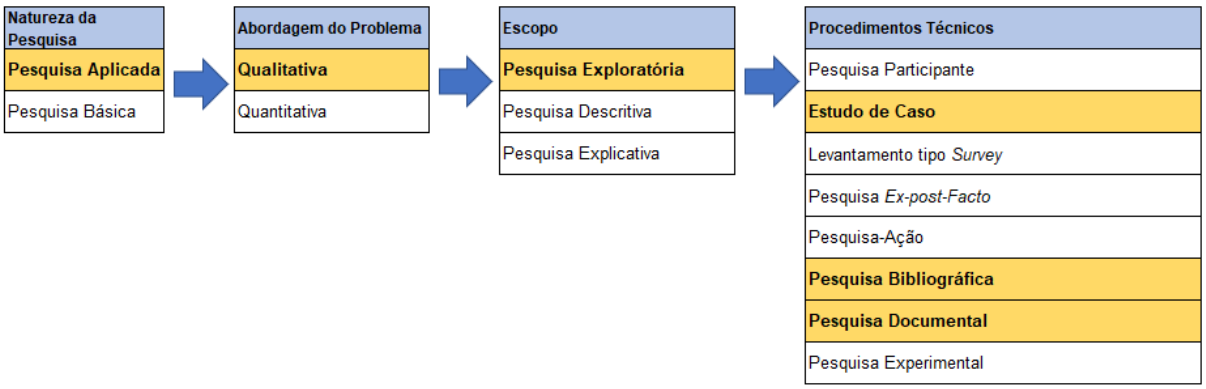


Figura 3 - Enquadramento Metodológico.
Fonte: Elaborado com base em Gil (2002), Yin (2015) e Freitas e Jabbour (2011)

A natureza dessa pesquisa é considerada aplicada pois busca gerar conhecimentos que possam ser utilizados na resolução de problemas reais direcionados a entidades locais (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Diferente da pesquisa básica, ou pesquisa pura, como denomina Gil (2002), cujo objetivo é o desenvolvimento teórico, a pesquisa aplicada visa

utilizar os conhecimentos teóricos no atendimento de necessidades humanas, sendo por isso utilizada com mais frequência devido à relevância para a sociedade, academia e indústria.

A abordagem do presente trabalho é essencialmente qualitativa, pois utiliza um enfoque desvinculado da representatividade numérica para estudar fenômenos e processos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Os métodos qualitativos buscam principalmente explicar o porquê das coisas, exprimindo, mas não necessariamente quantificando, as relações entre os fatores a serem estudados (DESLAURIERS, 1991). Fonseca (2002) acrescenta ainda que a pesquisa qualitativa tem como principais características a tentativa de compreensão da totalidade do fenômeno estudado, mais do que focar conceitos específicos e que, apesar de utilizar de análise mais intuitiva e não empregar métodos estatísticos para tratativa dos resultados, capta e apresenta de melhor forma o contexto sistêmico.

Definida da abordagem, optou-se pelo escopo exploratório para direcionamento da pesquisa. Segundo Gerhardt e Silveira (2009, p.35), “esse tipo de pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com os temas envolvidos na elaboração do problema para que se possa facilitar a construção de hipóteses para posterior análise”.

Assim, tendo em vista que o tema é novo e a contextualização é necessária, o trabalho foi dividido em duas etapas principais quanto aos procedimentos técnicos: a pesquisa bibliográfica com o método de Revisão Sistemática de Literatura (RSL), cujo protocolo será detalhado em tópico dedicado a seguir; e um estudo de caso com pesquisa documental.

Para a composição da base de dados da pesquisa, a utilização da pesquisa bibliográfica foi fundamental. Fonseca (2002, p.32) afirma que “qualquer trabalho científico se inicia com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto”. A pesquisa bibliográfica ocorreu em duas etapas:

1) Pesquisa bibliográfica tradicional: começou-se o estudo pela pesquisa bibliográfica para familiarizar-se com os temas da elaboração do referencial teórico narrativo delimitados na concepção do problema e selecionar possíveis palavras-chave para a RLS: Sustentabilidade, Indústria 4.0 e Indústria de Implantes Ortopédicos. A pesquisa bibliográfica inicial antecedeu o protocolo da RSL e levou em conta documentos como artigos científicos nacionais, internacionais publicados em revistas, anais de eventos, e livros sobre os assuntos citados.

2) Revisão Sistemática de Literatura: realizada para identificar as correlações entre os temas sustentabilidade e I4.0 já existentes na literatura, bem como analisar as lacunas de pesquisa e estudar os modelos já sugeridos para utilização como base na elaboração do *framework* de integração a ser proposto.

Uma pesquisa documental foi realizada para aquisição de informações importantes para a elaboração do estudo de caso. Segundo Gil (2002), enquanto a pesquisa bibliográfica restringe-se à fontes com prévio tratamento analítico, a pesquisa documental considera fontes mais diversificadas, como relatórios de pesquisa, tabelas estatísticas e relatórios de instituições privadas. Esse tipo de pesquisa tem como vantagem a possibilidade de consideração de documentos que constituem fontes históricas ricas e confiáveis. Assim, na pesquisa foram utilizados documentos como relatórios empresariais e publicações de instituições como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Banco Mundial, a Confederação Nacional da Indústria (CNI), a Organização das Nações Unidas (ONU), entre outros.

Optou-se pelo Estudo de Caso como procedimento técnico para a contribuição efetiva do trabalho a partir da aplicação ao segmento da indústria de implantes ortopédicos. Segundo Yin (2015), a metodologia do estudo de caso permite a investigação aprofundada da aplicação de um conceito de interesse num determinado caso múltiplo ou isolado. No caso do presente estudo, como o objetivo é verificar a aplicabilidade da I.4.0 no segmento de ortopedia, justifica-se a utilização de um estudo de caso único, esse, conforme Yin (2015) pode ser aplicado com a finalidade de teste crítico da teoria existente a fim de documentar condições, circunstâncias e resultados utilizando-se um caso representativo.

Miguel (2007) acrescenta que, dentre os benefícios principais da condução de um estudo dessa natureza estão a possibilidade do desenvolvimento de nova teoria e de aumentar o entendimento sobre eventos reais e contemporâneos e, assim, fornecer embasamento para novas pesquisas principalmente quantitativas e descritivas.

A seguir, serão detalhados os procedimentos utilizados para a elaboração do protocolo da RSL e da sua condução propriamente dita.

2.1 Revisão Sistemática de Literatura

A escolha do processo de RSL deu-se para que se pudesse identificar o estado atual da pesquisa na área e levantar variáveis e parâmetros para se construir o *framework* de estudo da I4.0 para a sustentabilidade.

Segundo Khan *et al*. (2003), a revisão sistemática de literatura pode ser considerada como uma das principais ferramentas para responder à uma questão específica de pesquisa a partir da agregação das experiências obtidas através de estudos anteriores. Kitchenham (2004, p.1) faz referência a esse tipo de pesquisa como um meio de "identificar, avaliar e interpretar toda a pesquisa disponível relevante para uma questão particular de pesquisa, ou área temática, ou fenômeno de interesse".

Para a realização da RSL foi criado o protocolo com base nos autores Higgins e Green (2008), Sampaio e Mancini (2007) e Kitchenham (2004), seguindo os cinco passos de Khan *et al.* (2003):

1. Elaboração da pergunta de pesquisa: formulação da questão que irá direcionar a RLS.
2. Identificação do trabalho relevante: definição das bases de pesquisa, palavras chave, padrões de combinação (*OR* ou *AND*, por exemplo), tipo de publicação e período de abrangência para levantamento dos trabalhos preexistentes e definição dos critérios de inclusão e exclusão dos documentos para utilização no trabalho.
3. Avaliação da qualidade dos estudos: leitura dos títulos e resumos para identificação de trabalhos relacionados à pergunta de pesquisa da RLS.
4. Resumo das evidências encontradas: registro dos artigos e contribuições de cada autor, segundo definição do protocolo de pesquisa
5. Interpretação dos resultados: identificação das contribuições pré-existentes que possam apoiar ou contrariar a proposta da pergunta de pesquisa e localização de lacunas que proporcionem oportunidades de pesquisa.

Sampaio e Mancini (2007) desdobram os cinco passos de Khan *et al.* (2003) em algumas etapas adicionais, como mostra a Figura 4, que resume o procedimento da RSL executada no trabalho:

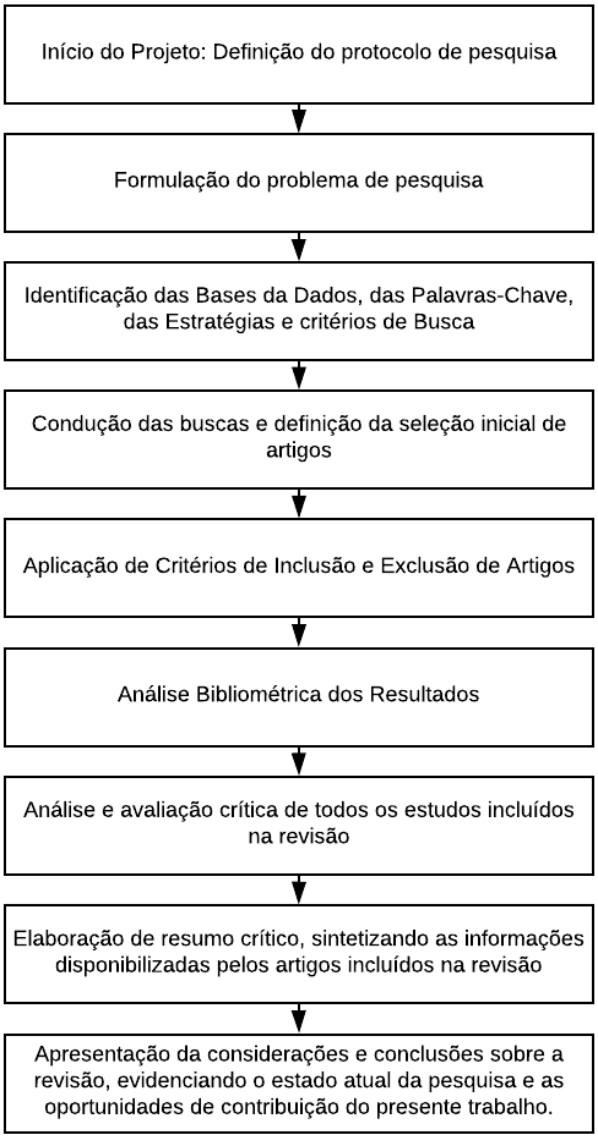


Figura 4 - Diagrama Elaboração do Trabalho.
Fonte: Adaptado de Sampaio e Mancini (2007, p.86).

2.1.1 Elaboração da Pergunta da RSL

Dada a necessidade de verificar as possibilidades de contribuição dos recursos da I4.0 na produção de itens sustentáveis, a pergunta de pesquisa foi elaborada para que se pudesse identificar na literatura pesquisas anteriores envolvendo sustentabilidade e indústria 4.0.

Logo, formulou-se a seguinte pergunta para a RSL:

“Como a Indústria 4.0 se relaciona com a sustentabilidade?”

Essa pergunta se relaciona com a proposta central do trabalho e visa identificar modelos e variáveis já existentes, assim como exemplos de aplicação dos princípios e

tecnologias da I4.0 e os lacunas de pesquisa, direcionando assim os parâmetros para composição do *framework* proposto.

2.1.2 Definição da base de dados e Identificação de documentos relevantes

As bases selecionadas para a pesquisa foram *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science* devido à maior abrangência de indexação e, por consequência, número mais elevado de documentos apresentados após a realização de testes com as palavras-chave definidas. A utilização de mais bases resultaria numa ocorrência maior de documentos repetidos, visto que mesmo utilizando as três bases selecionadas 40% dos documentos já apresentavam ocorrência de duplicidade, conforme apresentado na sequência.

Para realização do levantamento dos documentos existentes foram selecionadas duas palavras-chave mais abrangentes considerando os dois principais temas envolvidos na RSL: "*industry 4.0*" e "*sustainability*". O operador lógico "E" (AND) foi utilizado para que se restringisse os resultados encontrados para apenas documentos que contivessem os dois temas.

Foram considerados quatro critérios de inclusão:

1) Ambiente de publicação: apenas artigos publicados em periódicos foram considerados na pesquisa;
2) Campo de ocorrência das palavras-chave: a busca foi realizada considerando a ocorrência da combinação dos campos de título, palavras-chave ou resumo;
3) Período: a restrição de período de apuração foi de 2011 a 2019, devido a primeira publicação sobre Indústria 4.0 ter ocorrido em 2011;
4) Idioma: foram considerados os artigos publicados em português ou inglês.

A Figura 5 resume esquematicamente as delimitações da busca conduzida. Os critérios de exclusão serão detalhados na Figura 6.

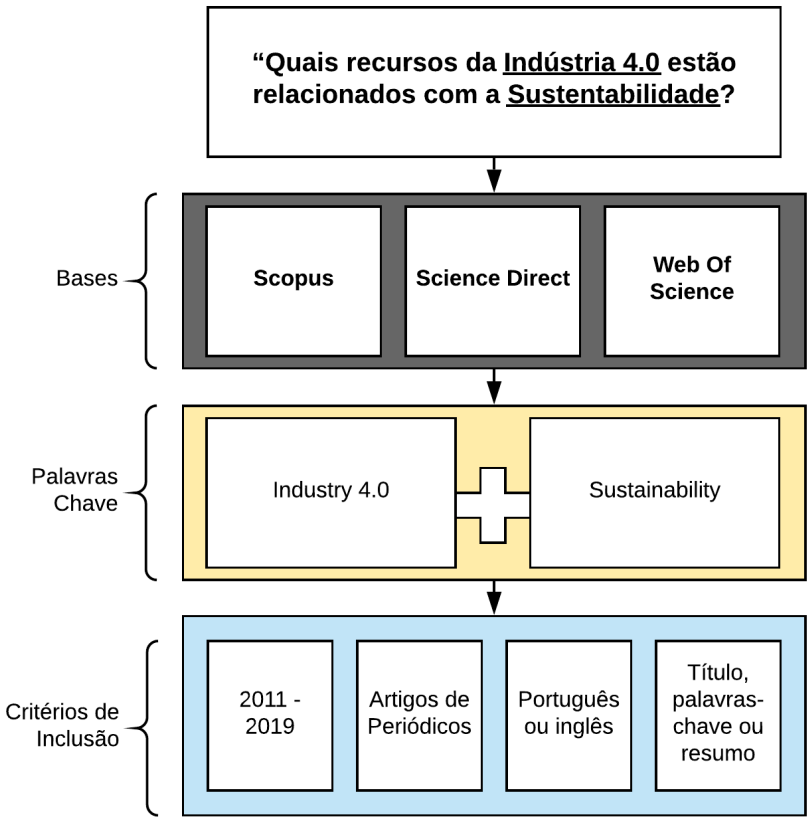


Figura 5 - Critérios de Busca da RSL.
Fonte: Elaboração a partir da RLS (2019).

A partir dos critérios descritos, foram encontrados 258 artigos. A Figura 6 resume os filtros aplicados para que se pudesse checar nos documentos foco do estudo.

Na primeira etapa, o software *Mendeley* foi utilizado para gerenciamento das referências extraídas das bases em formato “.ris” ou “.bib”. Consolidadas as referências, utilizou-se a ferramenta de remoção de duplicatas do software. Foram removidas 104 ocorrências repetidas, número elevado devido à abrangência das bases utilizadas, diminuindo o número de artigos para 154.

O número de citações também foi utilizado como critério de exclusão. Todos os trabalhos com menos de cinco citações foram removidos, para que se mantivesse na análise apenas o material de maior impacto. Após a remoção, o número dos artigos foi reduzido para 55. Os 55 artigos representam aproximadamente 20% do total inicial dos trabalhos inicialmente levantados, contendo mais de 80% da contagem das citações.

Para que se pudesse eliminar os artigos não relacionados à pesquisa, os títulos e resumos foram lidos como um filtro adicional. Foram incluídos na RLS os artigos que relacionavam a I4.0 com ao menos um dos pilares da sustentabilidade, social, econômico ou

ambiental num contexto de indústria de manufatura. Os 19 artigos com restrições de aplicação à um nicho específico de negócio, como agricultura, indústria da moda, indústria automotiva ou empresas de TI, por exemplo, foram excluídos, reduzindo para 36 o número de artigos a serem analisados na íntegra.

A análise envolveu uma bibliometria inicial utilizando os softwares *Mendeley* e *Zotero* para consolidação das informações de referência dos artigos para posterior tratamento dos dados e geração dos gráficos utilizando o Microsoft Excel e o *VOSViewer*. Na sequência, foi realizada a análise das contribuições de cada artigo à pergunta de pesquisa proposta.

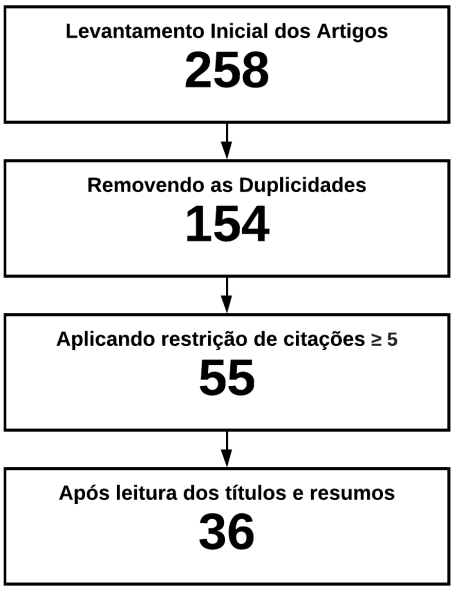


Figura 6 - Levantamento do material para RSL.
Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

Capítulo 1 - Sustentabilidade

A pauta da sustentabilidade vem apresentando relevância crescente ao longo dos últimos anos, devido principalmente a discussões sobre mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais e conflitos sociais. Autores como Malthus (1798) e Frosch e Galloupoulos (1989) e já anunciavam a importância do tema alertando sobre o colapso das matérias primas frente aos padrões de consumo crescentes que acompanham o progresso das civilizações e as inovações advindas da indústria.

Gallopín (2003) refere-se ao conceito de sustentabilidade como a manutenção dos recursos necessários para vida, relacionando o desenvolvimento sustentável como fator de progresso. O conceito atual mais utilizado de desenvolvimento sustentável conhecido a partir da definição da Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento, ou *World Commission on Environment and Development* (WCED, 1987, p.8) é: "o desenvolvimento que atende a necessidade do presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações de satisfazer as delas". Nessa definição simplista de desenvolvimento sustentável, existem muitos fatores que compõem e impactam a compreensão integral do tema e devem ser alinhados para garantir o entendimento do assunto.

Assim, este capítulo tem como objetivo oferecer um panorama sobre a evolução histórica do conceito, a caracterização da sustentabilidade e seus aspectos, assim como a definição do desenvolvimento sustentável e suas características para os âmbitos de produto, processo e cadeia produtiva.

1.1 Evolução Histórica

A preocupação com a finitude dos recursos naturais e com a garantia de sustento e perpetuidade da espécie orienta e molda a história do homem. Conforme ilustra Kuhlman e Farrington (2010), até mesmo o homem paleolítico ancestral se preocupava com a extinção de sua presa, assim como os primeiros agricultores com a manutenção da fertilidade do solo.

De acordo com Wiersum (1995), o conceito de sustentabilidade originou-se inicialmente da preocupação com as florestas: não se poderia retirar mais do que os novos campos estariam capacitados à repor. A primeira utilização do termo sustentabilidade data de 1713, quando Hans Carl Von Carlowitz, cientista alemão atuante no campo da silvicultura em Freiberg, Saxônia, utilizou a expressão alemã *Nachhaltigkeit* (sustentabilidade) para se referir à forma de exploração sustentável das florestas (KUHLMAN; FARRINGTON, 2010).

De acordo com Wilderer (2007), no século XVII, a madeira era a principal matéria prima base para uma enorme quantidade de aplicações, como a proteção dos poços de mineração, a alimentação dos fornos para fundição de minério de ferro e a construção de navios, por exemplo. Wilderer (2007) registra a ideia de que naquela época para que o manejo florestal sustentável fosse alcançado o número de arvores cortadas teria de ser igual ao número de árvores plantadas e em estado de crescimento por unidade de tempo, ou seja, para cada árvore cortada uma nova teria de ser plantada e o tempo de seu crescimento considerado para que a estabilidade econômica da silvicultura pudesse ser mantida.

Posteriormente naquele mesmo século, Thomas Malthus publicava em 1798 seu trabalho sobre a inabilidade dos recursos de agricultura que cresciam de forma aritmética de atender a demanda mundial de alimento devido à progressão geométrica da expansão populacional e a eminente fome em massa, ou seja, a população estava crescendo à taxas muito maiores do que a capacidade de produzir alimento, o que causaria uma fome de proporções catastróficas (MALTHUS, 1986). A proposta do autor previa a definição de limites populacionais e econômicos com base na capacidade de regeneração natural dos recursos para a garantia de sustento da população. Apesar de ter sido criticada por não considerar os impactos da evolução dos métodos contraceptivos ou as melhorias das técnicas de cultivo (CONNELLY, 2008), a ideia de Malthus perdurou por mais de dois séculos e influenciou importantes estudos posteriores, como o relatório do clube de Roma (MEADOWS *et al.*, 1972) e Ehrlich (1978) em seu conhecido livro A Bomba Populacional, ambos na linha de finitude de recursos naturais frente à expansão populacional.

O avanço dos estudos em torno da sustentabilidade continuou e em 1931 o economista americano Harold Hotelling formula a teoria sobre a taxa ótima de exploração de recursos não renováveis (HOTELLING, 1931). Considerando o contexto de segunda revolução industrial vivenciada na época, contribuía para o aumento da demanda por recursos não apenas o aumento da população mundial em número, mas também em perfil de consumo. Começa-se a notar a existência de uma evolução da visão inicialmente focada na conservação dos recursos existentes passando a quantificar e estudar as relações de exploração consciente (KUHLMAN; FARRINGTON, 2010).

Nas décadas de 40 e 50, o *National Research Council* (1999) resume as preocupações e aspirações gerais da população global após o fim da Segunda Guerra Mundial em quatro temas chaves: paz, liberdade, desenvolvimento e meio ambiente, destacando a importância do desenvolvimento levando em consideração a preocupação com o meio ambiente. À partir das décadas de 60 e 70 iniciam-se a formação de comissões internacionais para discussão desses tópicos, como o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), braço da ONU focado no desenvolvimento criado em 1965 que impulsionou a criação do Clube de Roma em 1968, grupo composto por representantes da política, economia, indústria, academia e sociedade civil com foco no desenvolvimento e preparação para as futuras gerações (WIERSUM, 1995).

O relatório do Clube de Roma é considerado um marco na captação da atenção da política pública global pois previu que muitos recursos naturais cruciais para nossa sobrevivência se esgotariam em uma ou duas gerações (DE JACQUES, 2011; WCED, 1987). Diante da previsão de um cenário catastrófico, era necessário então um contraponto que se apresentasse como solução política, social, ambiental e econômica. Como resposta, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, ou *World Commission on Environment and Development* (WCED) das Nações Unidas (ONU), também conhecida como Comissão Brundtland, conduziu estudo e publicou o reconhecido relatório responsável pela definição de desenvolvimento sustentável citada anteriormente e dar ao conceito de sustentabilidade a visibilidade que possui desde então (KUHLMAN; FARRINGTON, 2010).

Ainda segundo o relatório da WCED (1987), o principal motivo da preocupação com a preservação e utilização racional dos recursos não se dava ao valor intrínseco desses, mas sim à necessidade de garantir a manutenção do acesso frente ao esgotamento anunciado pelo relatório do clube de Roma.

Observa-se que os fatores históricos como as revoluções industriais, as descobertas científicas, as guerras e as transformações sociais e políticas incidiram na mudança do conceito de sustentabilidade, definida então atualmente como a utilização consciente dos recursos naturais e ao desenvolvimento sustentável para que se possam atender às demandas crescentes da população mundial sem comprometer a habilidade de continuidade de atendimento das próximas gerações (KUHLMAN; FARRINGTON, 2010).

1.2 Triple Bottom Line

A definição de desenvolvimento sustentável enunciada pelo relatório de *Brundtland* relacionava os conceitos de desenvolvimento e meio ambiente considerando os fatores recursos e necessidades sujeitos ao tempo.

Visando aprofundar os estudos sobre a sustentabilidade, autores como Elkington (1998) e Helming *et al*. (2008) defendem que a análise da sustentabilidade deve ser desdobrada em três dimensões principais: social, econômico e ambiental compondo a chamada *Triple Bottom Line (TBL).*

Segundo Elkington (1998), para que se alcance a sustentabilidade deve haver uma relação sinérgica combinando todos as dimensões ou pilares. Conforme ilustra a Figura 7, a composição formada pela combinação de pilares agrupados de dois em dois gera condições de viabilidade (Planeta e Lucro), suportabilidade (Planeta e Pessoas) e equitabilidade (Pessoas e Lucro), mas somente a junção dos três confere o requisito de sustentável.

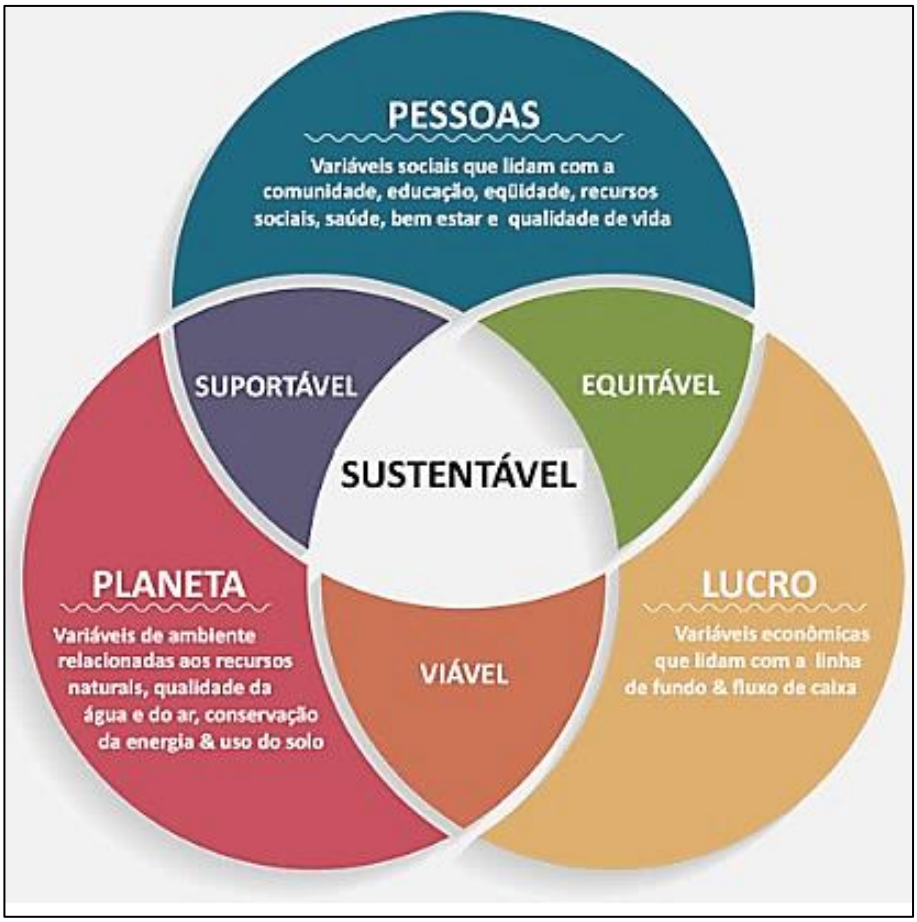


Figura 7 - *Tripple Bottom Line.*
Fonte: Elaborado a partir de Fisk (2010, s.p.)

A interdependência entre os três fatores, também chamados por Fisk (2010) de triplo "P": *people* (pessoas), *planet* (planeta), *profit* (lucro) consta inclusive na definição de desenvolvimento sustentável adotada pelas Nações Unidas (ONU, 1997) na Agenda para Desenvolvimento divulgada no mesmo ano:

> O desenvolvimento é um empreendimento multidimensional para alcançar uma maior qualidade de vida para todas as pessoas. O desenvolvimento econômico, o desenvolvimento social e a proteção ambiental são componentes interdependentes e que se reforçam mutuamente do desenvolvimento sustentável (ONU, 1997, p.9)

Entendido o caminho trilhado pela sustentabilidade até que se chegasse aos contornos atuais, os próximos tópicos irão detalhar cada aspecto do conceito.

1.2.1 Sustentabilidade ambiental (Planeta)

De acordo com Kuhlman e Farrington (2010), a dimensão ambiental da sustentabilidade diz respeito às atividades que consideram o impacto do uso de recursos, substâncias perigosas, resíduos e emissões no ambiente físico, consideradas por Elkington (1998) como importantes na avaliação da performance nessa dimensão. Vanclay (2004) acrescenta que as características e recursos de todos os componentes que compõem um ecossistema, tais como a terra, os recursos naturais, hídricos e minerais devem ser considerados na definição de sustentabilidade ambiental.

Hubbard (2009) associa a performance em relação à sustentabilidade ambiental através da quantidade e do tipo de recursos utilizados e dos resíduos gerados a partir do processo de transformação, conforme ilustra a Figura 8:

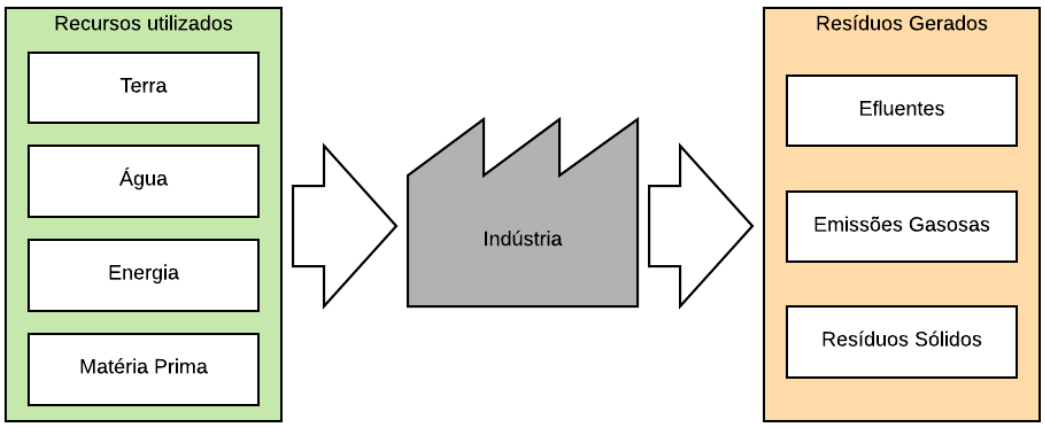


Figura 8 - Fatores de impacto da sustentabilidade ambiental.
Fonte: Elaborado a partir de Hubbard (2009)

Martínez *et al.* (2015) destacam que os principais impactos à sustentabilidade ambiental podem ser classificados e medidos conforme as categorias a seguir:

1) Acidificação: processo de redução dos níveis de PH dos oceanos por meio da absorção de cerca de um terço do CO_2 emitido no planeta, afetando todo o ecossistema marinho e causando impactos à segurança alimentar de comunidades e sistemas que dependem dele.
2) Eutrofização: processo de poluição caracterizado pelo acúmulo de nutrientes em corpos d'água gerados pelo descarte de resíduos orgânicos e provenientes da agricultura sem o devido tratamento, o que causa o aumento desenfreado da população de algas e cianobactérias e a consequente redução dos níveis de

oxigênio necessários para a manutenção da biodiversidade, afetando a qualidade da água e a vida das espécies aquáticas.

3) Aquecimento global: processo de elevação da temperatura média da atmosfera e dos oceanos causado pelo aumento da emissão de gases poluentes e impactantes no efeito estufa, como o Dióxido de Carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), clorofluorcarbonetos (CFC), óxidos de nitrogênio (N_xO_x), metano (CH_4) e dióxido de enxofre (SO_2), e o aumento de queimadas e do desmatamento.
4) Esgotamento abiótico: processo de esgotamento dos recursos naturais não renováveis, como extração de minérios e combustíveis fósseis.
5) Danos à camada de ozônio: degradação da camada natural de O_3 por meio da emissão desenfreada de gases advindos de atividades industriais, como Tetracloreto de Carbono (CTC), Hidro clorofluorcarbono (HCFC), Clorofluorcarbono (CFC) e Brometo de Metila, o que causa uma exposição maior à radiação ultravioleta V (UV-B), agente nocivo aos seres vivos e relacionado à supressão do sistema imunológico, danos a visão e desenvolvimento de câncer de pele, além dos efeitos aos ecossistemas e à biodiversidade.
6) Toxicidade humana: impacto que resulta da exposição humana à agentes potencialmente tóxicos originados do acúmulo de resíduos industriais.
7) Eco toxicidade: impacto dos agentes químicos classificados como tóxicos ao meio ambiente, ecossistemas e a biodiversidade.

Fisk (2010) relaciona a sustentabilidade ambiental à adoção de práticas como utilização de energia e matéria prima renováveis, redução de desperdícios e emissões nos transportes e durante a fabricação, destinação correta do material no final da vida do produto, assim como o correto gerenciamento de resíduos gerados ao longo do processo.

1.2.2 Sustentabilidade social (Pessoas)

Vanclay (2004) resume o impacto da sustentabilidade social como a análise, monitoramento e gerenciamento das consequências sociais do desenvolvimento. Hubbard (2009) relaciona esse pilar com o impacto que uma empresa e sua cadeia de suprimentos têm nas comunidades onde atuam. Fisk (2010) define o atingimento da sustentabilidade social como o estabelecimento de relações que sejam mutuamente benéficas para os *stakeholders*, funcionários, clientes e a comunidade em geral.

Martínez *et al.* (2015) destaca a empregabilidade, equidade salarial, acesso a estudo e qualificação e a inclusão social como parâmetros importantes para a aferição da sustentabilidade social e Fisk (2010) destaca que fatores como atendimento às comunidades locais, promoção de educação e desenvolvimento, auxílio na redução da pobreza, promoção e garantia de atendimento aos direitos humanos, saúde, bem estar e segurança, utilização da ética e governança nas decisões e na administração garantia de privacidade e igualdade que devem ser observados para o atendimento da sustentabilidade social.

Logo, considera-se socialmente sustentável a promoção de desenvolvimento e construção de capital social que atue na melhoria da qualidade de vida da sociedade onde a empresa ou órgão está inserido (VANCLAY, 2004).

1.2.3 Sustentabilidade econômica (Lucro)

Corroborando com as dimensões ambiental e social, a sustentabilidade econômica se apresenta com participação fundamental no atingimento da sustentabilidade integral (HUBBARD, 2009).

Por ser mais tangível que os demais pilares, focando na eficiência financeira das organizações e no balanceamento entre os custos, a rentabilidade e o lucro das operações, a sustentabilidade econômica é frequentemente responsável por ser o principal fator de decisão na viabilização de práticas sustentáveis e nas tomadas de decisão para a escolha de processos, materiais e fornecedores na cadeia de suprimentos (FINKBEINER *et al*., 2010).

Fisk (2010) acrescenta que o desenvolvimento de parcerias de negócio e a gestão da produção que promova o aumento da eficiência dos processos são fundamentais para a apresentação de crescimento lucrativo, e a consequente sustentabilidade econômica.

1.3 Objetivos do desenvolvimento sustentável

De acordo com Jacobs et. al. (1987), o desenvolvimento sustentável responde à cinco principais demandas:

1) Integração entre conservação e desenvolvimento;
2) Satisfação das necessidades humanas básicas;
3) Encontro da equidade e justiça social;
4) Preservação e afirmação da diversidade cultural;

5) Manutenção da integridade ecológica.

Conforme sintetiza Lele (1991), existe a necessidade de detalhar essas demandas traduzindo-as em objetivos que possam ser mais facilmente compreendidos, mensurados e transformados em ações. Entendendo a relevância da demanda, pesquisadores passaram a se mobilizar e ter respostas positivas dos governos nessa direção, conforme resume a linha do tempo elaborada por Gaffnew (2014) na Figura 9:

Ano	2012							
Mês	Mar	Jun	Jul	Ago	Set			
Processo Político		Conferência RIO+20	Painel de Emitentes de Auto Nível estabelecido - High Level Panel (HLP)		ONU reforça recomendações da Rio +20			
Input Científico	Planeta Sob Pressão	Forum Ciência e Tecnologia ICSU (Rio)		Sustainable Development Solutions Network (SDSN)				
	2013							
	Jan	Mar	Abr	Mai	Jun	Ago		
Processo Político	ONU estabelece GTA (GTA) Pró sustentabilidade	1º Encontro do GTA	2º Encontro do GTA	3º Encontro do GTA Publicação de reporte do Painel De Alto Nível	4º Encontro do GTA			
Input Científico		ODS para Pessoas e Planeta - *Nature* (Griggs *et al.*)				UNEP: reforça importância do meio ambiente nos ODS		
	2013				2014			
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev		
Processo Político	Forum Político de Alto Nível (Secretario geral da ONU anuncia Conselho Consultivo Científico)		5º Encontro do GTA	6º Encontro do GTA	7º Encontro do GTA	8º Encontro do GTA		
Input Científico		Relatório Sustainable Development Solutions Network (SDSN): proposta de ações para o desenvolvimento sustentável		UNESCO e Conselho Internacional de Ciência realizam evento sobre ODS	Primeiro Encontro Conselho Consultivo Científico Evento Conselho Internacional de Ciência sobre desafios urbanos	UNESCO e Conselho Internacional de Ciência publicam artigo sobre ODS e finitude de recursos.		
	2014						2015	
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Set	Set	
Processo Político	9º Encontro do GTA	10º Encontro do GTA	11º Encontro do GTA	12º Encontro do GTA	13º Encontro do GTA	ONU Recebe proposta de documento para IPCC do GTA	Processo de adoção intergovernamental dos ODS	
Input Científico	Sustainable Development Solutions Network (SDSN): Proposta inicial de Indicadores para ODSs.			UNESCO e Conselho Internacional de Ciência realizam evento na abertura do 12º Encontro do GTA				

Figura 9 - Linha do tempo dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.
Fonte: Adaptado de Gaffnew (2014, p. 23).

Um ano após a realização da conferência *Planet Under Pressure,* Griggs *et al.* (2013) propuseram a relação de seis objetivos que combinariam as metas de desenvolvimento do milênio e o estabelecimento de condições necessárias para assegurar a estabilidade dos ecossistemas da Terra, conforme resume o Quadro 1:

Quadro 1 - Seis Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

Objetivo	**Descrição**
Objetivo 1	Prosperar vidas e meios de subsistência. Eliminar a pobreza e melhorar o bem-estar através acesso à educação, emprego e informação, melhor saúde e moradia, reduzindo a desigualdade e caminhando para consumo e produção sustentáveis.
Objetivo 2	Segurança alimentar sustentável. Acabar com a fome e obter alimentos a longo prazo segurança - incluindo melhor nutrição - através de sistemas sustentáveis de produção, distribuição e consumo.
Objetivo 3	Segurança hídrica sustentável. Garantir acesso universal à água limpa, saneamento básico e garantir eficiência dos sistemas através da gestão integrada dos recursos hídricos.
Objetivo 4	Energia limpa universal. Melhorar acesso universal a energia limpa que minimiza a poluição e os impactos à saúde local e mitiga o aquecimento global.
Objetivo 5	Ecossistemas saudáveis e produtivos. Sustentar a biodiversidade e serviços ecossistêmicos através de melhores gestão, avaliação, medição, conservação e restauração.
Objetivo 6	Governança para sociedades sustentáveis. Transforme a governança e as instituições em todos os níveis para abordar as outras cinco metas de desenvolvimento sustentável.

Fonte: Adaptado de Griggs *et al.* (2013, p. 307)

As metas para desenvolvimento do milênio para as Pessoas e o Planeta foram consolidadas pela ONU como Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) no início dos anos 2000 e consistiam basicamente no resumo mostrado pela Figura 10 - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

Figura 10 - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2001, s.p.)

Pouco mais de dois anos depois da conferência *Planet Under Pressure*, através de extensas rodadas de negociação com as lideranças mundiais, em setembro de 2015 na conferência Rio +20 a ONU expandia tal proposta em 17 Objetivos para o Desenvolvimento

Sustentável (ODS) e 169 metas a serem atingidas até 2030. Os objetivos cobriam as três dimensões do TBL, chamadas no documento de “Pessoas, Planeta e Prosperidade", e acrescentavam os pilares “Paz”, como condição *sine qua non* para o atingimento do desenvolvimento sustentável e “Parceria” como responsável pela capacidade de colocar os ODS em prática, uma vez que a responsabilidade não fica restrita aos governos, mas se estende às empresas e a sociedade civil (ONU, 2015).

O Quadro 2 resume os ODS para a Agenda 2030, conforme divulgado por ONU (2015):

Quadro 2 - Dezessete Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

Objetivo	**Descrição**
Objetivo 1	Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares
Objetivo 2	Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável
Objetivo 3	Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades
Objetivo 4	Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos
Objetivo 5	Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas
Objetivo 6	Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos
Objetivo 7	Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos
Objetivo 8	Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos
Objetivo 9	Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação
Objetivo 10	Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles
Objetivo 11	Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis
Objetivo 12	Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis
Objetivo 13	Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos
Objetivo 14	Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável
Objetivo 15	Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade
Objetivo 16	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis
Objetivo 17	Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável

Fonte: adaptado de ONU (2015, p.18).

A partir da publicação do documento, sociedade, governo e empresas, principais atores e responsáveis pela manutenção da sustentabilidade, se comprometiam com a necessidade de garantir às futuras gerações o acesso a recursos e condições para a manutenção da vida, paz e prosperidade, atendendo então aos requisitos do *Brundtland Report* que definem o desenvolvimento sustentável.

Entende-se então que desenvolver e fabricar produtos mais sustentáveis vem como resposta à um cenário marcado por consumo exagerado, superpopulação, poluição, utilização não consciente de recursos naturais (LJUNGBERG, 2005) e que os ODS, além de compromisso político, posicionam-se como orientadores para o direcionamento de ações nesse sentido. Logo, a importância de se avaliar as possibilidades de contribuição de inovações como as trazidas pela I4.0 se apresenta com grande relevância tanto para a academia quanto para a sociedade.

1.4 Âmbitos da Sustentabilidade

A partir do abertura do conceito de sustentabilidade em três pilares principais proposto Elkington (1998), uma série de novas preocupações passaram a permear o pensamento das companhias quanto aos âmbitos da sustentabilidade. Não basta ter um produto "mais verde" se o processo produtivo e a cadeia de suprimentos como um todo não forem igualmente sustentáveis (ROY, 2000).

Logo, para que se haja um balanço entre os pilares ambiental, social e financeiro e se possa atender às tradicionais demandas por qualidade e custo, há a necessidade de desdobrar o entendimento da sustentabilidade do produto propriamente dito ao longo das atividades da produção, como projeto, fabricação, distribuição, disposição e gestão pós consumo (O'BRIEN, 1999).

Os próximos tópicos tratam de esclarecer os âmbitos e definir a sustentabilidade de produto, processo e cadeia produtiva e de suprimentos (MAXWELL; VAN DER VORST, 2003), bem como as métricas utilizadas na identificação, quantificação e avaliação da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos produtos.

1.4.1 Sustentabilidade de produto

De acordo com Maxwell e Van Der Vorst (2003), a sustentabilidade de um produto está associada aos impactos que causa em cada aspecto do TBL. Logo, o termo produto sustentável compreende aquele que atinge um balanço equilibrado entre o uso reduzido e consciente de recursos naturais e a melhoria do aspecto social, garantindo a entrega do desempenho pretendido, dos parâmetros de qualidade esperados e da competitividade financeira.

No entanto, segundo Biderman *et al*. (2008), o entendimento de produto sustentável deve estar sujeito ao desempenho ao longo do seu ciclo de vida, ou seja, analisar a sustentabilidade de um produto final sem a análise da cadeia completa pode resultar numa análise tangencial e equivocada. À partir do entendimento dessa necessidade, autores como Martínez *et al*. (2015), Vinodh e Rathod (2010), Garcia-Muiña *et al.* (2018) sugerem então analisar a sustentabilidade à partir da verificação dos impactos ao longo de todo o ciclo de vida, como será descrito em tópico dedicado na sequência.

1.4.2 Sustentabilidade de processo

Além da sustentabilidade do produto, uma preocupação crescente é quanto à sustentabilidade do processo produtivo. Segundo Roy (2000), à partir da década de 80 começou-se a preocupação não apenas com o produto final, mas com o que sairia da chaminé da fábrica ao longo do processo produtivo.

Conforme resumem Faulkner e Badurdeen (2014), o conceito de sustentabilidade de processo (ou de manufatura) passou por quatro principais momentos desde a manufatura tradicional até a manufatura sustentável, como expressa o Quadro 3:

Iung e Levrat (2014) elaboram na Figura 7 uma linha do tempo relacionando o valor das partes interessadas para cada diferente visão sobre a sustentabilidade de processo. Faulkner e Badurdeen (2014) defendem que essas visões aperfeiçoam-se utilizando os recursos da visão anterior. Enquanto a manufatura verde utiliza recursos do *Lean* para reduzir desperdícios, a manufatura sustentável aprimora os 3R da manufatura verde para uma definição mais ampla.

Quadro 3 - Visões sobre a Manufatura

Visões sobre a Manufatura	Definição
Manufatura Tradicional	Visão de manufatura tradicional baseada no produto pretendido e nos processos de transformação necessários para a conversão da matéria prima no objetivo final.
Lean Manufacturing	Tendo início no cenário pós segunda-guerra, *o lean manufacturing* é orientado basicamente à redução de desperdícios.
Manufatura Verde	Popularizada no início dos anos 90, a manufatura verde baseada nos 3Rs (reduzir, reutilizar, reciclar) enfatiza a maior recuperação de valor dos produtos no fim de vida e a reutilização em ciclos de vida subsequentes para um fluxo de material mais extenso.
Manufatura Sustentável	Considerar uma evolução à Manufatura verde baseada nos 3R, a manufatura sustentável tem como parâmetros os 6Rs (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, redesenhar e remanufaturar) e foi popularizada a partir de 2000.

Fonte: Elaborado a partir de Faulkner e Badurdeen (2014)

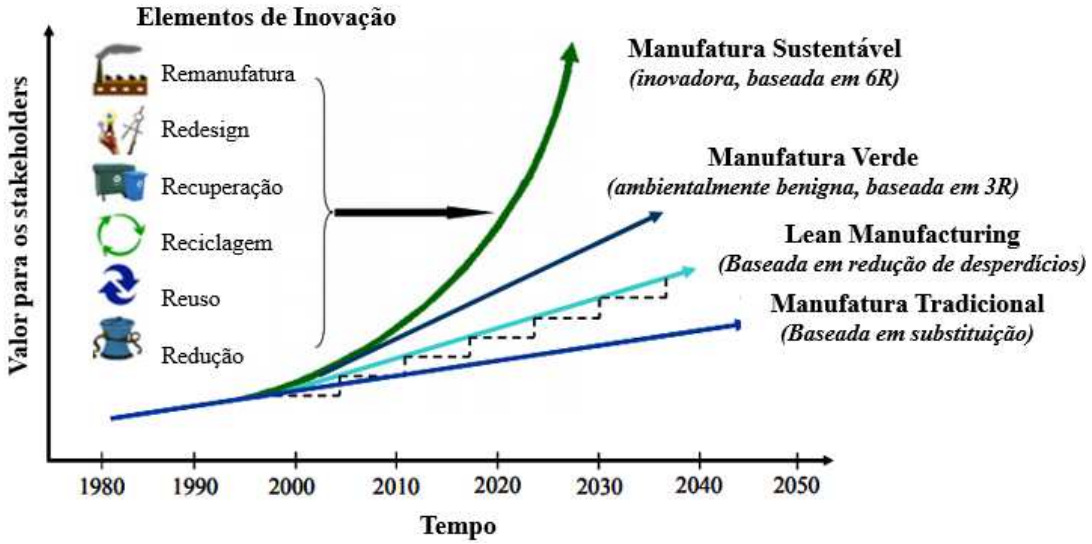


Figura 11 - Evolução da Sustentabilidade de Processo
Fonte: Adaptado de Iung e Levrat (2014, p. 2)

Baseando-se nas teorias mais recentes, Gbedeto *et al*. (2018) definem então como sustentável um processo que minimiza impactos ambientais negativos, conserva energia e recursos naturais, são seguros para funcionários, comunidades e consumidores e são economicamente sadios. Assim como a sustentabilidade do produto, o desempenho sustentável do processo também pode ser obtido através da avaliação do ciclo de vida.

1.4.3 Sustentabilidade da cadeia

A sustentabilidade de uma empresa pode ser resumida como a capacidade de gerar recursos que sustentem a operação, a reposição de ativos e o reinvestimento para garantia de competitividade (BARBIERI *et al.*, 2010). No entanto, principalmente entendendo os riscos e oportunidades associados, para que se a sustentabilidade seja garantida num nível macro, existe a necessidade de que toda a cadeia de suprimentos seja sustentável (SILVESTRE, 2016).

Seuring e Müller (2008, p. 700) definem a sustentabilidade da cadeia como "a gestão de fluxos de materiais, informação e capital, bem como a cooperação entre empresas ao longo da cadeia de suprimentos, ao mesmo tempo em que leva as metas das três dimensões do desenvolvimento sustentável, ou seja, econômicas, ambientais e sociais são derivados de exigências de clientes e partes interessadas".

Conforme definem Chen e Paulraj (2004), a cadeia de fornecimento engloba todas as atividades associadas ao fluxo e transformação de mercadorias, desde a primeira extração das matérias-primas até o usuário final, bem como os fluxos de informações associados e deve ser integral e sistemicamente analisada para que possa ter uma avaliação adequada sobre a sustentabilidade.

Gupta e Palsule-desai (2011) defendem a perspectiva multidisciplinar da avaliação da Sustentabilidade, considerando todo o ciclo de vida do produto ao longo de todos os estágios da cadeia de valor, demandando então uma análise específica mais ampla do que a sustentabilidade do processo ou do produto em si. O *Green Supply Chain Management* (GrSCM) surge então como vertente de pesquisa correlacionada ao *Lean Manufacture* e consolida a visão sobre a sustentabilidade ao longo dos elos da cadeia de suprimentos.

Pampanelli, Found e Bernardes (2015) resumem que os objetivos do *Lean* de reduzir os desperdícios, colocar os processos em fluxo para melhor eficiência e a produção puxada que minimizam os estoques relacionam-se com os objetivos da sustentabilidade aplicados a operações e a manufatura, possibilitando a criação de uma proposta de integração, como simplifica o modelo expresso na Figura 12.

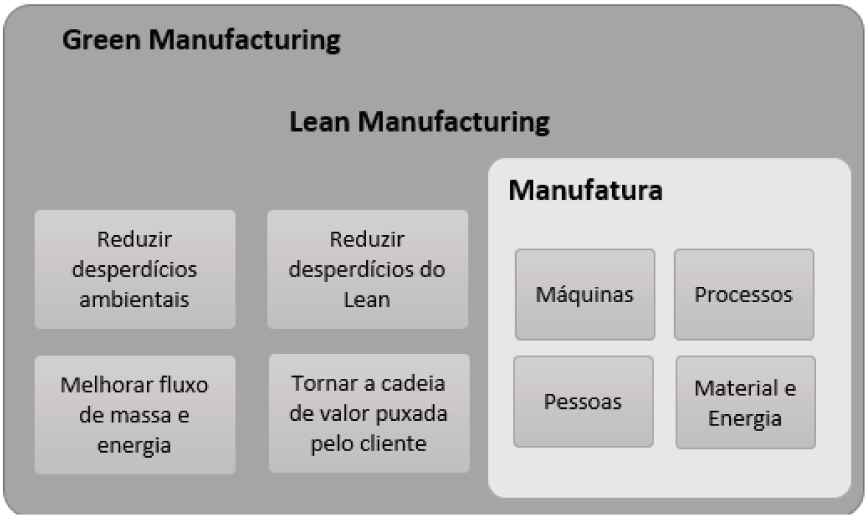


Figura 12 - Integração entre *Lean* e *Green Manufacturing*
Fonte: Adaptado de Pampanelli, Found e Bernardes (2015, p. 142)

Srivastava (2007) resume na Figura 13 a proposta do GrSCM integrado ao *Lean*. As áreas de influência do *Lean* destacam-se em verde e mostram-se como parte importante do segmento de operações.

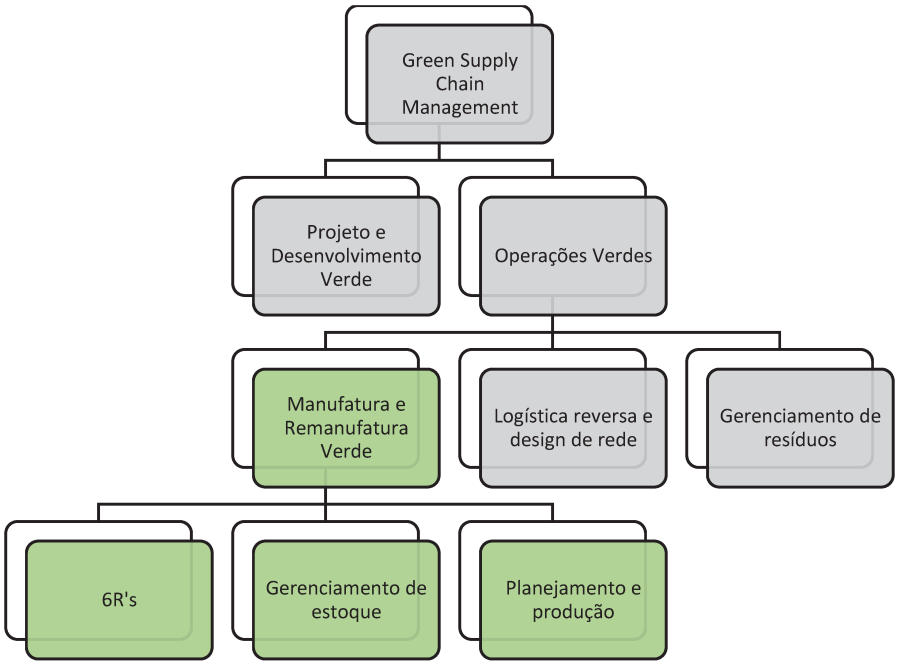


Figura 13 - Desdobramento da *Green Supply Chain Management.*
Fonte: Adaptado de Srivastava (2007, p. 57).

Srivastava (2007) resume na Figura 13 a proposta do GrSCM integrado ao *Lean*. As áreas de influência do *Lean* destacam-se em verde e mostram-se como parte importante do segmento de operações.

1.5 Produção Sustentável

De acordo com Veleva e Ellenbecker (2001) a sustentabilidade apresenta dois principais públicos: os consumidores, para os quais a abordagem está relacionada ao consumo sustentável; e os produtores ou fabricantes, para os quais a abordagem se relaciona com a forma utilizada pelas organizações para fornecimento de bens e serviços. Veleva e Ellenbecker (2001) também relacionam os principais aspectos a serem observados e mensurados para a sustentabilidade da produção, como o uso de recursos como matéria prima, água e energia, geração de resíduos, promoção justiça social e desenvolvimento da comunidade, performance econômica e social.

Krajnc e Glavič (2003) definem uma série de condições necessárias para que a produção possa ser considerada como sustentável, considerando:

- redução de matéria prima e energia nos produtos e na sua produção;
- produção em ciclo fechado para que os resíduos possam ser reutilizados em processo, minimizando o impacto gerado pelo descarte e o consumo de matéria prima;
- minimização do desperdício e da geração de resíduos;
- reuso e reciclagem dos produtos;
- descarte adequado de produtos não recicláveis e resíduos da produção;
- projetar produtos fáceis de reparar, duráveis e adaptáveis;
- minimização as necessidades de transporte;
- utilização de tecnologias e processos limpos ao longo do ciclo de vida dos produtos;
- melhoraria de processos pesquisando e desenvolvendo tecnologias ambientalmente amigáveis;
- consideração do fator social nas decisões.

Lebel, Lorek e Daniel (2014) alegam que a transformação de sistemas de produção tradicionais em sistemas sustentáveis é fundamental para o atingimento dos ODS e que há necessidade de estudos que ofereçam sistemáticas que promovam e facilitem essa migração.

1.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Considerando os diferentes âmbitos de sustentabilidade, um dos grandes desafios é a análise e quantificação da sustentabilidade do produto, do processo e da cadeia. Fiksel *et al*. (1998) resumem as principais dificuldades em identificar e distinguir o que de fato é sustentável em quatro principais fatores:

- Falta de consenso sobre uma definição pragmática de sustentabilidade;
- Amplitude do escopo das questões de sustentabilidade, muitas das quais são de difícil qualificação;
- Grande quantidade de informações necessárias para avaliar a sustentabilidade do produto;
- Dificuldade na quantificação dos aspectos sociais e éticos da sustentabilidade.

Intervindo de forma direta no tema, a ideia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ou *Life Cycle Assessment* (LCA), surge a partir da década de 70 como ferramenta para responder a perguntas como "o produto A é mais sustentável que o B?". Conforme resumem Guinée *et al*. (2011), a evolução do conceito de LCA pode ser dividido em quatro momentos principais: as décadas da concepção do conceito (de 1970 a 1990), a década da padronização (de 1990 a 2000), a década da elaboração (de 2000 a 2010) e a década da avaliação do ciclo de vida (de 2010 a 2020).

As décadas da concepção foram marcadas pelo início da preocupação dos governos, das pessoas e, posteriormente, das companhias com os impactos ambientais gerados pelo consumo (DREYER *et al.*, 2006). Fomentado principalmente pelas discussões envolvendo a preocupação pública com a eficiência energética, controle da poluição e resíduos sólidos, o interesse foi despertado em muitas companhias como a Coca Cola, a Basler & Hoffman e órgãos governamentais como a Agencia Norte Americana de Proteção Ambiental, que começaram a investigar e mensurar o consumo de energia e uso de recursos dos produtos, assim como o controle da emissão de poluentes "do berço ao túmulo" (GUINÉE *et al.*, 2011).

Muitas frentes diferentes passaram a fazer a avaliação do ciclo de vida dos produtos a partir de métodos variados, sem a adoção de uma sistemática padrão, o que impossibilitava a adoção do LCA como uma ferramenta analítica cientificamente aceita (GUINÉE *et al.*, 1993).

Para que se pudesse resolver essa questão da divergência entre os métodos de análise, a década da padronização teve papel fundamental. Ainda de acordo com Guinée *et al.* (2011), o período de 1990 a 2000 foi marcado pela convergência dos padrões entre a *International Organization for Standardization* (ISO) e a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC). Ainda que a individualidade dos processos fosse respeitada e se mantivesse a possibilidade de analisar tipos diferentes, tal alinhamento foi fundamental para a equalização das terminologias e sistemáticas de análise, o que resultou na criação da ISO 14040 - Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura, em 1997 e, posteriormente, das normas de correlacionadas, como a ISO 14041 – Análise de Inventário, ISO 14042 – Avaliação de Impacto, ISO 14043 - Interpretação e a ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações, como demonstra a integração proposta pela Figura 14 contendo as normas, descrições e aplicações diretas.

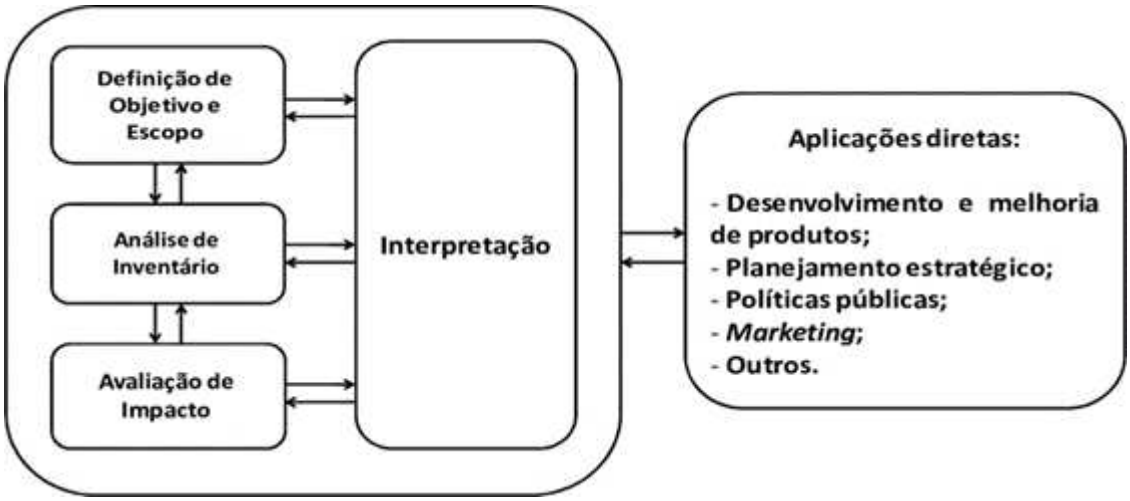


Figura 14 – ACV Estrutura Geral
Fonte: Adaptado de ISO 14040:2009 (2014, p.8)

Para a operacionalização da ACV, conforme resume a ISO 14044 (2006), consideram-se os principais pontos:

- o impacto ecológico das matérias-primas e a energia usada na produção, incluindo a extração, transporte e os resíduos;
- o processo de fabricação e montagem (consumo de energia, consumo de matéria prima, consumo de água, geração de resíduos de processo e controle dos desperdícios gerados);
- os sistemas de transporte e distribuição;

- aspectos ambientais e sociais relacionados com o uso do produto;
- o potencial do produto para ser reutilizado e reciclado;
- os aspectos ambientais relacionados com a disposição final do produto.

Em termos resumidos, Dassisti, Semeraro e Chimenti (2019) elucidam que o objetivo principal da ACV é avaliar a quantidade de recursos necessários e as emissões geradas à partir da produção de determinado produto, correlacionando-se mais diretamente ao pilar Ambiental da sustentabilidade.

Garcia-Muiña *et al.* (2018) propõem então duas análises complementares, chamadas de Custeio do Ciclo de Vida (CCV) e Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV), como mostra a Figura 15:

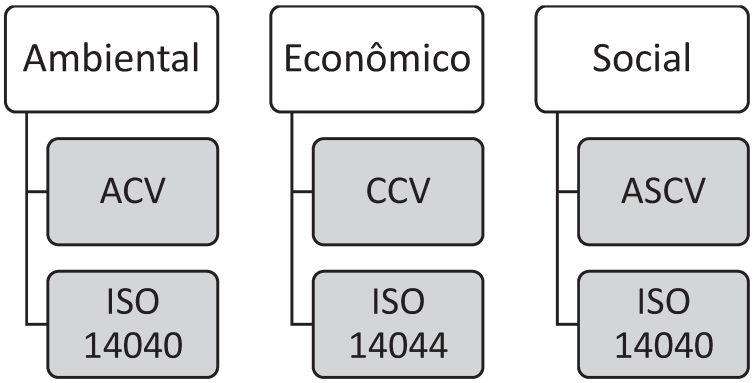


Figura 15 - Integração das análises de ACV às dimensões da sustentabilidade.
Fonte: Elaborado com base em Garcia-Muiña *et al.* (2018)

Assim como há padronização e roteiro proposto para a ACV, tem-se também para o CCV e a ASCV. Woodward (1997) propõe os passos a seguir para a realização da CCV:

1) Definir os elementos de custo (o que se deseja medir, por exemplo: custo com ferramental, custo com ativos necessários para o processo, custo operacional de mão de obra, custo de eletricidade, água e materiais);
2) Definir a estrutura de custo (como integrar os elementos de custo ao longo do ciclo de vida);
3) Estabelecer as relações de estimativa de custo (como captar e medir os elementos de custo);
4) Estabelecer o método de formulação e avaliação do CCV (como agregar os dados dos elementos de custo identificados e medidos ao longo do ciclo de vida).

A ASCV, por fim, foca essencialmente nos aspectos sociais divididos em três classes de interessados: trabalhadores, comunidade local e cadeia de suprimentos (ARCESE *et al*., 2018). Para a análise do ASCV, Paragahawewa, Blackett e Small (2009) sugerem um roteiro seguindo basicamente os mesmos passos da ACV, conforme sugerido pela ISO 14040 e ilustrados na Figura 14: definição dos objetivos, definição do escopo, análise de inventário e análise do Impacto.

Capítulo 2 – Indústria 4.0

Ao longo dos anos, documentam-se eventos históricos em que inovações que se iniciaram nas indústrias transcenderam as paredes das fábricas e atingiram a civilização, apresentando-se como grandes pontos de transformação. A esses marcos na história autores como De Vries (1994), Clark (2014) e Rao (2011) nomeiam Revoluções Industriais (RI).

Conforme resume a Figura 16, desde a máquina a vapor, a mecanização da produção e as grandes ferrovias de 1760 a 1840, passando pela produção em massa e utilização da energia elétrica entre o final do século XIX e início do século XX, e pela utilização de sistemas eletrônicos, Controladores Lógicos Programáveis (CLP), e da tecnologia da informação entre as décadas de 60 e 80, até chegar à internet móvel, a inteligência artificial, o aprendizado de máquina e os ambientes saturados de sensores e conectividade (KAGERMANN; JOHANNES, 2013), as inovações, técnicas e tecnologias que definiram os contornos das quatro revoluções industriais vem se concatenando e modificando não apenas o modo de produção dos bens, mas se caracterizam por iniciarem-se dentro do ambiente industrial e, posteriormente, propagarem-se por toda a civilização (SCHWAB, 2017):

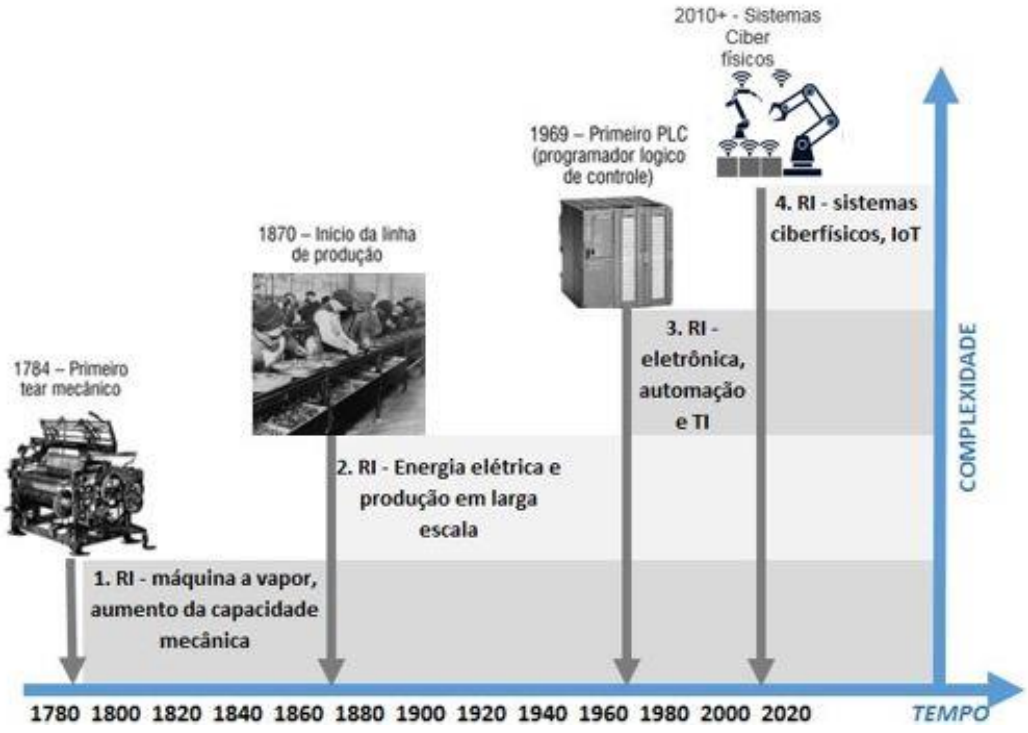


Figura 16 - Revoluções Industriais.
Fonte: Adaptado de Kagermann e Johannes (2013, p.13)

É possível notar que a assimilação da sociedade às contribuições das RI é tão importante que muitas das inovações moldaram a configuração das cidades, criando até mesmo uma relação de dependência entre o padrão de vida e o uso das tecnologias, como por exemplo a mecanização e posterior automação das tarefas, a própria energia elétrica, o uso da TI e, mais recentemente, a internet (CLARK, 2016).

A expansão da internet nos últimos anos pode ser considerada como um dos fatores de maior importância na propagação da nova revolução industrial, visto que é pré-requisito para a utilização da maior parte dos princípios e tecnologias da I4.0 (SCHWAB, 2016). De acordo com o *Internet World Stats* (2019), o número de usuários com conexão à internet aumentou 1.157% nos últimos nos últimos 19 anos e hoje quase 60% de toda a população do planeta possui acesso à internet, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Expansão do acesso à Internet no mundo.

Regiões do Mundo	População 2019 (em milhões)	População (% do mundo)	Usuários de Internet em 30/06/2019	Alcance da Internet (% da pop.)	Crescimento 2000-2019	% Internet Mundial
África	1.320,04	17%	522,81	40%	11481%	12%
Ásia	4.241,97	55%	2.300,47	54%	1913%	51%
Europa	829,17	11%	727,56	88%	592%	16%
América Latina e Caribe	658,35	9%	453,70	69%	2411%	10%
Oriente Médio	258,36	3%	175,50	68%	5243%	4%
América do Norte	366,50	5%	327,57	89%	203%	7%
Oceania / Austrália	41,84	1%	28,64	68%	276%	1%
Total	7.716,22	100%	4.536,25	59%	1157%	100%

Fonte: Elaborado à partir de *Internet World Stats* (2019, s.p.).

Observa-se o crescimento em todos os continentes, principalmente naqueles com maior número de países em desenvolvimento, como a África, Ásia, Oriente Médio, América Latina e Caribe, evidenciando o caráter global da I4.0. Boa parte da expansão experimentada deve-se à popularização de dispositivos móveis, como *smartphones* e *smartwatches*, produtos que a I4.0 trouxe e que rapidamente tomaram seu lugar e criaram um mercado completamente novo (SCHWAB, 2016).

Considerando perceptíveis as mudanças que caracterizam a I4.0, é importante conhecer seus princípios e tecnologias para identificação de possibilidades de aplicação, como apresentar-se-á após a breve contextualização histórica a seguir.

2.1 Evolução Histórica

Apesar do avanço da I4.0 nos últimos anos, a maior parte das empresas ainda não conseguiu atualizar seus parques fabris e tem dificuldades em caracterizar seu nível tecnológico em relação às RI (BAHRIN *et al*., 2016), logo, o conhecimento dos marcos de cada RI é importante para contextualização e auxílio nessa identificação.

Clark (2014) documenta que a história das Revoluções Industriais se inicia no século dezoito, quando pela necessidade de produzir mais rápido e em maior quantidade para atender à crescente demanda gerada pela concentração de pessoas em grandes cidades, a força motriz hídrica, manual ou animal passa a ser substituída por máquinas a vapor, com capacidade e força incomparáveis aos recursos existentes na época. Era a Primeira Revolução Industrial, marcada pelo início da utilização da mecanização da produção que transformaria não somente a indústria de manufatura, mas também os transportes, como as locomotivas a vapor e as grandes embarcações e a forma de obtenção de energia elétrica.

Tão impactante quanto as inovações trazidas pelo primeiro advento, a Segunda RI também trouxe mudanças profundas que influenciaram a melhoria da produtividade e a mudança dos padrões de vida. A fabricação em massa e a disseminação da distribuição da energia elétrica podem ser considerados como grandes transformações que mudaram drasticamente os padrões do início do século XIX (MORRAR; ARMAN; MOUSA, 2017).

A Terceira RI data da década de 80 e tem como destaques a introdução da eletrônica, automação e tecnologia da informação, que também se caracterizam como grandes contribuições à indústria de manufatura e à sociedade (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a).

Bressanelli *et al.* (2018) indica que a I4.0, por sua vez, traz como importantes marcos a digitalização da produção por meio da utilização de princípios e tecnologias como a interoperabilidade, a modularização e a *Internet of Things* (IoT) introduzindo então sistemas ciberfísicos inteligentes (GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2018), como será apresentado na sessão princípios e tecnologias.

2.2 Princípios e Tecnologias da I4.0

Embora não haja unanimidade em relação à classificação das contribuições, a maior parte dos autores da RSL divide as contribuições da I4.0 em categorias diferentes de acordo com o caráter de aplicação: os princípios, que são as contribuições de caráter teórico que direcionam as aplicações práticas; e as tecnologias, que são as contribuições aplicadas na prática, normalmente associadas à equipamentos e sistemas (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

Hermann, Pentek e Otto (2016) definem os princípios como bases de operação da I4.0 sob os quais as tecnologias se sustentam. O Quadro 4 narra os princípios, sua descrição e as respectivas referências na RSL.

Quadro 4 - Princípios da I4.0

Princípio	Descrição	Referências
Interoperabilidade	Capacidade de comunicação entre sistemas distintos, viabilizando a operação entre dispositivos móveis, ERPs e máquinas fabris.	(BARENJI *et al*., 2019); (CARVALHO *et al*., 2018); (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018); (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a); (MARTÍN-GÓMEZ et. al, 2019); (STACHOVÁ *et al*., 2019)
Virtualização	Capacidade de emular e monitorar processos físicos em unidades virtuais.	(BARENJI *et al*., 2019); (CARVALHO *et al*., 2018); (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018); (MAN; STRANDHAGEN, 2017); (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a) (MARTÍN-GÓMEZ et. al, 2019); (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018); (MÜLLER; VOIGT, 2018); (STOCK *et al*., 2018)
Capacidade de tempo real	Capacidade de monitoramento, análise e processamento de grandes quantidades de dados para tomada de decisão autônoma em tempo real.	(BARENJI *et al*., 2019); (CARVALHO *et al*., 2018); (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018); (KAYIKCI, 2018); (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a); (MARTÍN-GÓMEZ et. al, 2019); (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018); (MÜLLER; VOIGT, 2018); (SJÖDIN *et al*., 2018); (STRANDHAGEN *et al*., 2017); (WAIBEL *et al*., 2017)
Descentralização	Divisão de trabalhos em unidades descentralizadas com capacidade para processamento e tomada de decisão autônoma.	(BARENJI *et al*., 2019); (CARVALHO *et al*., 2018) (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018) (KAYIKCI, 2018); (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a); (MARTÍN-GÓMEZ et. al, 2019) (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018); (MÜLLER; VOIGT, 2018)
Modularidade	Capacidade de rápido setup de sistemas para adaptação a alterações nos produtos e demandas da indústria.	(BARENJI *et al*., 2019); (CARVALHO *et al*., 2018) (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018) (KAYIKCI, 2018); (MAN; STRANDHAGEN, 2017) (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a) (MARTÍN-GÓMEZ et. al, 2019) (SJÖDIN *et al*., 2018); (WAIBEL *et al*., 2017)
Orientação à serviço	Direcionamento para função pretendida pelo usuário e não para o produto propriamente dito (ex: Uber, Airbnb, etc.)	(CARVALHO *et al*., 2018); (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018); (KAYIKCI, 2018); (MAN; STRANDHAGEN, 2017) (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a) (SJÖDIN *et al*., 2018); (STRANDHAGEN *et al*., 2017)

Fonte: Elaborado com base na RSL (2019)

Tendo os princípios como base para desenvolvimento, Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018) resumem as tecnologias como as contribuições da I4.0 com aplicação prática em processos ou produtos. O Quadro 5 consolida as principais tecnologias citadas na literatura:

Quadro 5 - Tecnologias da I4.0

Tecnologias	Definição
Cyber Physical Systems (CPS)	União de sistemas físicos e virtuais composta por sensores que fornecem dados para que ação de atuadores nos ambientes em que operam (KAGERMANN *et al*., 2013)
Internet of Things (IoT) Internet of Service (IoS)	Interconexão de dispositivos (*smart things*) através da internet que possibilita interação *machine-to-machine* sem necessidade de intervenção humana. Aplica-se também à serviços (IoS) e dados (IoD). (ANDERL, 2014)
Rastreabilidade	Possibilidade de monitoramento e rastreio do histórico completo do produto, desde a fabricação até o destino final (CESAR, 2017)
Big Data / Analytics	Processo de análise de grandes volumes de dados através do recurso *Analytics*, capaz de identificar padrões e correlações ocultos para auxílio na tomada de decisão (RUSSOM *et al*, 2011)
Dispositivos inteligentes *(Smart Things)* / Fábricas Inteligentes (*Smart Factories)*	Qualquer estrutura ou dispositivo que tenha capacidade de comunicação (através de IoT) e interação com o meio através de sensores e atuadores. Ex: *Smart factory*, *smart products*, *smart buildings* (HERMANN *et al*, 2015)
RFID/NFC/BLUETOOTH	(*Radio Frequency Identification*, ou Identificação de Rádio Frequência): etiquetas ou *tags* utilizadas para identificação, monitoramento, rastreamento e armazenamento de informações em produtos, dispositivos e até mesmo seres vivos (ZHOU e PIRAMUTHU, 2011)
Cloud Computing / Cloud Manufacturing	Serviço de computação com recurso de hardware compartilhado via Internet, oferecendo grande capacidade de processamento ao alcance de qualquer dispositivo conectado (CESAR, 2017)
Manufatura Aditiva	Processo de manufatura com sobreposição de camadas dado a partir de sólidos tridimensionais CAD (ANDERL, 2014)
Blockchain	Estrutura de dados criptografados distribuída, replicada e compartilhada entre os membros de uma rede. Possibilita transações seguras com garantia de rastreabilidade (CASADO-VARA *et al*, 2018)
Simulação e Prototipagem	Utilização de recursos de virtualização para simular processos em modelos digitais antes da aplicação prática (STOCK *et al*., 2018)
Realidade Aumentada	Utilização de sensores de vídeo, marcadores, softwares de processamento e sistemas de projeção para gerar uma visualização mesclando elementos reais e virtuais (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018)
Realidade Virtual	Sistema de imersão sensorial do usuário em um ambiente com elementos unicamente virtuais, fazendo-o sentir como se estivesse numa simulação em primeira pessoa (STRANDHAGEN *et al*., 2017).
Aprendizado de máquina ou *Machine Learning*	Utilização de recursos de programação avançada que permitam que algoritmos aprendam com o usuário e sejam capazes de se modificar e rearranjar de forma autônoma (MOKTADIR *et al*., 2018)
Inteligência Artificial	Capacidade de aprendizado, processamento e tomada de decisão autônoma de algoritmos aplicados à equipamentos ou sistemas (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018)
Robótica colaborativa ou autônoma	Utilização de sistemas robóticos para substituir ou auxiliar seres humanos em atividades domésticas ou industriais (TSAI; LU, 2018)
Redes Elétricas Inteligentes ou *Smart Grids*	As redes elétricas inteligentes, também conhecidas como *smart grids* diferem das redes de energia atuais por serem uma via de mão dupla, ou seja, é possível receber e fornecer energia (BONILLA *et al*., 2018)

Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

2.4 Pré-requisitos e desafios para implantação da I4.0

Discutidos os princípios e tecnologias da I4.0, é importante conhecer os pré-requisitos para implantação, uma vez que a apresentação de novas tecnologias demanda da existência de uma interface de integração com as tecnologias pré-existentes (SJÖDIN *et al*., 2018).

De acordo com Manavalan e Jayakrishna (2019a), uma das principais dificuldades para a implantação da I4.0 é a coexistência de várias fases das RIs num mesmo cenário e, muitas vezes numa mesma empresa. Nessas situações, é comum que a infraestrutura não esteja preparada para receber e operar em conjunto com os princípios e tecnologias da I4.0. Importa então que os principais pré-requisitos sejam identificados para que a digitalização seja viável.

Em relação à migração para a nova revolução industrial, Nagy *et al.* (2018) relacionam os principais fatores que podem impactar a expansão da I4.0 divididos em quatro principais categorias: cultura do mercado, mão de obra, fatores organizacionais e fatores tecnológicos.

Na parte operacional, Waibel *et al.*, (2017) relacionam à segurança dos sistemas, a extensão, velocidade e estabilidade das redes conectadas com internet como como pré-requisitos críticos, assim como a qualificação dos profissionais responsáveis por criar, manter, operar e gerenciar as novas tecnologias e sistemas de produção.

Moktadir *et al.* (2018) elencam os principais desafios para implantação da I4.0, sobre contextos de Países Em Desenvolvimento (PED) e destaca a insegurança de dados, o alto investimento necessário e a falta de estrutura tecnológica como principais barreiras a serem vencidas, como mostra o Quadro 6.

Nesse mesmo sentido, Müller e Voigt (2018) relacionam a falta de capacitação, a disponibilidade de recursos financeiros para investimento, a orientação ao cliente e a visibilidade de futuro como importantes restrições mesmo em países desenvolvidos. Logo, entende-se que há um caminho a ser trilhado em ambos os casos e que estudos direcionados a indicação de modelos de implantação que possam facilitar a implantação são desejáveis (PINZONE *et al.*, 2019).

Quadro 6 - Principais desafios para implantação da I4.0 em países em desenvolvimento.

#	Desafio	Descrição
1	Insegurança de dados	Falta de proteção dos dados de caráter confidenciais em redes cada vez mais conectadas.
2	Alto Investimento	Demanda de alto capital de investimento para implementação dos princípios e tecnologias da I4.0.
3	Falta de estrutura tecnológica	Falta de infraestrutura tecnológica para suportar e implementar os princípios e tecnologias da I4.0.
4	Conexão instável entre companhias	Instabilidade e insegurança entre as conexões entre empresas ao longo da cadeia de suprimentos.
5	Redução da oferta de empregos	A automatização de tarefas pode representar redução da oferta de empregos em indústrias de manufatura, o que impõe barreiras à implantação.
6	Falta de estratégias voltadas a I4.0	Falta de um plano estratégico para implantação da I4.0 nas indústrias.
7	Efeitos ambientais	Possível impacto ambiental por utilizar elevada automatização (consumo de energia e emissões de CO_2).
8	Complexidade na reconfiguração do padrão de produção	Falte de capacidade de reconfigurar o padrão de produção com sucesso após implantação da I4.0.
9	Falta de equipe de gerenciamento qualificada	Falta de profissionais qualificados para planejar, executar e gerenciar novos modelos de negócio baseados em I4.0.
10	Complexidade na integração de TI e a tecnologia de operação	Dificuldade de integração entre recursos e soluções de TI com a tecnologia de operação dos parques fabris atuais.

Fonte: adaptado de Moktadir *et al.* (2018, p. 734).

Capítulo 3 - Indústria de Implantes Ortopédicos

Este capítulo tem como objetivo trazer uma breve apresentação sobre a indústria de implantes ortopédicos, os principais biomateriais e trazer as regulações condicionantes do segmento, aspectos fundamentais para elaboração do *framework* a ser proposto. Além disso, mostra-se também como a introdução de novas tecnologias de fabricação são marcos relevantes, como explicam as próximas sessões.

3.1 Marcos históricos da Indústria Ortopédica

A indústria de fabricação de implantes ortopédicos vem se aperfeiçoando tecnologicamente ao longo dos anos (Quadro 7). Dos primeiros dispositivos metálicos para fixação de fraturas antes do século XVII, passando pela introdução das ligas de titânio na década de 40 até chegar na utilização de compósitos cerâmicos depois da década de 90, a manufatura de próteses ortopédicas passou por importantes marcos, conforme resumem Rocha *et al*. (2010) e Park e Bronzino (2003):

Parte do avanço das pesquisas em relação aos materiais e métodos de fabricação se deve principalmente ao incremento de demanda por implantes ortopédicos. Devido à fatores como a evolução dos tratamentos médicos e a redução da taxa de natalidade, estima-se que nos próximos 30 anos um sexto da população mundial seja formado por pessoas com mais de 65 anos, número três vezes maior do que o atual e equivalente a cerca de 2 bilhões de habitantes (ONU, 2019).

Entendendo esse aumento de demanda e tendo em vista a necessidade da sustentabilidade no contexto da I4.0, a proposta de integração entre esses temas é relevante e considerada como o próximo passo em relação às evoluções mapeadas até então (GHADIMI *et al*., 2019). Para tanto, o conhecimento dos principais biomateriais e o entendimento das restrições regulatórias é importante para melhor conhecimento do segmento, como será apresentado nos próximos tópicos desse capítulo.

Quadro 7 - Marcos na histórico dos implantes ortopédicos

Ano	Pesquisadores	Desenvolvimento
<Séc. XVII	…	Vários dispositivos metálicos para fixar fraturas ósseas (arames e pinos de ouro, prata, etc.);
1860 a 1870	Joseph Lister	Técnicas cirúrgicas assépticas;
1886	H. Hansman	Placas para fixação de ossos em aço revestido a níquel;
1893 a 1912	W. A. Lane	Placas e roscas em aço;
1912	W. D. Sherman	Placas de aço-vanádio; menor concentração de tensões e menor corrosão (Placas de Sherman);
1924	A. A. Zierold	Introdução das *Stellites* (ligas de CoCr);
1926	M. Z. Lange	Introdução do aço inoxidável 18-8 molibdénio;
1926	E. W. Hey-Groves	Rosca de madeira para aplicações em fraturas do colo do fémur;
1931	M. N. Smith-Peterson	Primeiro dispositivo de fixação em aço inoxidável para fraturas do colo do fémur;
1936	C. S. Venable, W. G. Stuck	Introdução do aço inoxidável 19-9;
1938	P. Wiles	Primeira artroplastia total de quadril
1939	J. C. Burch, H. M. Carney	Introdução do Tântalo (Ta);
1946	J. Judet, R. Judet	Primeiro polímero (PMMA) usado na substituição de articulações;
1947	J. Cotton	Introdução de titânio e das suas ligas;
1958	J. Charney	Primeira aplicação de cimento acrílico ósseo na substituição total de quadril;
1960s	Henrick e Graves	Introdução de cerâmicas bioabsorvíveis
1970s	M. Dekker, E. Shobert	Introdução do estudo de aplicações com ligas de Carbono
1980s	Kumar, Murakami e Ohtsuki	Introdução do *Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)*
1990s	Lee e Kim (2017) e Piconi e Portorati (2016)	Introdução de compósitos cerâmicos para fabricação de implantes (alumina / zircônia)

Fonte: Adaptado de Park e Bronzino (2003, p. 8) e Rocha *et al.* (2010, p. 6).

3.2 Biomateriais

Assim como o volume de pacientes e procedimentos, o teor de sucesso das cirurgias ortopédicas também aumentou de forma relevante, principalmente motivado pela evolução dos biomateriais (PARK; BRONZINO, 2003). Williams (1999) define os biomateriais como materiais cujo propósito é avaliar, corrigir ou substituir sistemas biológicos.

Rocha *et al.* (2010) e Enderle e Bronzino (2011) resumem os principais biomateriais, suas aplicações, vantagens e desvantagens no Quadro 8:

Quadro 8 - Principais Biomateriais e suas aplicações

Tipo	Classificação	Principais utilizações	Vantagens	Desvantagens
Metais	Aço Inoxidáveis	Substituição de articulações e fixação de fraturas ósseas.	Dúcteis; resistentes;	Sensíveis à corrosão comparados aos polímeros; Processamento difícil; Módulo de elasticidade elevado quando comparado com o osso;
	Ti e ligas de Ti	Substituição de articulações e implantes dentários.		
	Ligas CoCr	Substituição de articulações e fixação de fraturas ósseas.		
Polímeros	Poliéster	Suturas bioabsorvíveis e fixação de fraturas.	Facilidade de processamento;	Pouca resistência;
	Polietileno (UHMWPE)	Implantes de quadril e joelho, tendões e ligamentos artificiais.		
	PMMA	Cimento cirúrgico e espaçadores		
Cerâmicos e compósitos	Óxido de alumínio	Implantes de quadril (especialmente insertos acetabulares e cabeças femorais), implantes dentários	Elevada bio-compatibilidade; Inertes Elevada resistência à corrosão	Processamento difícil; Fragilidade devido à alta dureza
	Fosfato de cálcio	Substitutos de enxertos ósseos, revestimentos superficiais na substituição de articulações		
	Carbono	Substituição de articulações e fixação de fraturas ósseas.		
	Zircônia	Implantes de quadril (especialmente insertos acetabulares e cabeças femorais).		

Fonte: Elaborado com base em Rocha *et al.* (2010) e Enderle e Bronzino (2011).

Das ligas evidenciadas no Quadro 8, Davis (2003) destaca as ligas metálicas como mais relevantes devido ao custo, propriedades e diversidade de possibilidades de aplicação. Dentre esses, as ligas de CrCo e de Titânio destacam-se especialmente pelas propriedades de resistência à corrosão em ambientes extremamente agressivos, como o corpo humano e seus fluidos, sendo consideradas então como as principais matérias primas para o segmento.

Conhecidas as tendências de mercado e a necessidade de apresentar formas sustentáveis de acompanhar a evolução do mercado, entende-se que há demanda de análise sobre a possibilidade de novas formas de processamento dos materiais para que se possa garantir o desenvolvimento sustentável do segmento.

3.3 Regulações

Assim como os segmentos mais tradicionais da indústria o segmento ortopédico tem as suas próprias padronizações e regulações de ordem normativa e sanitária. Inicialmente, os fabricantes utilizavam a ISO 9001 como orientadora para padronização do sistema de gestão, mas a partir de 2003 surgia a primeira norma de padronização mundial voltada para dispositivos médicos, a ISO 13485:2003 - Dispositivos Médicos - Sistema de Gestão da Qualidade. Requisitos para propostas regulatórias. A norma abordava com mais ênfase os tópicos de segurança, responsabilidade, gestão de risco e rastreabilidade (RAZAK *et al*., 2009), considerados como requisitos fundamentais para a indústria de fabricação de próteses ortopédicas.

Quanto à regulação de ordem sanitária, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é o órgão responsável pela regulação dos dispositivos para saúde e seus fabricantes no Brasil. O anuente utiliza de Resoluções da Diretoria Colegiada (RDC) para delimitar os contornos dos processos e produtos a fim de garantir a segurança da aplicação, como a RDC 16:2013 que norteia as Boas Práticas de Fabricação para os fabricantes do segmento e a RDC 185/01 que divide os produtos por grau de risco. Consideram-se classe I e II os instrumentais e demais materiais que entrem em contato com o paciente, mas que não tem a função de ser implantes permanentes, como fixadores para trauma (BRASIL, 2001).

Ainda de acordo com o Anexo II da RDC 185/01, todos os implantes ortopédicos se enquadram nas classes de risco III ou IV. Os implantes metálicos são considerados de alto risco intrínseco (classe III) de acordo com esta classificação. Já os implantes absorvíveis, como os de origem animal ou aqueles que estejam impregnados com substância terapêutica ou absorvível são considerados de máximo risco (classe IV) (BRASIL, 2001). As restrições e controles exigidos para as classes I e II são mais brandos se comparados às classes III e IV, mas consideram-se como principais requisitos para ambos, semelhante à ISO 13485:2003: a rastreabilidade, o controle dos processos internos e dos fornecedores ao longo da cadeia de suprimentos e a garantia de atendimento às especificações que constam no projeto e nos estudos clínicos elaborados para registro dos produtos.

Capítulo 4 - Indústria 4.0 e Sustentabilidade

Os capítulos anteriores trataram de conceituar e contextualizar historicamente a sustentabilidade e a I4.0. Este capítulo trata da integração entre I4.0 e sustentabilidade com base nas contribuições dos artigos da RSL.

Para tanto, inicialmente, realizou se uma análise bibliométrica dos resultados, em seguida, as principais contribuições individuais de cada artigo foram resumidas e, posteriormente, agrupadas em tópicos conforme os *clusters* de pesquisa. Os estudos dividem-se essencialmente em três principais *clusters*: análise da contribuição dos princípios e tecnologias à sustentabilidade, propostas de frameworks de integração e análises de riscos e oportunidades, como definidos nos próximos tópicos:

1) Análise Bibliométrica dos artigos
2) Resumo das contribuições por artigo
3) Análise da contribuição dos princípios e tecnologias à sustentabilidade;
4) Propostas de *frameworks* de Integração;
5) Análises de Riscos e oportunidades;

Os *frameworks* já existentes, bem como as análises de riscos e oportunidades serão utilizados na composição do *framework* para integração a ser testado no estudo de caso, conforme propostas de objetivo do presente trabalho.

4.1 Análise Bibliométrica dos Resultados

Nesta sessão apresentam-se os resultados obtidos a partir da análise bibliométrica dos artigos da RSL a fim de compreender as características dos artigos selecionados. Os 36 artigos foram analisados quanto ao ano de publicação, autores e revistas com mais publicações, ocorrência de palavras-chave, número de contribuições por país, classificação metodológica das pesquisas e distribuição dos segmentos de negócio.

A análise de publicações por ano aponta um crescente número de artigos que têm palavras-chave relativas aos dois grandes temas de estudo, sustentabilidade e I4.0, conforme evidencia a Figura 17. Considerando o início da I4.0 em 2011, o prazo de cinco anos até a publicação do primeiro artigo integrando-a com a sustentabilidade é relativamente curto, logo, estima-se que a velocidade de propagação desses estudos siga aumentando com o

amadurecimento do conhecimento sobre o tema. A apuração do ano de 2019 foi realizada até agosto, data da realização da RSL.

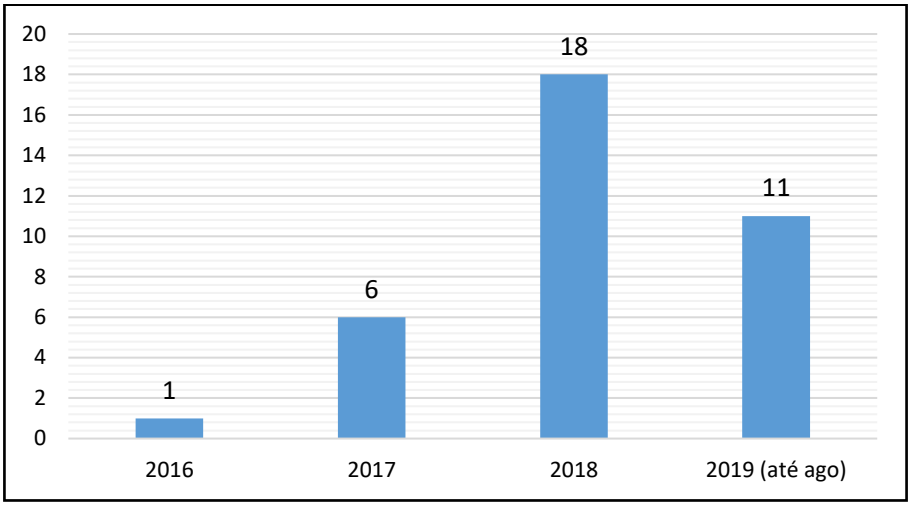


Figura 17 - Artigos publicados por ano que contêm os temas de I.4.0 e sustentabilidade.
Fonte: Elaborado com base na RSL (2019).

A Figura 18 mostra os autores com maior número de publicações, destacando K.I. Voigt e J.M. Müller, com quatro publicações cada, como pesquisadores de maior participação entre os estudos mais referenciados na área. Ambos são de nacionalidade alemã, berço da I4.0, e trabalham em universidades e centros de pesquisa germânicos, com a Universidade de Nuremberg.

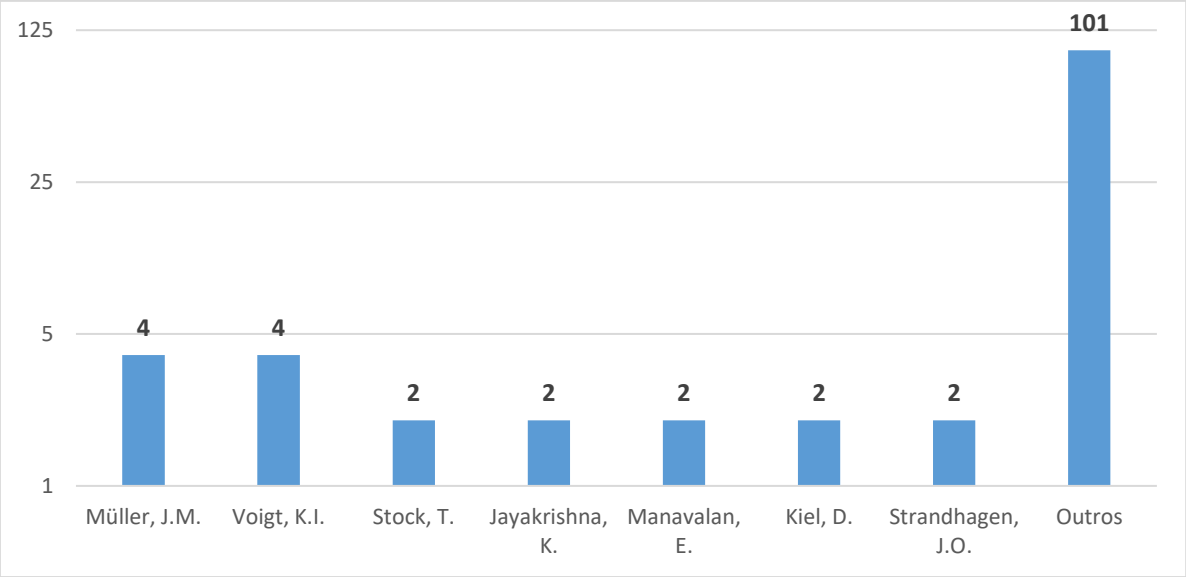


Figura 18 - Autores com mais publicações sobre I4.0 e Sustentabilidade entre 2014 e 2019.
Fonte: Elaborado a partir da RLS (2019)

A Figura 19 evidencia as coautorias com maior número de artigos publicados no período abordado na RSL, diferenciando por tamanho (quanto maior, mais artigos publicados), e por ano, conforme escala de cor destacada na legenda. As conexões são formadas por vínculo institucional, como J.W. Veile e K.I. Voigt, vinculados à Universidade de Nuremberg ou por grupos de pesquisa formados para trabalhos específicos sobre sustentabilidade e I4.0, como J.M. Müller e D. Kiel.

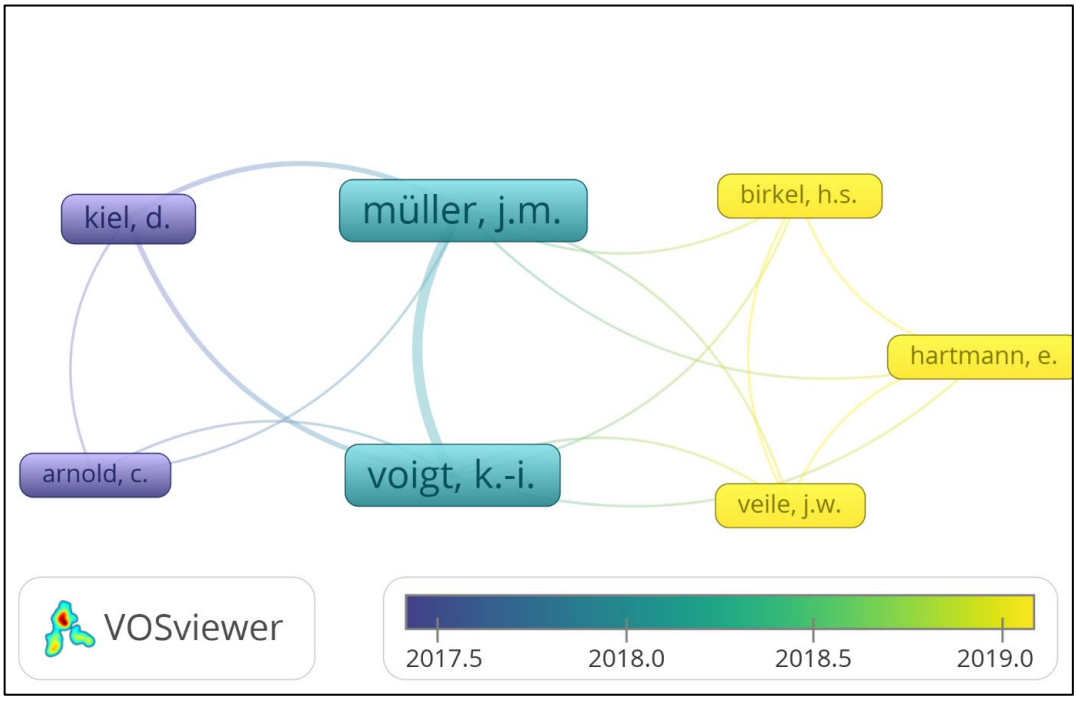


Figura 19 - Coautoria dos artigos da RLS.
Fonte: Elaborado a partir da RLS (2019) utilizando VOSViewer.

A análise de publicações por revista evidencia a *Sustainability*, revista suíça *open source* dedicada à sustentabilidade, como maior publicadora de artigos correlacionando sustentabilidade com I4.0, contabilizando oito artigos entre 2011 e 2019, cerca de 20% do total dos artigos da RLS. *Procedia Manufacturing* e *Process Safety and Environmental Protection* ficam logo a seguir com cinco publicações cada no período apurado, conforme demonstra a Figura 20. As três primeiras revistas concentram metade dos artigos publicados.

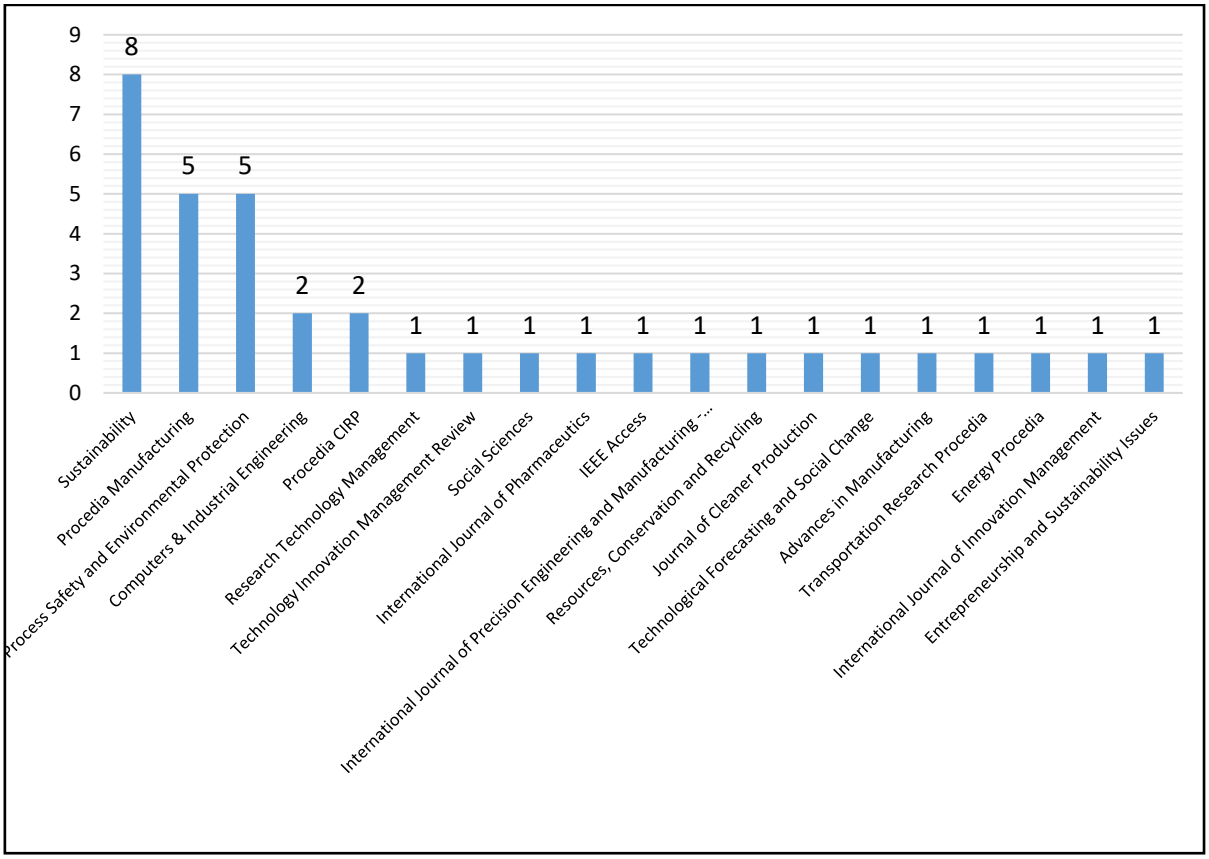


Figura 20 - Publicações por revista contendo as palavras chave I4.0 e Sustentabilidade.
Fonte: Elaboração a partir da RSL (2019).

A incidência das palavra-chave também é um indicador interessante para o direcionamento e identificação de oportunidades de pesquisa (Figura 21). Para análise dos resultados foram destacadas as palavras-chave com mais de três ocorrências. Quinze termos se enquadraram nesse critério, totalizando 131 ocorrências de um total de 388, representando pouco mais de um terço das palavras-chave contabilizadas. Destacam-se "*Industry 4.0*", "*Sustainability*", "*Internet of Things (IoT)*", "*Sustainable Development*" e "*Small And Medium-Sized Enterprises*" como as principais palavras-chave. A presença do termo "*Small And Medium-Sized Enterprises*" mostra que muitos dos artigos oferecem possibilidades de aplicação da I4.0 direcionadas à pequenas e médias empresas, possibilitando a esse tipo de organização a utilização de princípios e tecnologias da nova RI.

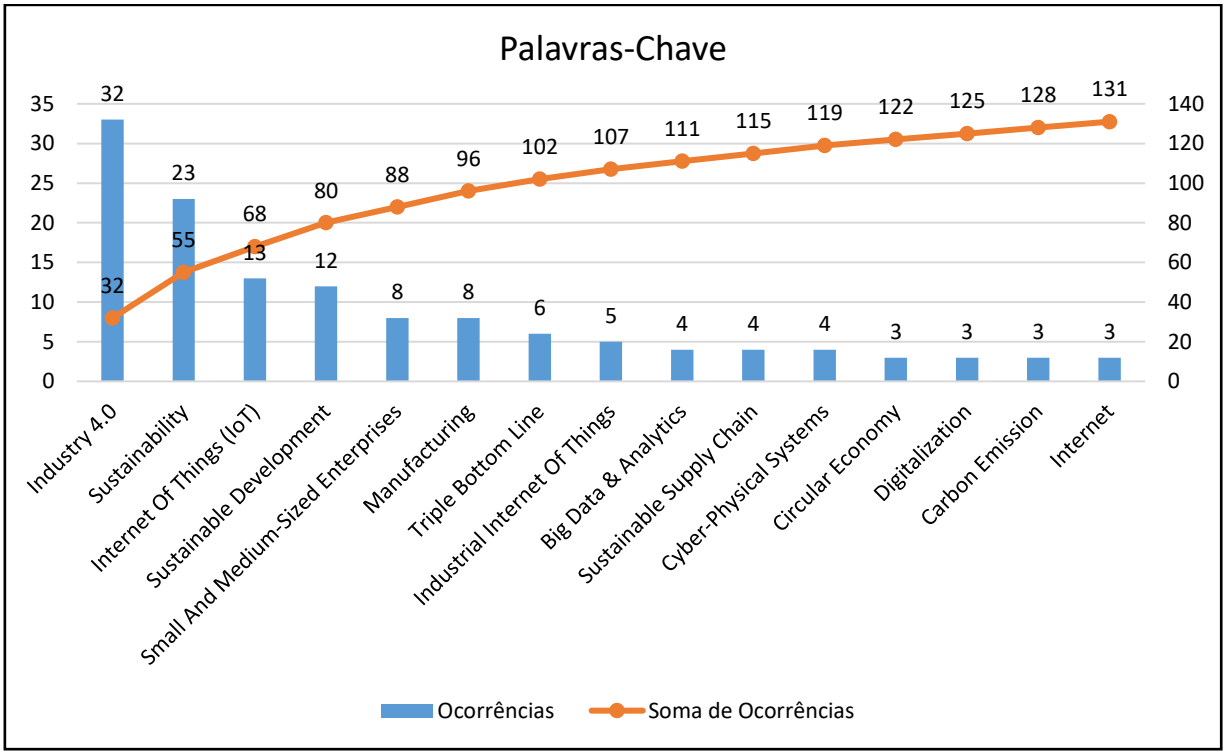


Figura 21 - Palavras-chave mais utilizadas nos artigos da RLS.
Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019)

Tão importante quanto a contagem das palavras chave é a verificação da correlação entre elas. Através do arquivo RIS gerado pelo software *Mendeley* contendo os 36 artigos selecionados para a RSL, o software *VOSViewer* foi utilizado para análise de correlação e agrupamento das palavras-chave, conforme expressa a Figura 22. Os *clusters* de pesquisa podem ser observados pelo agrupamento dos termos e cores, quanto mais próxima a tonalidade da cor, mais forte a correlação. O tamanho dos círculos representa o número de ocorrências de determinada palavra-chave. Nota-se que as palavras destacadas como mais frequentes na Figura 21 aparecem na Figura 22 acompanhadas dos maiores círculos e do maior número de linhas ligando-as com os demais termos: *Industry 4.0*, *Sustainability*, *Internet of Things* e *Sustainable Development*.

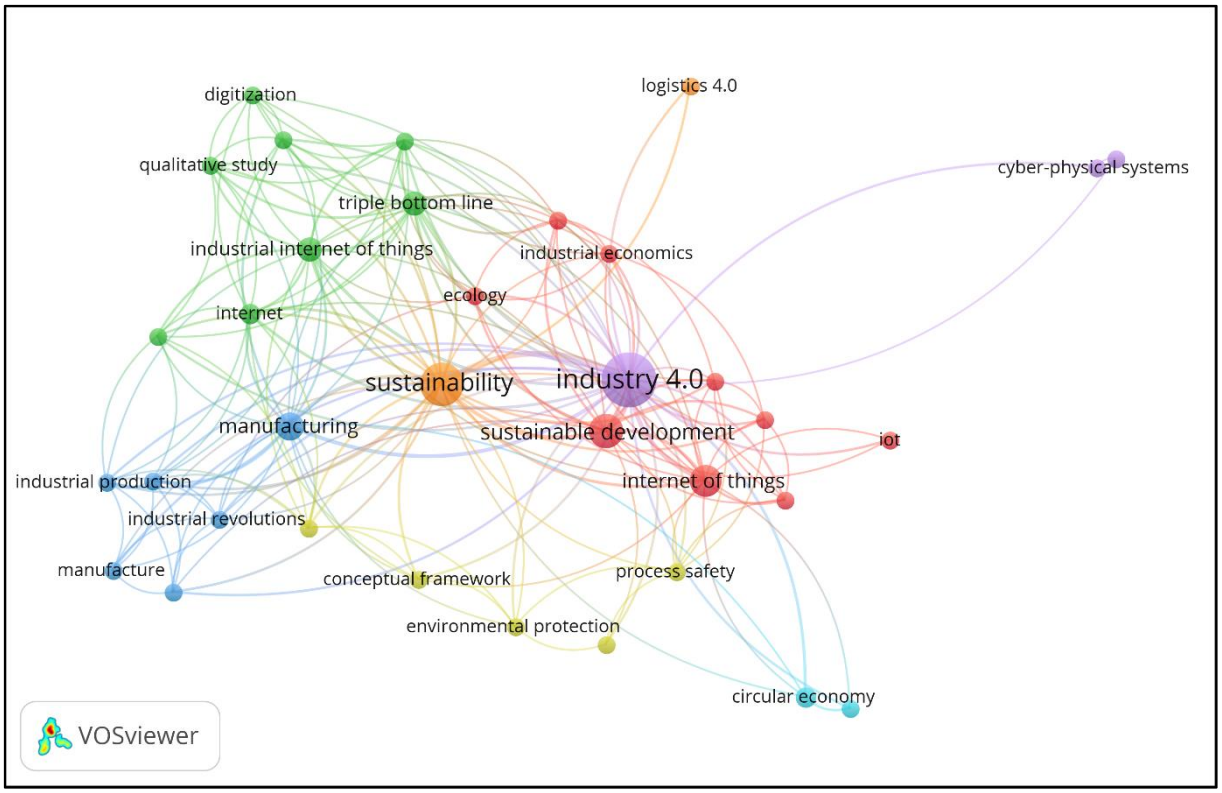


Figura 22 – Interligação entre as palavras-chave mais utilizadas.
Fonte: Elaborado a partir da RLS (2019) utilizando VOSViewer.

Ao selecionar uma palavra-chave desejada o software destaca todos os demais termos utilizados em conjunto desenhando entre eles uma linha cuja espessura varia de acordo com o número de ocorrências. Quanto maior a frequência da ocorrência dos termos relacionados em um mesmo artigo, maior a espessura da linha. O recurso foi utilizado para destacar as correlações entre os principais termos utilizados para delimitar as buscas no protocolo da RSL, *Industry 4.0* e *Sustainability*.

O termo *Industry 4.0* se correlaciona com todos os *clusters* formados, destacando-se os principais termos *Internet of Things*, *Sustainable Development*, *Sustainability* e *Manufacturing*, como mostra a Figura 23.

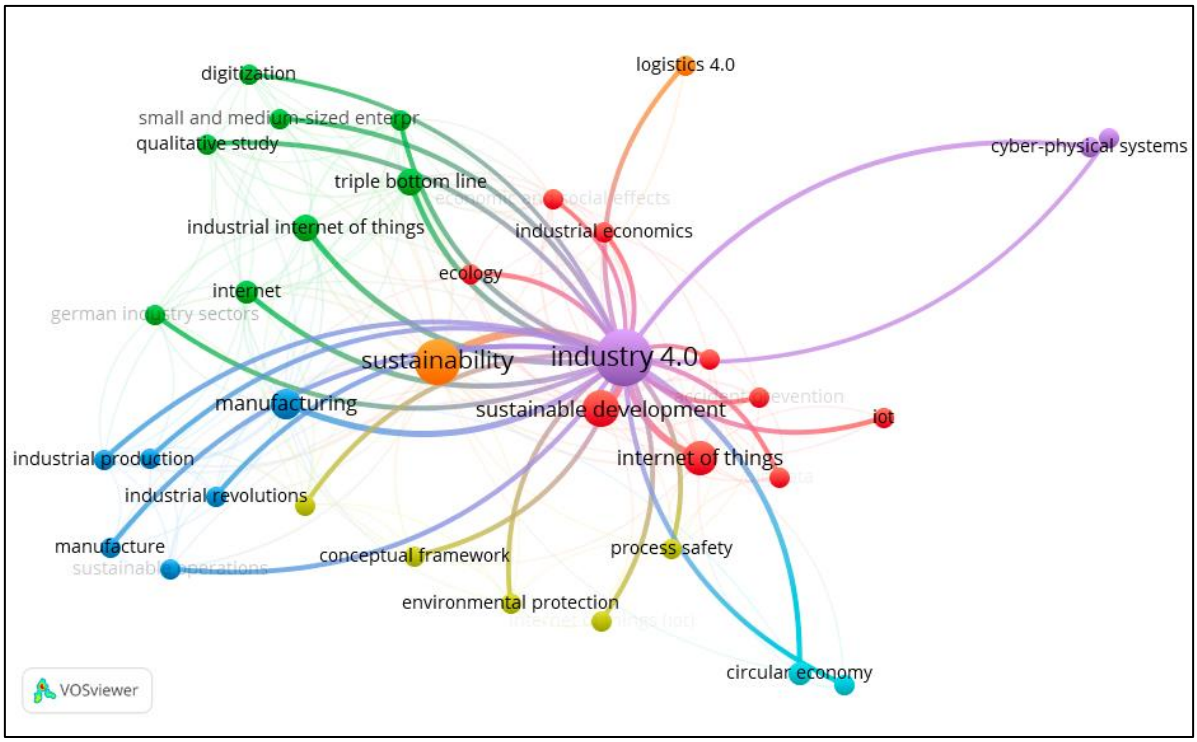


Figura 23 - Correlação entre I4.0 e demais palavras-chave.
Fonte: Elaborado a partir da RLS (2019) utilizando VOSViewer.

O termo *Sustainability* também está relacionado com todos os clusters formados com os mesmos destaques obtidos com a seleção do termo *Industry 4.0*, como se observa na Figura 24. A forma com que se dão as relações entre sustentabilidade e indústria 4.0 serão abordadas individualmente na sequência.

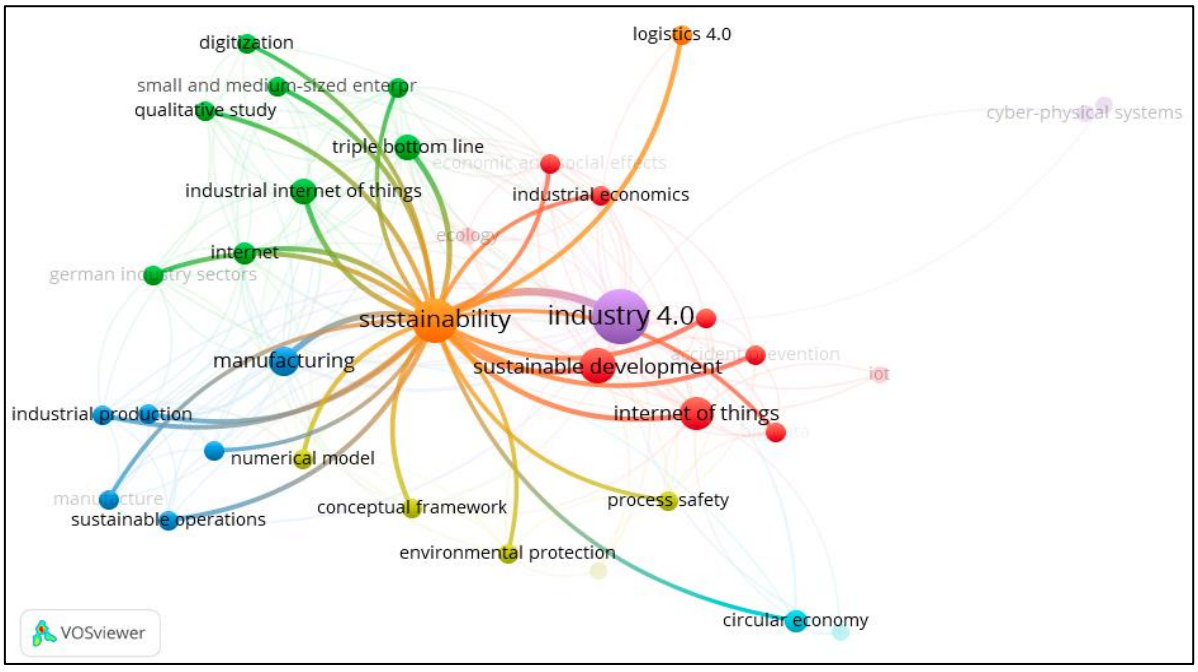


Figura 24 - Correlação entre *Sustainability* e demais palavras-chave.
Fonte: Elaborado a partir da RLS (2019) utilizando VOSViewer.

A análise de contribuições por país foi feita de duas formas: considerando o país de filiação do centro de pesquisa do principal autor de cada artigo; e considerando o país de origem da instituição de filiação de todos os autores de cada artigo. A primeira análise evidencia a Alemanha, nação onde se originou o termo e precursora dos estudos da I4.0, como líder no ranking, com 7 publicações, totalizando aproximadamente 20% dos artigos selecionados, seguida por Espanha, Turquia, Brasil e Índia, todos com três artigos cada, como mostra a Figura 25.

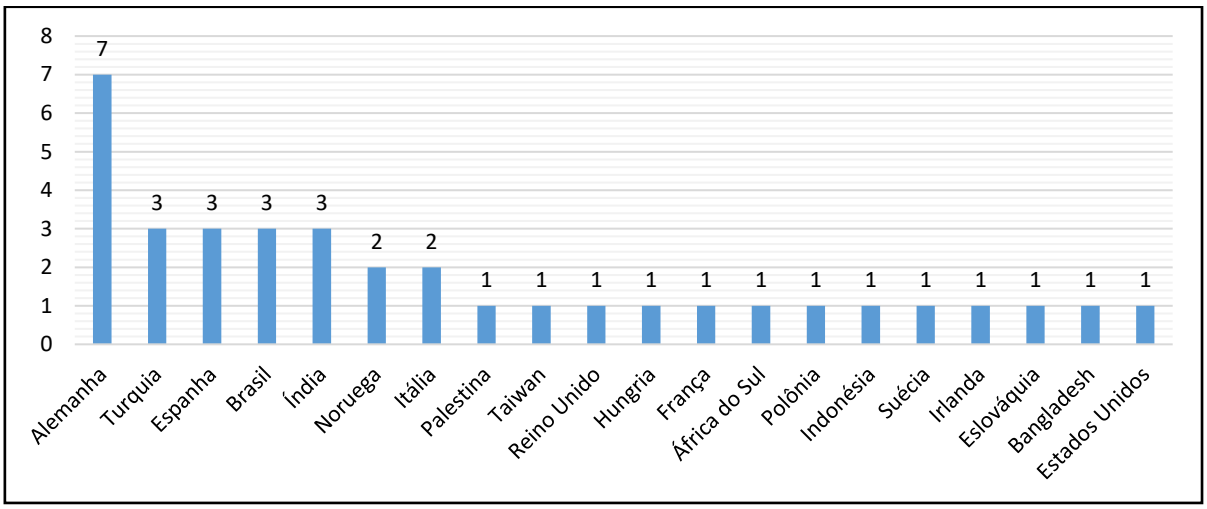


Figura 25 - Contribuições por país considerando o principal autor de cada artigo.
Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019)

A segunda análise, considerando a filiação de todos os autores, mantém a Alemanha em primeiro lugar, com 21 contribuições, mas traz o Brasil para a segunda colocação, com 12 participações, como ilustrado na Figura 26. Essa mudança ocorreu principalmente pela média mais elevada do número de autores nos três artigos cujo autor principal é filiado à alguma instituição de pesquisa do Brasil (4,0) frente a média geral dos artigos selecionados (3,0).

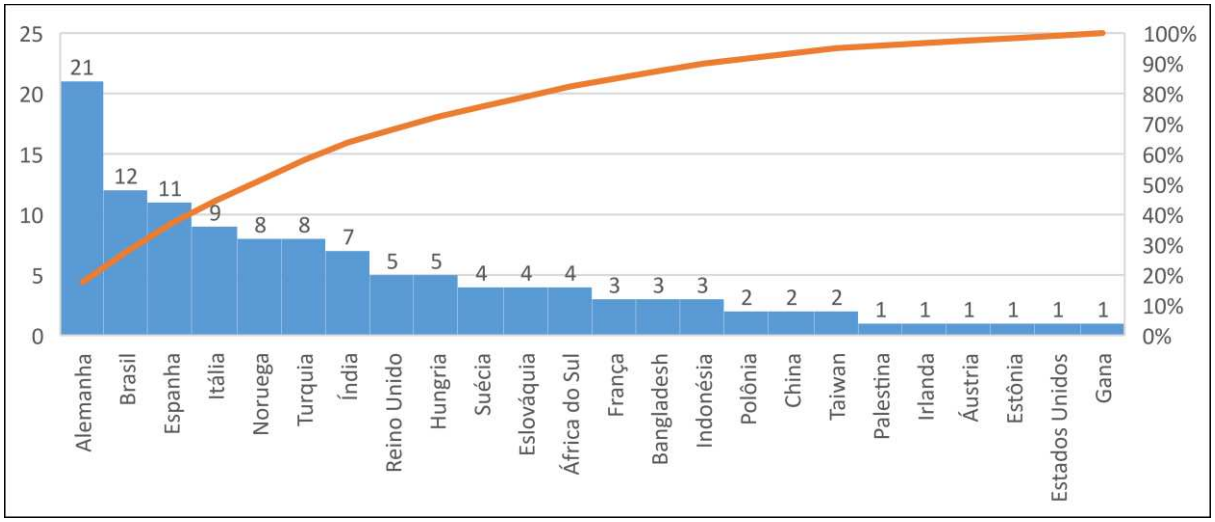


Figura 26 - Contribuições por país de todos os autores.
Fonte: Elaborado a partir da RSL.

Na Figura 27, é possível observar a expansão da pesquisa ao redor do mundo pela presença de estudos e contribuições advindas de todos os continentes. Estima-se que a identificação de um único artigo nos EUA se deva a utilização pelos pesquisadores norte-americanos de palavras-chave diferentes das utilizadas na busca da RLS.

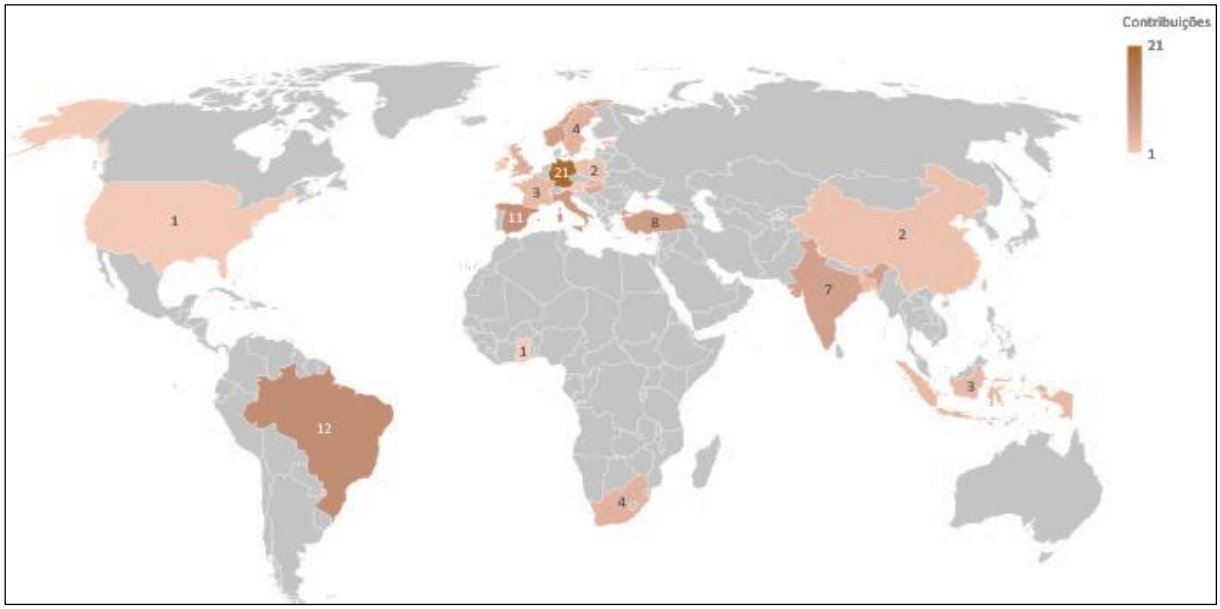


Figura 27 - Mapa de contribuições por país.
Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

O Quadro 9 mostra a abordagem e o tipo de técnica utilizada em cada pesquisa. Classificaram-se como conceituais os artigos que continham revisões de literatura, bibliometrias e propostas de *framework* sem evidências de pesquisa empírica. A numeração dos artigos foi feita respeitando a ordem alfabética dos títulos.

Quadro 9 - Enquadramento metodológico dos artigos da RSL.

#	Autores	Abordagem	Tipo de Pesquisa
1	(TSAI; LU, 2018)	Quantitativa	Estudo de Caso
2	(MARTÍN-GÓMEZ et. al, 2019)	Quantitativa	Estudo de Caso
3	(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019b)	Qualitativa	Conceitual
4	(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a)	Qualitativa	Estudo de Caso
5	(YAZDI; AZIZI; HASHEMIPOUR, 2018)	Quantitativa	Pesquisa Experimental
6	(MAN; STRANDHAGEN, 2017)	Qualitativa	Conceitual
7	(MOKTADIR *et al*., 2018)	Quantitativa	Estudo de Caso
8	(TUMELERO; SBRAGIA; EVANS, 2019)	Quantitativa	*Survey*
9	(BARENJI *et al*., 2019)	Quantitativa	Estudo de Caso
10	(BIRKEL *et al*., 2019)	Qualitativa	*Survey*
11	(LUTHRA; MANGLA, 2018)	Qualitativa	*Survey*
12	(BRESSANELLI *et al*., 2018)	Qualitativa	Estudo de Caso
13	(STACHOVÁ *et al*., 2019)	Qualitativa	*Survey*
14	(DASSISTI; SEMERARO; CHIMENTI, 2019)	Quantitativa	Estudo de Caso
15	(TORBACKI; KIJEWSKA, 2019)	Quantitativa	*Survey*
16	(BONILLA *et al*., 2018)	Qualitativa	*Survey*
17	(STOCK *et al*., 2018)	Qualitativa	Conceitual
18	(HIDAYATNO; DESTYANTO; HULU, 2019).	Qualitativa	Conceitual
19	(GHADIMI *et al*., 2019)	Quantitativa	Estudo de Caso
20	(WAIBEL *et al*., 2017)	Qualitativa	Conceitual
21	(GARRIDO-HIDALGO *et al*., 2018)	Quantitativa	Estudo de Caso
22	(STRANDHAGEN *et al*., 2017)	Qualitativa	Conceitual
23	(CARVALHO *et al*., 2018)	Qualitativa	Conceitual
24	(PRAUSE; ATARI, 2017)	Qualitativa	Estudo de Caso
25	(STOCK; SELIGER, 2016)	Qualitativa	Estudo de Caso
26	(DING, 2018)	Qualitativa	Conceitual
27	(SJÖDIN *et al*., 2018b)	Qualitativa	Estudo de Caso
28	(KAYIKCI, 2018)	Qualitativa	*Survey*
29	(MÜLLER; VOIGT, 2018)	Qualitativa	*Survey*
30	(KIEL *et al*., 2017)	Qualitativa	*Survey*
31	(KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018)	Qualitativa	Conceitual
32	(MORRAR; ARMAN; MOUSA, 2017)	Qualitativa	Conceitual
33	(GARCIA-MUIÑA *et al*., 2018)	Qualitativa	Estudo de Caso
34	(NAGY *et al*., 2018)	Qualitativa	*Survey*
35	(MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018)	Quantitativa	*Survey*
36	(DE SOUSA JABBOUR *et al*., 2018)	Qualitativa	Conceitual

Fonte: Elaborado a partir dos artigos da RSL (2019).

Nota-se na Figura 28 que 69% dos artigos são de abordagem qualitativa, o que pode se explicar pelo pouco tempo desde o surgimento da I4.0, logo, há mais artigos que propõem modelos e correlações do que estudos que quantificam essas análises, evidenciando possíveis lacunas de aplicação para pesquisa. Considerando o contexto de fase de implantação pelas empresas, pode-se supor que ainda não há dados empíricos suficientes e confiáveis para se fazer uma formalizar resultados e impactos.

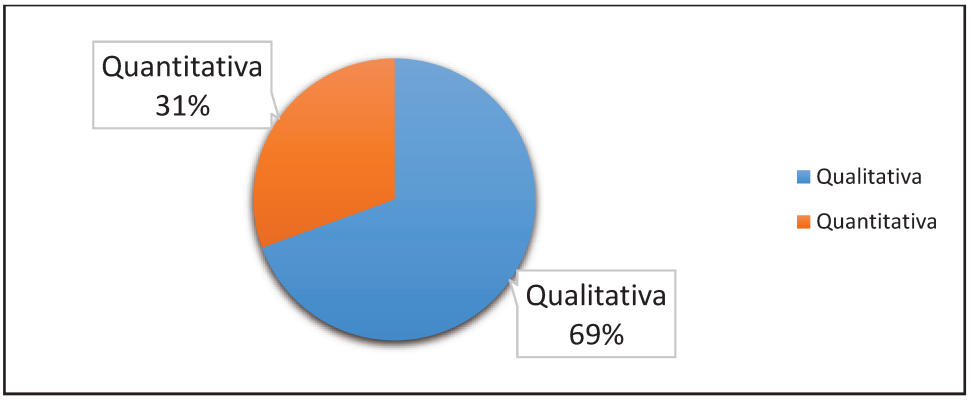


Figura 28 - Abordagem dos artigos.
Fonte: Elaborado a partir da RSL.

A análise por técnica de pesquisa da Figura 29 mostra o estudo de caso como técnica mais recorrente. Essa opção ajuda o pesquisador a enxergar, mesmo que qualitativamente, as possibilidades de aplicação e as expectativas de ganhos com foco em um segmento de aplicação. Seguem em segundo e terceiro estudos conceituais e *surveys* e por último, apenas um artigo de pesquisa experimental.

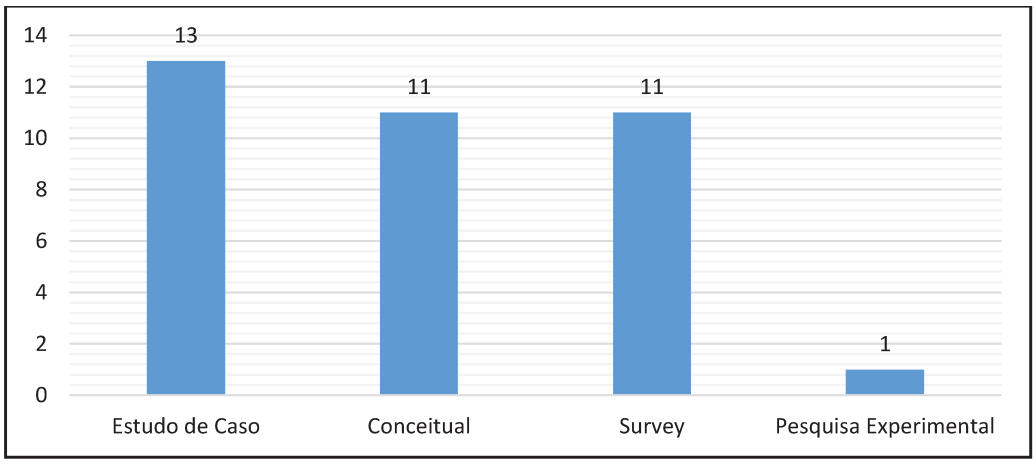


Figura 29 - Distribuição por técnica de pesquisa.
Fonte: Elaborado a partir da RSL

O Quadro 10 traz os segmentos de negócio de aplicação de cada artigo da RSL, juntamente com o país onde a pesquisa ou *survey* foi realizada. Alguns artigos possuem mais de um local de estudo, como Müller e Voigt (2018) e Sjödin *et al.* (2018).

Quadro 10 - Segmentos de aplicação dos artigos da RSL

Segmento	**País de Aplicação**
Indústria e Serviços em geral	**12 artigos**
(BONILLA *et al*., 2018)	Brasil
(CARVALHO *et al*., 2018)	Brasil
(DE SOUSA JABBOUR *et al*., 2018)	França
(KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018)	Índia
(KIEL *et al*., 2017)	Alemanha
(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a)	Índia
(MORRAR; ARMAN; MOUSA, 2017)	Reino Unido
(NAGY *et al*., 2018)	Hungria
(STOCK *et al*., 2018)	Alemanha
(STRANDHAGEN *et al*., 2017)	Noruega
(TORBACKI; KIJEWSKA, 2019)	Polônia
(WAIBEL *et al*., 2017)	África do Sul
Indústria de Manufatura	**7 artigos**
(BIRKEL *et al*., 2019)	Alemanha
(HIDAYATNO; DESTYANTO; HULU, 2019).	Indonésia
(LUTHRA; MANGLA, 2018)	Índia
(MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018)	Alemanha
(MÜLLER; VOIGT, 2018)	China e Alemanha
(PRAUSE; ATARI, 2017)	Estônia
(STACHOVÁ *et al*., 2019)	Eslováquia
Indústria Farmacêutica	**2 artigos**
(BARENJI *et al*., 2019)	Turquia
(DING, 2018)	Reino Unido
Indústria de manufatura cerâmica	**1 artigo**
(GARCIA-MUIÑA *et al*., 2018)	Itália
Processo de Fabricação de Mobília Urbana (bancos de praça, lixeiras...)	**1 artigo**
(MARTÍN-GÓMEZ *et al.*, 2019)	Espanha
Indústria Automotiva	**1 artigo**
(SJÖDIN *et al*., 2018)	Suécia, Brasil e Alemanha
Indústria de Couro	**1 artigo**
(MOKTADIR *et al*., 2018)	Bangladesh
Empresa de Varejo de Eletrodomésticos	**1 artigo**
(BRESSANELLI *et al*., 2018)	Itália
Indústria de Equipamentos Médicos	**1 artigo**
(GHADIMI *et al*., 2019)	Irlanda
Indústria de Manufatura de Computadores e Componentes elétricos e eletrônicos	**1 artigo**
(TUMELERO; SBRAGIA; EVANS, 2019)	Reino Unido
Indústria em Geral e Aplicações Domésticas	**1 artigo**
(MAN; STRANDHAGEN, 2017)	Noruega

Quadro 10 - Segmentos de aplicação dos artigos da RSL - Continuação

Segmento	**País de Aplicação**
Indústria de acessórios de construção civil (portas, janelas, maçanetas, etc.)	**1 artigo**
(DASSISTI; SEMERARO; CHIMENTI, 2019)	Itália
Laboratório de Manufatura Sustentável na Alemanha	**1 artigo**
(STOCK; SELIGER, 2016)	Alemanha
Indústria de Fabricação de Papel	**1 artigo**
(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019b)	Índia
Linha de Produção (simulação)	**1 artigo**
(YAZDI; AZIZI; HASHEMIPOUR, 2018)	Turquia
Indústria de Fabricação de Pneus	**1 artigo**
(TSAI; LU, 2018)	Taiwan
Empresa de TI	**1 artigo**
(GARRIDO-HIDALGO *et al*., 2018)	Espanha
Indústria de Logística e Transporte	**1 artigo**
(KAYIKCI, 2018)	Turquia

Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

Nota-se que 33% dos artigos tem aplicação mais genérica, apresentando aplicabilidade para Indústria e Serviços em Geral, seguida de aplicações para indústria de manufatura em geral e, posteriormente, pelos segmentos farmacêuticos, cerâmicos, automotivos e os demais. O segmento de equipamentos médicos, abordado no presente estudo, conta com apenas uma ocorrência representada por Ghadimi *et al.* (2019), reforçando a necessidade de pesquisa na área.

4.2 Resumo das contribuições por artigo

Inicialmente, para a análise das contribuições foi elaborado uma síntese sobre as contribuições de cada artigo com base. O Quadro 11 contém o resumo da contribuição de cada artigo, destacando os autores e ano de publicação:

Quadro 11 - Contribuições dos artigos da RSL

#	Referência	Contribuições
1	(TSAI; LU, 2018)	Comprovação de ganho financeiro e sustentável (redução de emissões de CO_2) utilizando um modelo matemático para planejamento e controle da produção utilizando princípios e tecnologias da I4.0 para obtenção de informações para suporte à tomada de decisão em tempo real, evitando desperdícios e aumentando a eficiência dos processos.
2	(MARTÍN-GÓMEZ *et al.*, 2019)	Proposta de sistemática para gerenciamento de uma cadeia de suprimentos adaptativa, integrada e sustável, ou *Adaptative and Integrated Sustainable Supply Chain Management* (*AISSCM*) baseado num modelo holônico que utiliza recursos da I4.0 para analisar a ciclicidade de uma família de produtos específica e viabilizar a prática da economia circular.
3	(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019a)	Proposta de *framework* para aplicação da I4.0 em cinco perspectivas principais: negócios, tecnologia, desenvolvimento sustentável, colaboração e estratégias de gerenciamento. O artigo também descreve os principais pré-requisitos para a implantação da I4.0, desde a necessidade de internet sem fio de alta velocidade até os requisitos de ordem ocupacional.
4	(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019b)	Utilização de recursos da I4.0 para viabilizar um modelo de economia circular baseado em 6R's onde os materiais, energia e os resíduos são aproveitados. Tecnologias como IoT podem ser utilizados para monitorar os indicadores chave e Big Data pode ajudar os *stakeholders* a tomar ações com mais dados.
5	(YAZDI; AZIZI; HASHEMIPOUR, 2018)	Utilização de um experimento para comprovar a redução de tempo ocioso e aumento do tempo de utilização de recursos numa linha de produção otimizada com recursos I4.0 resultando em maior performance e eficiência na fabricação e menor consumo de energia, favorecendo a manufatura sustentável.
6	(MAN; STRANDHAGEN, 2017)	Propostas de utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 como IoT e Big Data para favorecer modelos de negócio com cadeias de suprimento mais sustentáveis. O artigo também ilustra como a I4.0 pode tornar produtos do dia-a-dia mais inteligentes e sustentáveis através da modularização, digitalização e orientação à serviço.
7	(MOKTADIR *et al.*, 2018)	Utilização de métodos de análise multicritério para ranqueamento dos principais desafios para implantação da I4.0 no contexto de indústrias de manufatura de couro num país em desenvolvimento (Índia). Entre 10 principais desafios elencados através de revisão de literatura, a pesquisa apontou a falta de estrutura tecnológica como principal desafio a ser superado na implantação da I4.0.
8	(TUMELERO; SBRAGIA; EVANS, 2019)	Elaboração de um modelo que utiliza resultados de um *survey* para concluir que a cooperação de P&D favorecida por princípios e tecnologias da I4.0 podem influenciar positivamente a performance social e econômica das companhias. A pesquisa também indica que as empresas não precisam ter capital extra para investimento em sustentabilidade ambiental, visto que muitas iniciativas podem se pagar em curtos prazos.
9	(BARENJI *et al.*, 2019)	Utilização de modelo *Cyber-Physical-Based* PAT (CpbPAT) utilizando *Unified Modeling Language (UML)* para estruturação de modelagem de fábrica para indústria farmacêutica
10	(BIRKEL *et al.*, 2019)	Elaboração de um *framework* dos principais riscos da I4.0 à sustentabilidade em cinco principais aspectos: econômico, social, ecológico, político-legal e técnico.
11	(LUTHRA; MANGLA, 2018)	Pesquisa que qualifica através de um questionário semiestruturado os maiores desafios para iniciativas de indústria 4.0 em cadeias de produção sustentáveis. Os desafios são divididos em quatro áreas principais: organizacional, problemas legais e éticos, estratégicos e tecnológicos. Destacam-se os maiores em cada área: Organizacionais - Restrições financeiras Legais e éticos - Problemas legais (ex: regularização de transações via *blockchain*, barreiras regulatórias) Estratégicos - Falta de políticas de incentivo e apoio do governo Tecnológicos - Falta de padrões globais e protocolos de transferência de dados
12	(BRESSANELLI *et al.*, 2018)	Identificação através de um estudo de caso dos pontos principais onde a I4.0 pode ser aplicada no ciclo de vida dos produtos, destacando as ferramentas IoT, Big Data e *Analytics* como grandes responsáveis para criação de valor e aumento da eficiência de utilização de recursos.

#	Referência	Contribuições
13	(STACHOVÁ *et al*., 2019)	Pesquisa indica que, apesar da automatização proposta pela I4.0 eliminar postos de caráter operacional, novos empregos devem ser criados para capacitação e atendimento das atividades econômicas relacionadas à I4.0 tanto na indústria quanto na academia. O estudo também identifica de resultados positivos na cooperação entre empresas e reforça o vínculo com a universidade como viabilizador da implantação da I4.0
14	(DASSISTI; SEMERARO; CHIMENTI, 2019)	Proposta de modelo híbrido de ACV para análise de utilização de recursos e emissões em uma indústria de fabricação de acessórios para construção civil. O modelo pode ser usado para monitorar a eficiência dos processos da I4.0 em comparação com processos tradicionais e oferecer suporte para tomada de decisão.
15	(TORBACKI; KIJEWSKA, 2019)	Utilização de *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL*) para identificação de correlação entre indicadores para indústria 4.0, logística 4.0 e sustentabilidade. O método avaliou através de um *survey* dez indicadores identificando as correlações entre os conceitos de sustentabilidade, I4.0 e logística 4.0.
16	(BONILLA *et al*., 2018)	Utilização de um modelo de causa-efeito para identificação do impacto dos princípios e tecnologias da I4.0 à sustentabilidade e aos ODS em cenários com projeções otimistas e pessimistas à curto e longo prazo. O estudo conclui que o cenário futuro dependerá essencialmente das reações sociais e políticas à digitalização e da homogeneidade da disseminação da I4.0.
17	(STOCK *et al*., 2018)	Relação dos princípios e tecnologias da I4.0 aos impactos à sustentabilidade social e ambiental em cinco aspectos críticos: processo, produto, ser-humano, organização e equipamento. A pesquisa analisa qualitativamente a criação de valor nos novos modelos de negócio da I4.0 e destacando pontos positivos (qualificação mais eficaz, melhor equilíbrio pessoal-profissional) e negativos (simplificação ou substituição do trabalho por automatização, revisão das relações trabalhistas).
18	(HIDAYATNO; DESTYANTO; HULU, 2019).	Proposta de modelo baseado em System Dynamics que utiliza diagrama de ciclo causal para análise econômica, social e ambiental dos impactos da I4.0 num contexto de país em desenvolvimento.
19	(GHADIMI *et al*., 2019)	Proposta de modelo utilizando *Multi-Agent-System* (MAS) para escolha de fornecedores baseados em critérios sustentáveis de seleção. A utilização de tecnologias da I4.0 como IoT e RFID podem automatizar e agilizar as tomadas de decisão ao longo da cadeia de suprimentos.
20	(WAIBEL *et al*., 2017)	Análise qualitativa da implantação da I4.0 ressaltando como principais benefícios a produção de peças customizadas a baixo custo, a rápida modularização da produção reduzindo estoques e desperdícios, a melhoria da ergonomia dos postos de trabalho com a utilização de robôs e a redução do consumo de recursos naturais com processos mais eficientes.
21	(GARRIDO-HIDALGO *et al*., 2018)	Utilização de recursos da I4.0 para melhoria das condições de trabalho e prevenção de acidentes (*wearables* conectados com IoT para detectar fadiga, sono, atos inseguros e sinais vitais como frequência cardíaca e níveis de oxigênio no sangue, aplicáveis principalmente para postos de trabalho em condições de risco, como trabalho confinado, trabalho em altura, etc.)
22	(STRANDHAGEN *et al*., 2017)	Análise da influência da digitalização na operação, destacando as tendências da logística 4.0 e as principais propostas de contribuição dos princípios e tecnologias da I4.0 à sustentabilidade social, econômica e ambiental.
23	(CARVALHO *et al*., 2018)	Destaque das contribuições dos princípios da I4.0 e dos novos modelos de negócio à sustentabilidade, concluindo que a I4.0 pode ser a base da construção de um modelo industrial com alta capacidade de criar, manter e utilizar de forma efetiva métodos, processos, técnicas e estratégias sustentáveis.
24	(PRAUSE; ATARI, 2017)	Mostra através de um estudo de caso que a aplicação dos princípios e tecnologias da I4.0 podem promover ganhos consideráveis de eficiência nos processos. Destaque da auto-organização, auto otimização, direcionamento para o objetivo e dinâmica como fatores críticos de sucesso na implantação da I4.0 para as organizações.
25	(STOCK; SELIGER, 2016)	Proposta de *framework* para integração de I4.0 e sustentabilidade aplicadas à criação de valor com perspectivas macro e micro aplicados à modelos de desenvolvimento e redes de criação de valor, e micro, aplicando as oportunidades em cinco aspectos principais: equipamento, ser humano, organização, produto e processo.

Quadro 11 - Contribuições dos artigos da RSL - Continuação

#	Referência	Contribuições
26	(DING, 2018)	Revisão Sistemática de Literatura com os principais facilitadores e inibidores internos e externos para implantação da I4.0 para cadeias de suprimento da indústria farmacêutica.
27	(SJÖDIN *et al*., 2018)	Proposta de modelo para implementação de *smart factories* baseada em graus de maturidade e considerando três principais princípios: cultivando pessoas digitais, introduzindo processos ágeis e configurando tecnologias modulares. A pesquisa conclui que a implantação de *smart factories* resultará no aumento da eficiência dos processos, redução do custo operacional, aumento da qualidade do produto, da segurança e sustentabilidade.
28	(KAYIKCI, 2018)	Proposta de modelo de ecossistema de integração logística utilizando princípios e tecnologias da I4.0 com impacto positivo para as três dimensões do TBL. A análise do modelo é feita utilizando uma *survey que* mostra o impacto econômico como de o de maior relevância para o segmento de serviço pesquisado.
29	(MÜLLER; VOIGT, 2018)	Proposta de análise considerando os impactos positivos e negativos da I4.0 ao longo da extensão da TBL. A pesquisa destaca o consenso entre empresas alemãs e chinesas sobre os principais desafios no contexto da I4.0 elencando a falta de capacitação e disponibilidade de recursos financeiros como os mais relevantes.
30	(KIEL *et al*., 2017)	Pesquisa conduzida em múltiplos segmentos da indústria revelando impactos positivos e negativos da I4.0 nas três dimensões da TBL. O estudo resulta em três implicações principais: a criação de valor está vinculada à visão integrada da TBL à I4.0; a integração vertical e horizontal ao longo cadeia de valor é fator crítico de sucesso, assim como as transformações organizacionais necessárias para adequação à I4.0; e apesar de requerer investimentos elevados, o retorno financeiro da I4.0 é vantajoso.
31	(KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018)	Proposta de *framework* para utilização da I4.0 em três níveis: as tecnologias da I4.0, a integração de processos e os resultados sustentáveis. A pesquisa sugere que a utilização das tecnologias baseadas nos princípios da I4.0 em processos integrados ao longo da cadeia de suprimentos, resulta em economia, a automatização e aumento da segurança dos processos e a proteção ambiental, impactando positivamente a sustentabilidade.
32	(MORRAR; ARMAN; MOUSA, 2017)	Proposta de *framework* para facilitar interação entre inovações tecnológicas e sociais. A definição de estratégias corretas pode promover ganhos financeiros, enriquecer a sociedade e proteger o meio ambiente. A pesquisa defende a criação de uma plataforma criativa multidisciplinar num ambiente virtual integrado que utilize simulação avançada para testar as inovações da I4.0 antes da aplicação.
33	(GARCIA-MUIÑA *et al*., 2018)	Proposta de modelo que utiliza ACV, CCV e ASCV para análise do impacto ambiental, econômico e social, respectivamente, da utilização de princípios e tecnologias da I4.0 na cadeia de suprimentos.
34	(NAGY *et al*., 2018)	Proposta de correlação de aplicação dos princípios e técnicas da I4.0 com cada atividade no modelo de cadeia de valor de Porter e levantamento dos principais desafios para expansão da I4.0 em quatro principais categorias: cultura do mercado, mão de obra, fatores organizacionais e fatores tecnológicos.
35	(MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018)	Análise das oportunidades e desafios da implantação da I4.0 no contexto da sustentabilidade, evidenciando como principais oportunidades os ganhos operacionais, estratégicos, ambientais e sociais e como maiores desafios a adaptação da produção e da estrutura organizacional e a preocupação com a competitividade e viabilidade futura.
36	(DE SOUSA JABBOUR *et al*., 2018)	Propõe um ambiente de relação sinérgica entre I4.0 e manufatura sustentável sujeita à onze principais fatores críticos de sucesso: liderança administrativa, prontidão à mudanças organizacionais, comprometimento da alta gerência, alinhamento estratégico, construção de capacidade e treinamento, empoderamento, trabalho em equipe e equipe de implementação, cultura organizacional, comunicação, gerenciamento de projeto e atenção às diferenças culturais nacionais e regionais.

Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

4.3 Análise da contribuição dos princípios e tecnologias à sustentabilidade

A busca por modelos de integração entre os princípios e tecnologias da I4.0 e a sustentabilidade vem tomando lugar devido à preocupação crescente com os impactos dos padrões de consumo atuais, o comprometimento dos governos e empresas com a Agenda 2030 e a consequente necessidade de se desenvolver processos mais eficientes, principalmente com foco na manufatura (GARCIA-MUIÑA *et al.*, 2018; STOCK; SELIGER, 2016).

De acordo com Bonilla *et al.* (2018), os ganhos potenciais da I4.0 para a sustentabilidade estão relacionados principalmente a ganhos de valor para o cliente final, de eficiência de processos produtivos e de desempenho e geração de valor dos produtos. Os mesmos autores relacionam diretamente as principais possibilidades de ganho da I4.0 na integração com a operação aos ODS 7, 9, 12 e 13, como mostra o Quadro 12. O aumento da geração de energia sustentável e a redução do consumo de energia e de matéria prima, assim como a redução da geração de resíduos e gases do efeito estufa são efeitos da utilização de tecnologias como *IoT*, *CPS*, *Smart Grids*, *Big Data Analytics* e Manufatura Aditiva.

Quadro 12 - Relação de ODS com I4.0

ODS	Elemento de integração com a I4.0	Oportunidades para sustentabilidade	Efeito
ODS#7 Energia limpa e acessível	- Digitalização (*IoT* e *CPS*) - Capacidade em tempo real - *Big Data Analytics*	Implantação de redes elétricas inteligentes	Redução do consumo de energia
		Implantação de ACV	Aumento da geração de energia sustentável
ODS#9 Indústria, Inovação e Infraestrutura	- Digitalização (IoT e CPS) - Capacidade em tempo real - Manufatura Aditiva - Novos modelos de negócio	Melhorar os pontos fracos da manufatura aditiva (energia e possibilidade de reciclagem) Estender integração com economia circular	Reduz consumo de energia, matéria prima. Reduzir geração de resíduos Reduzir produtos com fim de vida determinados
ODS#12 Consumo e produção responsável	- Digitalização (IoT e CPS) - Capacidade em tempo real - Customização - Orientação à serviço	Implantação de sistemas de manufatura voltados à utilização serviço prestado pelo material e não ao produto em si.	Reduz consumo de energia, matéria prima. Reduzir geração de resíduos Reduzir produtos com fim de vida determinados
ODS#13 Mudanças Climáticas	- Digitalização (IoT e CPS) - Capacidade em tempo real - *Big Data Analytics* - *Blockchain*	Implantação de redes elétricas inteligentes	Redução do consumo de energia
		Implantação de ACV	Aumento da geração de energia sustentável
		Transações de emissões via *Blockchain*	Reduz emissões de gases do efeito estufa

Fonte: adaptado de Bonilla *et al.* (2018, p.17)

A utilização das tecnologias, no entanto, depende dos princípios da I4.0 como bases para operação, logo, a análise das possibilidades de ganho de cada princípio da I4.0 à sustentabilidade é de grande importância para que se possa desenhar um *framework* abrangente. Carvalho *et al.* (2018) resumem as contribuições mais significativas à sustentabilidade no Quadro 13:

Quadro 13 - Contribuições de cada princípio da I4.0 à Sustentabilidade.

Princípio	**Contribuição à Sustentabilidade**
Interoperabilidade	A padronização de modo de comunicação entre os equipamentos e sistemas pode evitar a obsolescência programada e aumentar o ciclo de vida das máquinas, reduzindo o desperdício e a demanda por múltiplos equipamentos para a mesma função.
Descentralização	A possiblidade de utilizar recursos locais reduz o consumo energético e as emissões gastas no transporte dos materiais.
Virtualização	Reduz o desperdício de matéria prima, energia e as emissões a partir da execução virtual (Ex: simulação, realidade aumentada e realidade virtual).
Capacidade de tempo real	Melhor adaptação a variações de demanda, melhor responsividade da cadeia de suprimentos, melhor uso de recursos, redução de estoque e desperdícios.
Modularidade	Melhor utilização de recursos fabris, ciclo de vida das máquinas mais longo
Orientação à serviço	Melhor aproveitamento da função final do produto, aumento das oportunidades de reuso, reciclagem e compartilhamento de recursos.

Fonte: adaptado de Carvalho *et al.* (2018, p. 6).

Reforçando os pontos positivos da integração entre I4.0 e Sustentabilidade, Tumelero, Sbragia e Evans (2019) propõem que há influência positiva da utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 para a melhoria da ecoinovação. Segundos os autores, a transformação digital e a utilização de tecnologias como *IoT* tem potencial para direcionar melhor os processos de projeto e desenvolvimento e podem impactar positivamente o desempenho socioeconômico das empresas.

4.4 *Frameworks* de integração

O desenvolvimento sustentável dos recursos humanos e o compartilhamento de conhecimento são considerados por Stachová *et. al.*, (2019) como responsáveis por viabilizar a migração das indústrias para a I4.0 por meio de modelos de análise ou *frameworks* de integração. Utilizando os princípios e tecnologias da I4.0, os autores apresentados nessa sessão propõem modelos de implantação da I4.0 e integração entre sustentabilidade e I4.0, principalmente aplicado à indústria de manufatura.

Para a introdução da I4.0 nos sistemas atuais, Sjödin *et al.* (2018) propõem um modelo estruturado para implantação de Fábricas Inteligentes (*Smart Factories*) tendo como lastro pessoas, processos e tecnologias em quatro níveis de maturidade: tecnologias conectadas com interoperabilidade; dados estruturados e compartilhados (*Big Data* e *Analytics*); processamento, análise e otimização em tempo real; e manufatura inteligente. O mesmo autor destaca como principais ganhos o aumento da eficiência dos processos, a redução dos custos operacionais, o aumento da qualidade do produto, da segurança e da sustentabilidade através da redução de desperdícios e da utilização de tecnologias como a manufatura aditiva, como mostra a Figura 30.

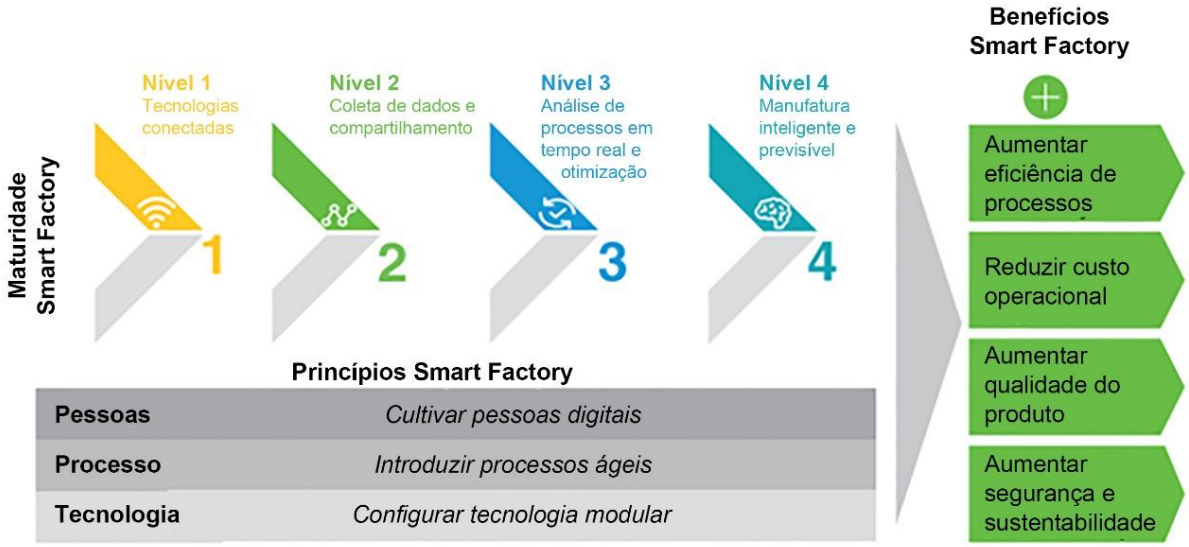


Figura 30 - *Framework* para implantação de *Smart Factories.*
Fonte: Adaptado de Sjödin *et al.* (2018, p. 9)

Tendo os níveis de maturidade mapeados, no sentido de integração entre os princípios e as ferramentas da I4.0 e a sustentabilidade, Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018) propuseram um *framework* baseado em três camadas:

1. Tecnologias relacionadas à Indústria 4.0: IoT, *Big Data*, Computação em nuvem, Simulação e protótipo, impressão 3D, realidade aumentada e sistemas robóticos;
2. Integração de processos: colaboração homem-máquina, integração de equipamentos no chão de fábrica;
3. Resultados sustentáveis: econômico, automação de processos e segurança e proteção ambiental.

Essa estrutura sugere que as empresas podem usar as tecnologias da Indústria 4.0 para alcançar a integração do processo entre todos os elementos (máquinas, equipamentos, pessoas, trabalhos em processo, produtos) dos sistemas de manufatura, a fim de executar com eficiência as tarefas de manufatura usando menos recursos, tempo e energia e gerando menos resíduos e emissões. Segundo Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018) há impactos positivos nos três pilares da sustentabilidade:

- econômico: a partir da utilização de menos recursos, tempo e energia;
- social: conferindo importância aos direitos e à saúde dos funcionários, da comunidade e de outras partes interessadas pela redução de riscos;
- ambiental: utilizando menos energia, gerando menos resíduos e emissões e reciclando os recursos.

A Figura 31 resume as tecnologias propostas, a integração dos processos e os resultados sustentáveis consequentes:

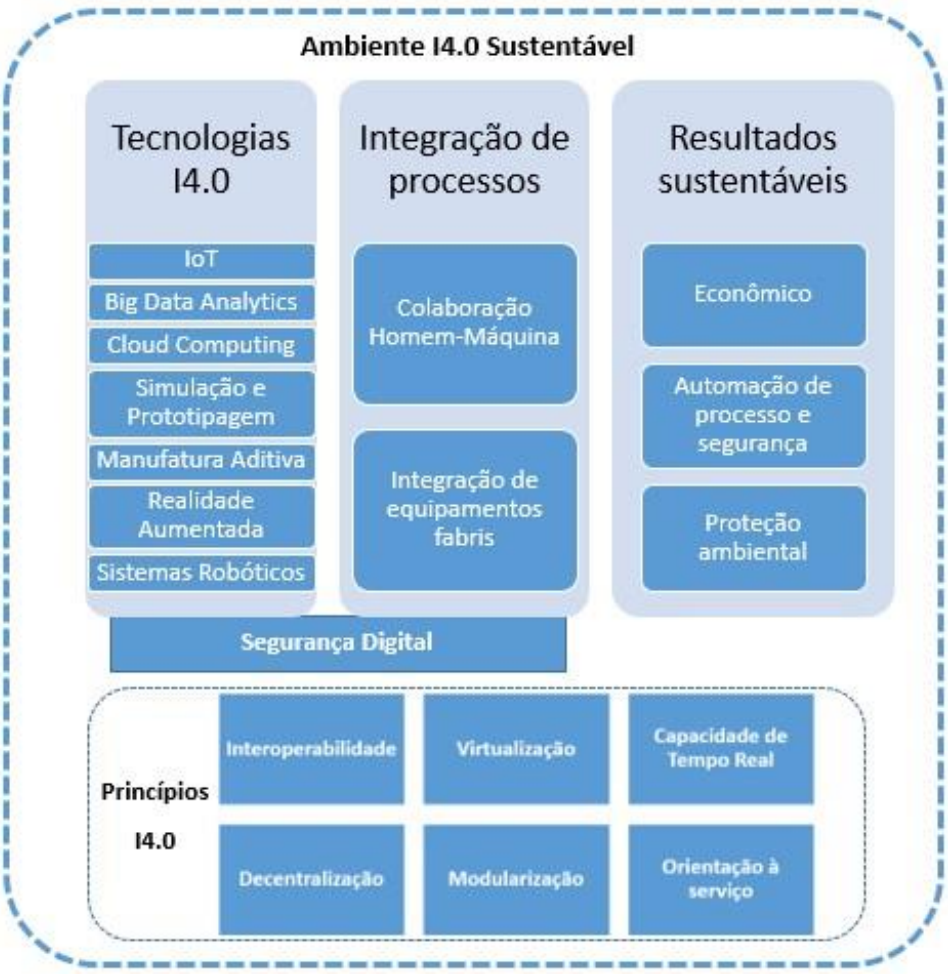


Figura 31 - *Framework* correlacionando I4.0 e Sustentabilidade
Fonte: Adaptado de Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018, p. 12)

Entendendo as possibilidades de aplicação levantadas, para que haja de fato resultados positivos na integração entre a I4.0 e a sustentabilidade, De Sousa Jabbour *et al.*, (2018) elencam onze fatores críticos de sucesso que devem ser atendidos para que haja sinergia e ganho em relação à sustentabilidade: liderança administrativa, prontidão à mudanças organizacionais, comprometimento da alta gerência, alinhamento estratégico, construção de capacidade e treinamento, empoderamento, trabalho em equipe e equipe de implementação, cultura organizacional, comunicação, gerenciamento de projeto e atenção às diferenças culturais nacionais e regionais, como mostra a Figura 32, onde cada fator (F) é representado :

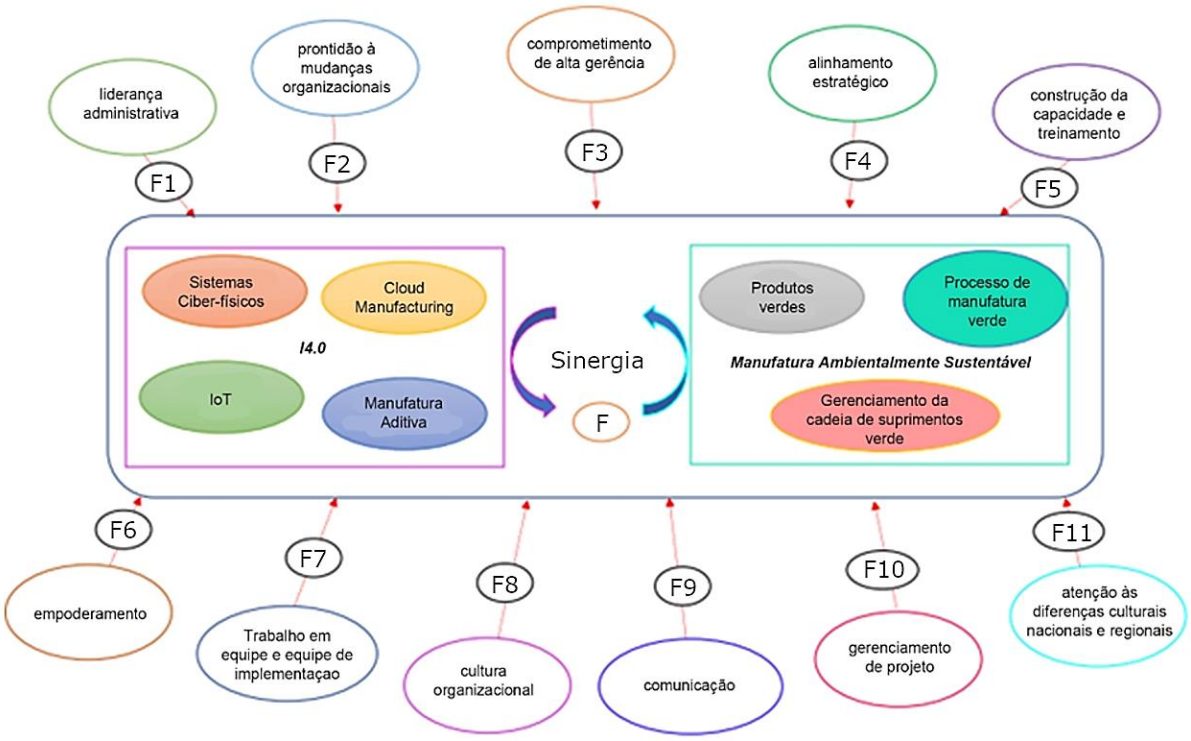


Figura 32 - Fatores Críticos de Sucesso para Integração da I4.0 à sustentabilidade.
Fonte: Adaptado de De Sousa Jabbour *et al.*, (2018, p. 22)

Utilizando uma abordagem quantitativa, diferente dos autores anteriores, Tsai e Lu (2018) propõem um modelo matemático para otimização de planejamento da produção utilizando método *Activity-Based Costing* (*ABC*) para medir o custo dos processos em conjunto com *Theory of Constraints* (*TOC*), ou Teoria das Restrições, para identificar as restrições de produção e vendas. As ferramentas da I4.0 como manufatura aditiva e veículos autônomos, ou *Automated Guided Vehicle* (*AGV*), conectados através de *IoT* e *CPS* complementam o modelo dando informações para tomada de decisão em tempo real, reduzindo custos de produção, consumo energético e as emissões de CO_2 na fabricação de pneus.

Pelos mesmos autores, os principais ganhos destacados consistem na capacidade de minimizar processos de prototipagem com a manufatura aditiva, reduzir os custos de transporte utilizando *AGV* e aumentar a eficiência das decisões pela utilização *IoT* formando um *CPS* ao longo do processo produtivo.

Em concordância com os modelos anteriores, Garcia-Muiña *et al.* (2018) propõem um *framework* destacando os processos ligados por *IoT* para comunicação e aferição da eficiência da produção, formando, por meio de um processamento em tempo real, da interoperabilidade e da modularidade um CPS começando na etapa inicial de suprimento de matéria prima até a chegada nos clientes e distribuidores, considerando como exemplo o estudo de caso de uma empresa de pisos e revestimentos cerâmicos, como mostra a Figura 33.

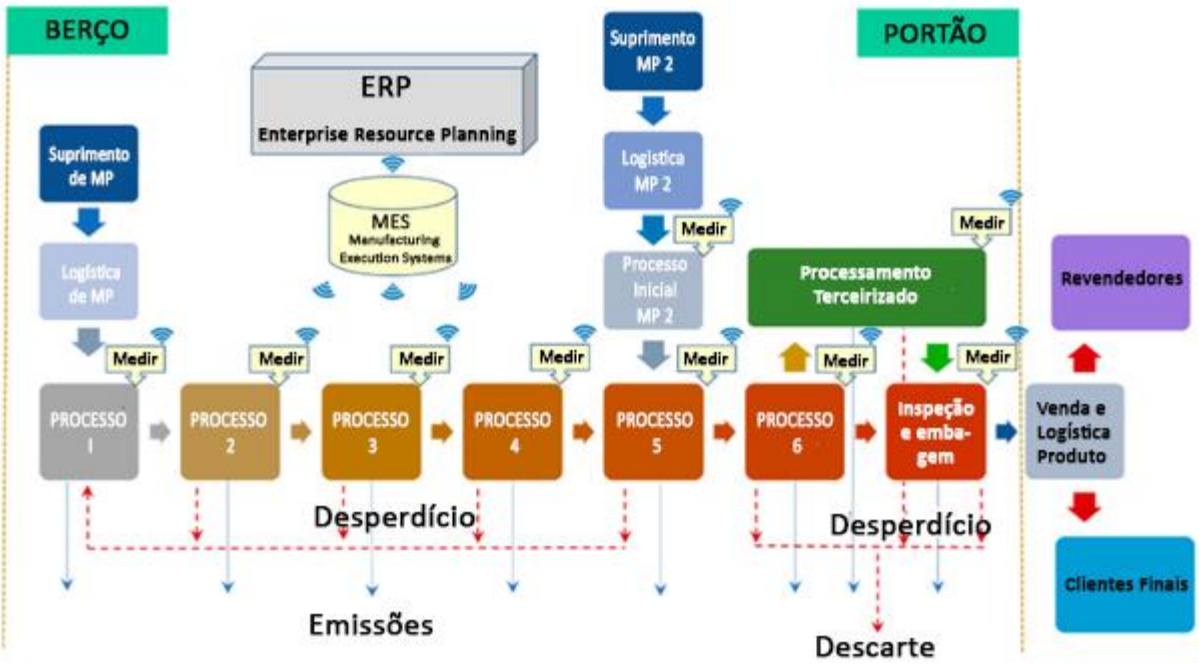


Figura 33 - *Framework* de aplicação dos recursos da I4.0 no processo.
Fonte: Adaptado de Garcia-Muiña *et al.* (2018, p. 15)

Para que se possam mensurar os ganhos da utilização dos *framework* que propõem, Garcia-Muiña *et al.* (2018) sugerem a utilização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Custeio Ciclo de Vida (CCV) e Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV), para análise do impacto ambiental, econômico e social, respectivamente, da utilização de princípios e tecnologias da I4.0 na cadeia de suprimentos, como mostra a Figura 34.

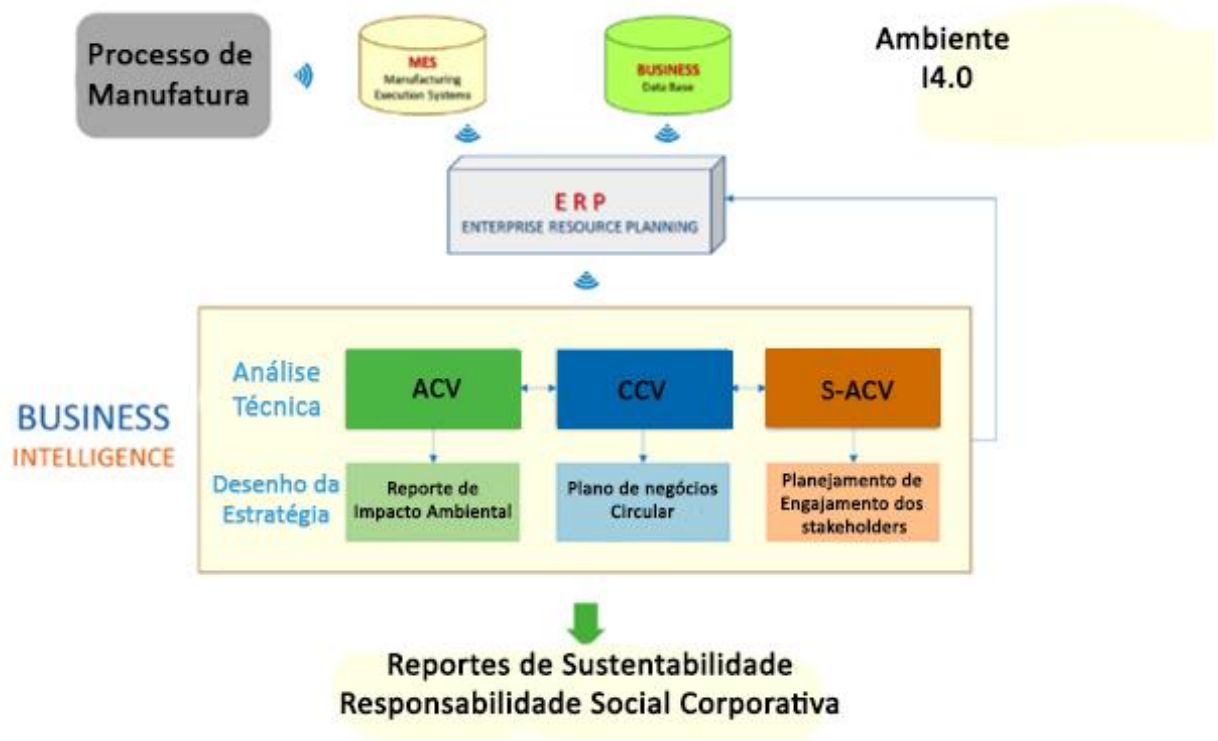


Figura 34 - *Framework* de aferição da sustentabilidade
Fonte: Adaptado de Garcia-Muiña *et al.* (2018, p. 16)

De forma semelhante ao *framework* de Garcia-Muiña *et al.* (2018), Man e Strandhagen (2017) propõem a aplicação dos princípios e tecnologias da I4.0 como mecanismo de otimização em cadeias de suprimentos. O mapeamento da cadeia feita pelos autores aborda a entrada de recursos como energia, água e matéria prima, a eficiência dos processos de transformação e consistência das saídas finais, como mostra a Figura 35.

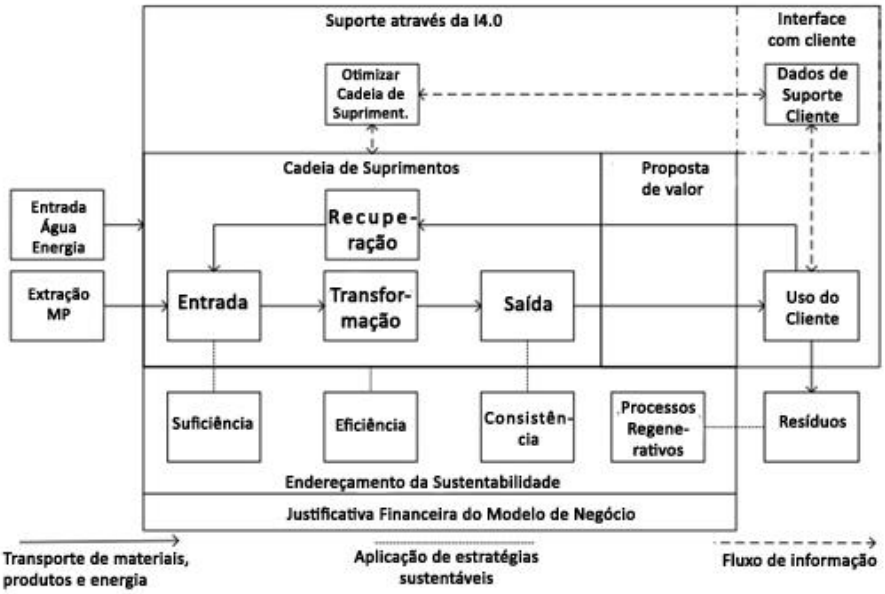


Figura 35 - *Framework* de integração da I4.0 à Sustentabilidade com abordagem no processo.
Fonte: Adaptado de Man e Strandhagen (2017, p. 723).

Somando-se as aplicações destinadas à cadeias de suprimentos, Kayikci (2018) defende que os benefícios da utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 como a viabilização de pequenos lotes, a customização e a transparência entre clientes e fornecedores são muito atrativas, mas não podem ser alcançados somente no chão de fábrica. Para que as contribuições possam ocorrer efetivamente é fundamental que as melhorias ocorram ao longo da cadeia de suprimentos, conforme demonstrado em seu modelo expresso na Figura 36. Nesse modelo, o autor aplica os princípios e tecnologias da I4.0 às três dimensões da sustentabilidade numa cadeia de suprimentos do fornecedor inicial até o cliente final *(end-to-end Supply Chain)*, destacando importantes características da I4.0 como a cooperação, conectividade, adaptabilidade, integração, controle autônomo e cognição.

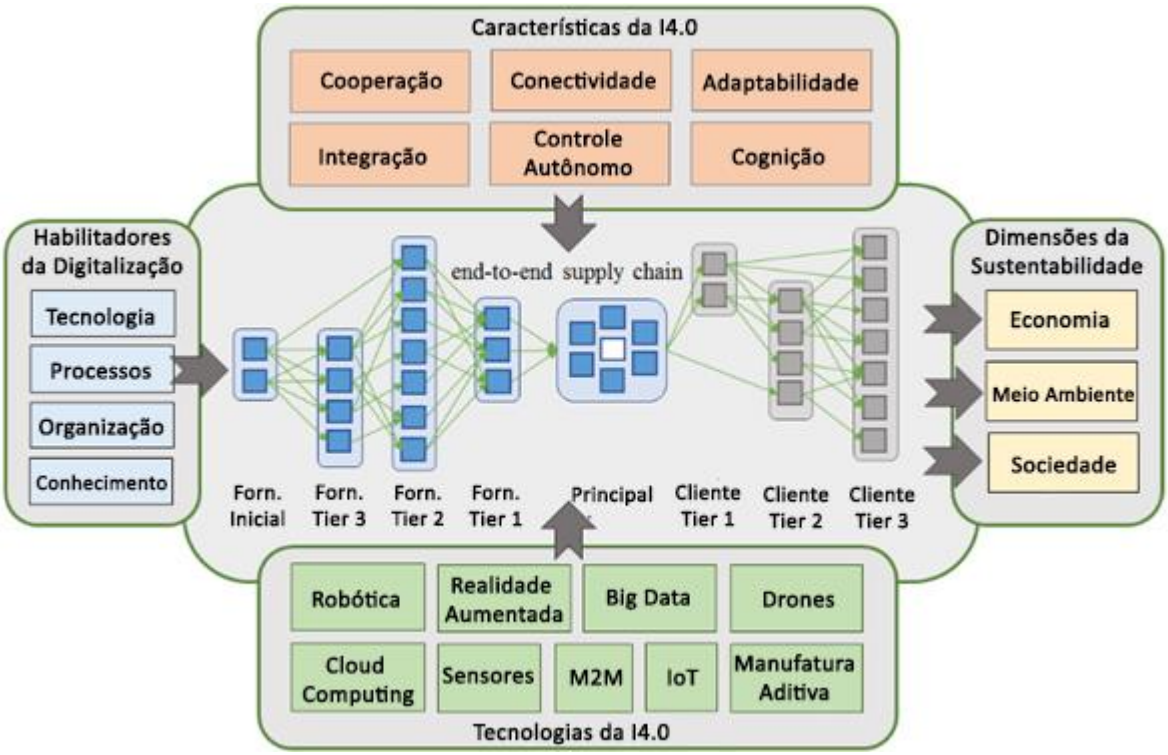


Figura 36 - *Framework* de integração entre I4.0 e Sustentabilidade aplicado a cadeia de suprimentos.
Fonte: Adaptado de Kayikci (2018, p. 784).

Em concordância com os modelos que abordam vários níveis da cadeia de suprimentos, Martín-Gómez, Aguayo-González e Luque (2019) apresentam um enfoque mais macroeconômico ao aplicar o conceito de integração vertical e horizontal para ligas as camadas ou *tiers* da cadeia de suprimentos, como mostra a Figura 37.

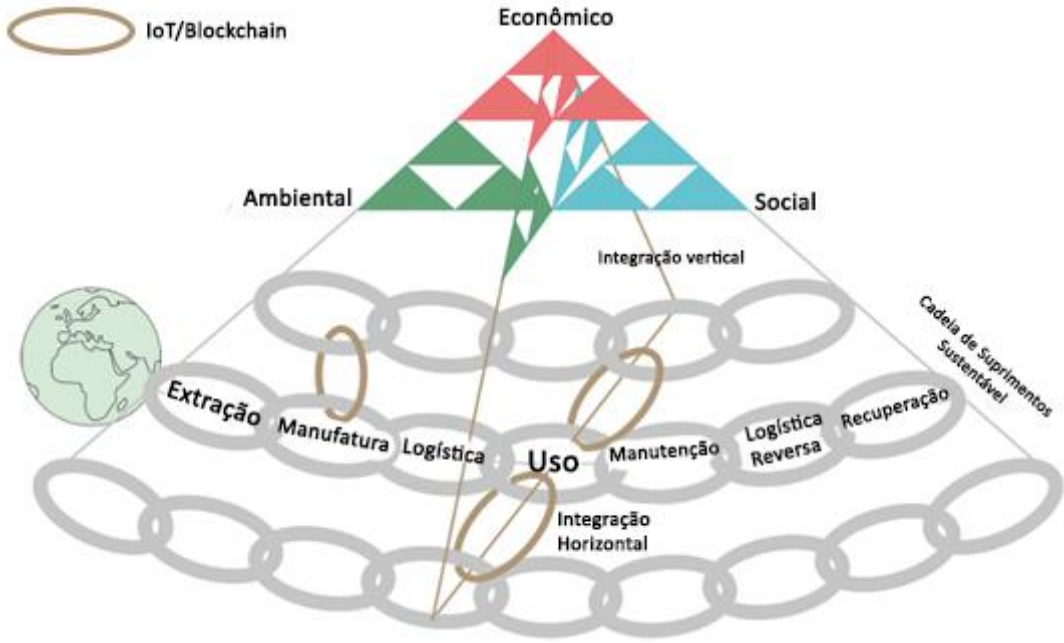


Figura 37 - *Framework* de integração I4.0 e sustentabilidade aplicado à cadeia de suprimentos.
Fonte: Adaptado de Martín-Gómez, Aguayo-González e Luque (2019, p. 223)

De forma semelhante, Stock e Selinger (2016) também trazem um aspecto macro, integrando a I4.0 à cadeia de suprimentos com a visão de ciclo de vida do produto, como mostra a Figura 38. Nessa visão os autores sugerem a integração de todos os agentes por meio dos princípios e tecnologias da I4.0 aplicados numa economia circular, destacando ganhos relevantes no aproveitamento de recursos, redução de desperdícios e orientação a serviço.

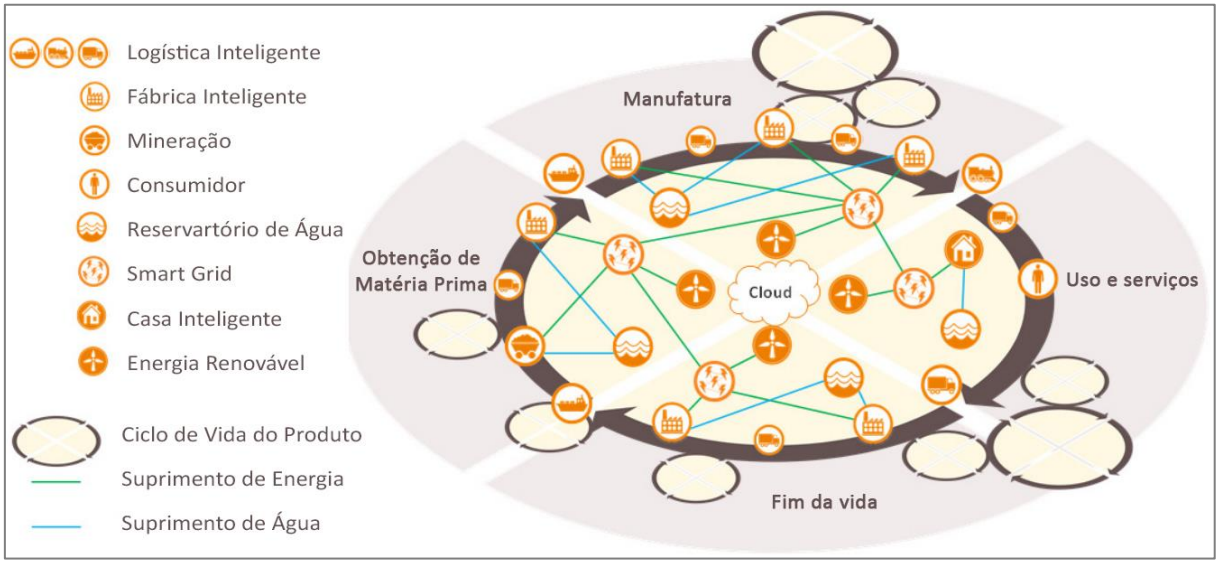


Figura 38 – Perspectiva macro da cadeia de suprimentos com I4.0 e ciclo de vida de produto.
Fonte: Adaptado de Stock e Selinger (2016, p. 537)

Stock e Selinger (2016) sugerem ainda que a criação de valor para o cliente deve ser o foco do processamento do produto, evitando assim desperdícios e aumentando a eficiência do processo.

Concluindo as contribuições com um foco diferente dos anteriores, Nagy *et al.* (2018) mostram que os princípios e tecnologias da I4.0 podem formar um modelo de integração baseado no conceito de cadeia de valor de Porter (1985) e descrevendo a gestão e os recursos a serem utilizados em cada etapa das atividades principais e das atividades de suporte, como mostra a Figura 39. Segundo o autor, a utilização da I4.0 tem grandes possibilidades de contribuição para a criação e manutenção de vantagens competitivas relacionadas à sustentabilidade econômica das empresas.

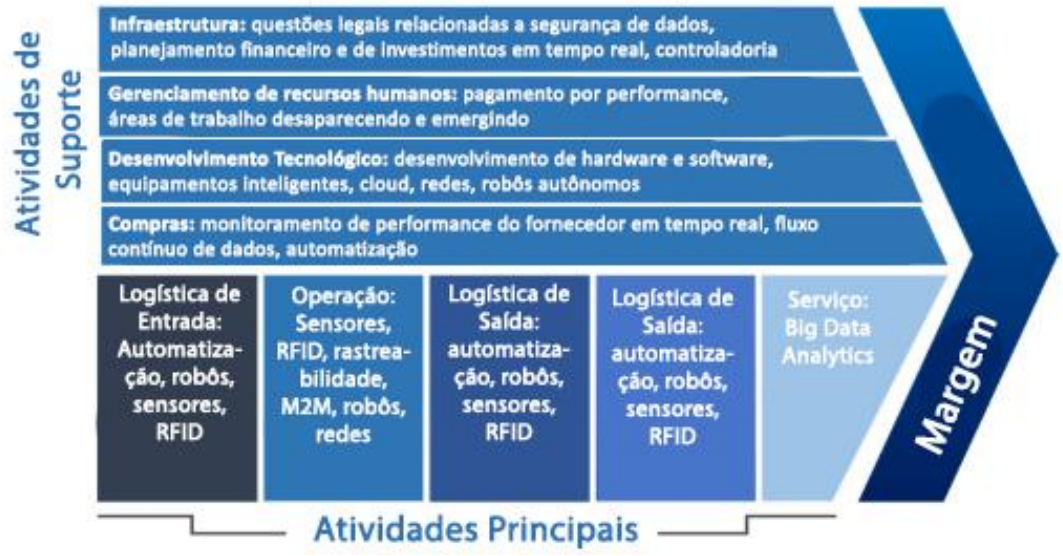


Figura 39 - *Framework* de integração I4.0 e sustentabilidade utilizando o conceito de cadeia de valor.
Fonte: Adaptado de Nagy *et al.* (2018, p. 6).

Para resumir os modelos propostos pelos autores da RSL, foi elaborado o Quadro 14 que resume o framework, sua breve descrição, os princípios e tecnologias da I4.0 utilizados, os ganhos em relação à sustentabilidade e a aplicação, abordagem e tipo de pesquisa do artigo.

Quadro 14 - Resumo dos frameworks da RSL.

Autores	Modelo	Contribuição	Princípios e Tecnologias I4.0	Ganhos em relação a Sustentabilidade	Aplicação	Abordagem e Tipo de Pesquisa
Sjödin *et al.* (2018)	*Framework* de Implantação de *Smart Factories* com nível de maturidade	Proposta de escala com níveis de maturidade para implantação de *Smart Factories.*	Manufatura Aditiva, capacidade de tempo real, *IoT*, interoperabilidade, *Big Data* e *Analytics*.	Ganhos estimados de eficiência de processos, redução de custo operacional, aumento na qualidade do produto e aumento da segurança e sustentabilidade	Modelo teórico, destinado a Indústria automotiva.	Qualitativa, conceitual
Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018)	*Framework* de integração da I4.0 e sustentabilidade a processos industriais	Proposta de integração de processos I4.0 à manufatura por meio de colaboração homem-máquina e integração de equipamentos fabris num ambiente de segurança digital.	Interoperabilidade, virtualização, capacidade de tempo real, descentralização, modularização, orientação a serviço, IoT, Big Data, Computação em nuvem, Simulação e prototipagem, impressão 3D, realidade aumentada e sistemas robóticos.	Economia, automação de processos, melhoria de segurança e proteção ambiental	Modelo teórico destinado a Indústria e serviços em Geral	Qualitativa, conceitual
De Sousa Jabbour *et al.*, (2018)	*Framework* com fatores críticos de sucesso para integração I4.0 e sustentabilidade	Proposta que elenca onze fatores críticos de sucesso que devem ser atendidos para que haja ganho na sustentabilidade utilizando a I4.0	*CPS, IoT, Cloud Manufacturing*, Manufatura Aditiva	Processos e produtos mais sustentáveis, melhor capacidade de gerenciamento da cadeia de suprimentos.	Modelo teórico destinado a Indústria e serviços em Geral	Qualitativa, conceitual
Tsai e Lu (2018)	Modelo matemático para PCP com utilização de I4.0	Proposta de modelo matemático para planejamento e controle da produção utilizando princípios e tecnologias da I4.0 para obtenção de informações para suporte à tomada de decisão em tempo real.	Manufatura Aditiva, AGV, IoT, CPS e Capacidade de Tempo Real.	Redução de emissões de CO2, redução de desperdícios e aumento de eficiência de processos.	Indústria de Fabricação de Pneus	Quantitativa, estudo de caso
Garcia-Muiña *et al.* (2018)	*Framework* de integração da I4.0 e sustentabilidade a para aferição de processos	Utilização de técnicas de ACV, CCV e ASCV para determinação dos ganhos da aplicação da I4.0 a sustentabilidade.	IoT, CPS, processamento em tempo real, interoperabilidade e modularidade.	Aferição mais precisa de ACV, CCV e ASCV podem auxiliar em melhores tomadas de decisão e, por consequência, resultar em ganhos ao TBL.	Indústria de fabricação de Pisos Cerâmicos	Qualitativa, estudo de caso

Quadro 14 - Resumo dos frameworks da RSL. - Continuação

Autores	Modelo	Contribuição	Princípios e Tecnologias I4.0	Ganhos em relação a Sustentabilidade	Aplicação	Abordagem e Tipo de Pesquisa
Man e Strandhagen (2017)	*Framework* de integração da I4.0 à Sustentabilidade com abordagem no processo	Propostas de utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 como *IoT* e *Big Data* para favorecer modelos de negócio com cadeias de suprimento mais sustentáveis.	IoT, Big Data, modularidade, digitalização e orientação a serviço.	Redução de geração de resíduos e melhoria da eficiência dos processos.	Modelo teórico destinado a Indústria e serviços em Geral e aplicações domésticas	Qualitativa, conceitual
Kayikci (2018)	*Framework* de integração entre I4.0 e Sustentabilidade aplicado a cadeia de suprimentos	Proposta de *framework* de ecossistema de integração logística utilizando as características, princípios e tecnologias da I4.0 ao longo da cadeia de suprimentos.	Realidade Aumentada, Big Data, Drones, Robótica, *Cloud Computing, IoT,* Manufatura Aditiva.	Ganhos às três dimensões do TBL.	Indústria de Logística e Transporte	Qualitativa, *Survey*
Martín-Gómez, Aguayo-González e Luque (2019)	*Framework* de integração I4.0 e sustentabilidade aplicado à cadeia de suprimentos.	Proposta de *framework* para gerenciamento de uma cadeia de suprimentos adaptativa, integrada e sustável utilizando I4.0 para viabilização da economia circular.	Integração vertical e horizontal, *IoT*, *Blockchain*.	Ganhos a sustentabilidade da cadeia de suprimentos.	Indústria de fabricação de mobília urbana	Quantitativa, Estudo de Caso
Nagy *et al.* (2018)	*Framework* de integração I4.0 e sustentabilidade utilizando o conceito de cadeia de valor.	Proposta de correlação de aplicação dos princípios e técnicas da I4.0 na cadeia de valor de Porter.	*Big Data*, *Analytics*, *Smart Things*, capacidade de tempo real, automatização, *CPS,* rastreabilidade.	Criação e manutenção de vantagens competitivas relacionadas à sustentabilidade econômica das empresas.	Modelo teórico destinado a Indústria e serviços em Geral e aplicações domésticas	Qualitativa, *Survey*
Stock e Selinger (2016)	*Framework* de integração da I4.0 a cadeia de suprimentos e sustentabilidade	Proposta de integração de I4.0 e sustentabilidade aplicadas perspectivas macro e micro da cadeia de suprimentos.	*Smart Grids*, *Smart Factories*, *Smart Houses*, *IoT*, *CPS*, *Cloud Computing*.	Melhor aproveitamento de recursos, redução de desperdícios e economia de energia elétrica.	Modelo teórico destinado a Indústria e serviços em Geral e aplicações domésticas	Qualitativa, Estudo de Caso

Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

4.5 Análise dos riscos e oportunidades da implantação

Apesar da maior parte dos estudos avaliados focarem nos impactos positivos da I4.0 na sustentabilidade, modelos elaborados para utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 devem levar em consideração também os riscos e dificuldades (DING, 2018).

Birkel *et al.* (2019) elaboraram um *framework* para análise dos riscos da implantação da I4.0 em cinco aspectos: econômicos, sociais, legais e políticos, técnicos e de TI e ecológicos. A Figura 40 mostra os riscos interligados pois, segundo os autores, a análise dos mesmos de forma isolada pode gerar um entendimento tangencial dos temas, dificultando o encontro de soluções efetivas para cada área.

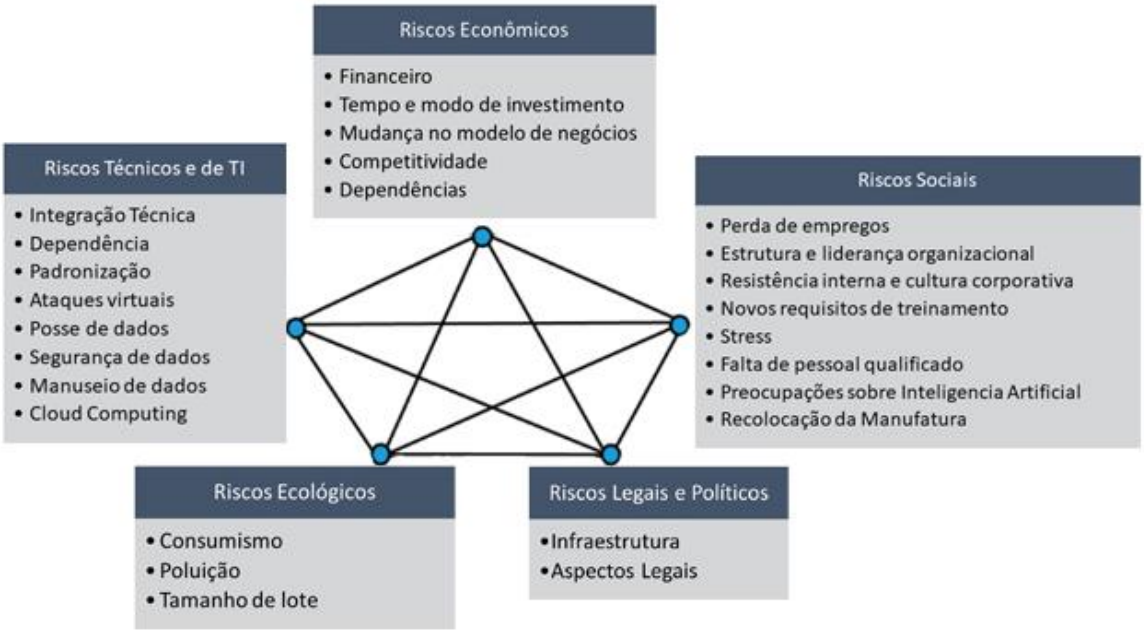


Figura 40 - Riscos associados a Implantação e utilização da I4.0.
Fonte: Adaptado de Birkel *et al.* (2019, p. 21).

Müeller, Kiel e Voigt (2018) apontam como riscos para implementação da I4.0 os de adaptação da produção e da estrutura organizacional e a preocupação com a competitividade e viabilidade futura.

Esses riscos devem ser considerados na aplicação dos modelos em casos reais, uma vez que estes podem configurar importante restrição para implantação e integração da I4.0 à operação e à sustentabilidade.

Como oportunidades, destacam-se as contribuições considerando que o eixo de países em desenvolvimento que contextualiza parte representativa dos artigos utilizados e o

impacto positivo nos ODS de energia limpa e acessível, indústria, Inovação e infraestrutura, consumo e produção responsável, e de mudanças climáticas.

Quanto às tecnologias, o Quadro 15 resume as principais oportunidades de contribuição sugeridas pelos artigos da RSL.

Quadro 15 - Oportunidades de contribuição das tecnologias da I4.0.

Tecnologias	**Contribuição**
Big Data Analytics	A utilização e análise de grandes volumes de dados pode ser usada para orientar de melhor forma a tomada de decisão em qualquer etapa da produção.
Manufatura Aditiva	Apesar de ainda ter custo elevado para produção seriada, a manufatura aditiva pode ser utilizada para viabilização da customização e produção de pequenos lotes, uma vez que reduz o custo com ferramental, como moldes e dispositivos de usinagem, e minimiza o consumo e desperdício de matéria prima.
Simulação e Prototipagem	A simulação computadorizada pode poupar tempo, energia e uso de matéria prima evitando situações de tentativa e erro a partir de sua utilização para testar processos em ambiente virtual.
Realidade Aumentada	A realidade aumentada pode ser utilizada para reduzir o tempo de operações através do aumento da eficiência obtida pelos auxílios visuais, podendo ser usada desde procedimentos de treinamento e manutenção a até cirurgias.
Realidade Virtual	A realidade virtual pode ser utilizada principalmente para fins de treinamento, educação, demonstração e simulação em ambientes de imersão virtual, melhorando a eficiência desses procedimentos e poupando custos com materiais físicos e sua preparação.
Inteligência Artificial / ***Machine Learning***	A inteligência artificial pode ser utilizada em conjunto com o *machine learning* para que os processos e sistemas possam tomar decisões autônomas com eficiência, auxiliando na redução de erros e desperdícios por falhas humanas.
Robótica Colaborativa	A robótica colaborativa, seja utilizando em tarefas de postos estacionários dedicados, ou circulando pela fábrica, como os AVGs, pode auxiliar na preservação da saúde e segurança dos operadores humanos, substituindo ou auxiliando em funções insalubres ou ergonomicamente onerosas.
IoT / CPS	A utilização da IoT é fundamental para o funcionamento das demais sistemas, sendo responsável pela conexão deles e viabilização dos sistemas ciberfísicos.
Rastreabilidade (RFID, QR Code, NFC)	A rastreabilidade é pré-requisito fundamental em muitos mercados e a utilização de tecnologias como RFID pode ajudar na redução de custos de inventário, além da redução de desperdícios por conta de materiais extraviados.

Fonte: Elaborado a partir da RSL (2019).

Entende-se, então, a partir das oportunidades mostradas, que há muitas possiblidades de contribuição a serem mapeadas e que as tecnologias da I4.0 podem configurar importantes agentes na obtenção da produção mais sustentável, devendo então ser utilizadas no *framework* a ser proposto.

Capítulo 5 – Proposta de *Framework*

Após o entendimento da correlação entre I4.0 e sustentabilidade identificada nos artigos da RSL, o presente capítulo traz um *framework* de integração entre esses conceitos para entender qual a contribuição da Indústria 4.0 para os desafios da sustentabilidade empresarial. A elaboração do *framework* proposto se deu a partir da conexão dos principais modelos propostos na literatura em conjunto com as contribuições dos autores em relação à aplicação dos princípios de tecnologias da I4.0 à sustentabilidade em indústrias de manufatura.

Os passos que compõem a aplicação do *framework* e os respectivos autores utilizados em cada etapa resumem-se na Figura 41:

Figura 41 - Etapas do framework para avaliação da sustentabilidade.
Fonte: Elaboração própria.

Para o mapeamento da cadeia atual, o *framework* utilizou a identificação de camadas ou *tiers* de clientes e fornecedores, iniciando-se pela extração de matéria prima e passando pelo processamento em cada empresa até chegar ao cliente final. Nesses processos, exceto pelo fornecedor responsável pela extração da matéria prima da natureza, a entrada de matéria prima de cada empresa é a saída da anterior.

A etapa de processamento é representada por processos genéricos com uma inspeção entre eles, podendo ser alterada para inspeção final de acordo com o processo a ser analisado. Assim, após finalizado o mapeamento da cadeia inicial, propôs-se a verificação dos impactos a sustentabilidade ambiental, econômica e social utilizando as ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Custeio Ciclo de Vida (CCV) e Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV), respectivamente.

Para a etapa de projeção da cadeia I4.0, na etapa de processamento foram inseridas as tecnologias da I4.0 para processos num ambiente CPS, conforme destaca a Figura 42, cabendo a gestão a escolha da melhor tecnologia a ser utilizada para cada situação.

Acrescentou-se a projeção da cadeia I4.0 a utilização de *Smart Grid* como proposta para redução do consumo energético e aumento da produção de energia limpa, utilizou-se IoT, rastreabilidade e interoperabilidade para ligação entre processos e agentes distintos e a integração pela nuvem, assim como transações financeiras integradas via *blockchain*.

Dada a nova cadeia, utilizou-se das mesmas ferramentas de ACV, CCV e ASCV para aferição da sustentabilidade em cada pilar do TBL. A partir dos indicadores coletados antes e depois da proposta I4.0, tem-se então a possibilidade de se comparar as cadeias distintas e identificar os impactos da I4.0 a sustentabilidade social, econômica e ambiental, conforme objetivado no presente estudo.

Utilizando- se então os passos propostos na Figura 41, pode-se então consolidar todas as contribuições num único *framework* contendo a projeção de uma empresa utilizando a I4.0 integrada a sustentabilidade, como propõe a Figura 42.

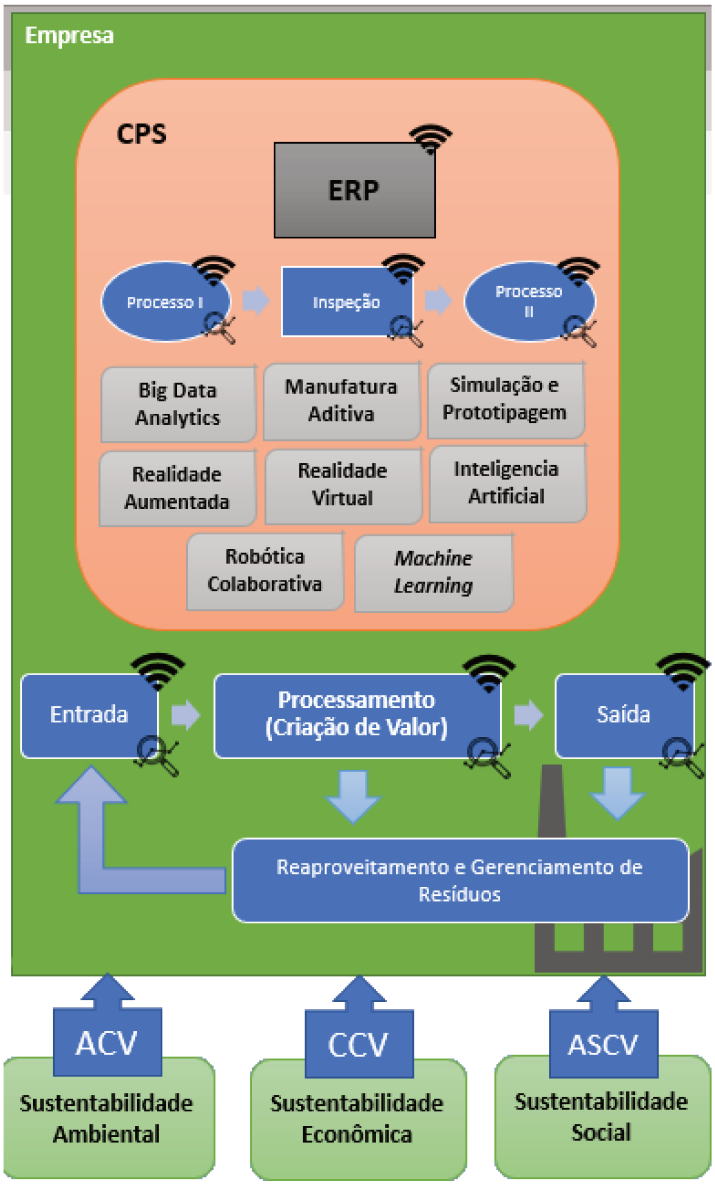


Figura 42 – Projeção do *framework* integrando I4.0 e sustentabilidade no nível de empresa
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 43 apresenta o *framework* completo projetado para a cadeia de suprimentos. A aplicação do modelo num estudo foi realizada para validação do modelo, conforme proposta do próximo capítulo, possibilitando, assim, entender a contribuição potência da I4.0 para os desafios da sustentabilidade.

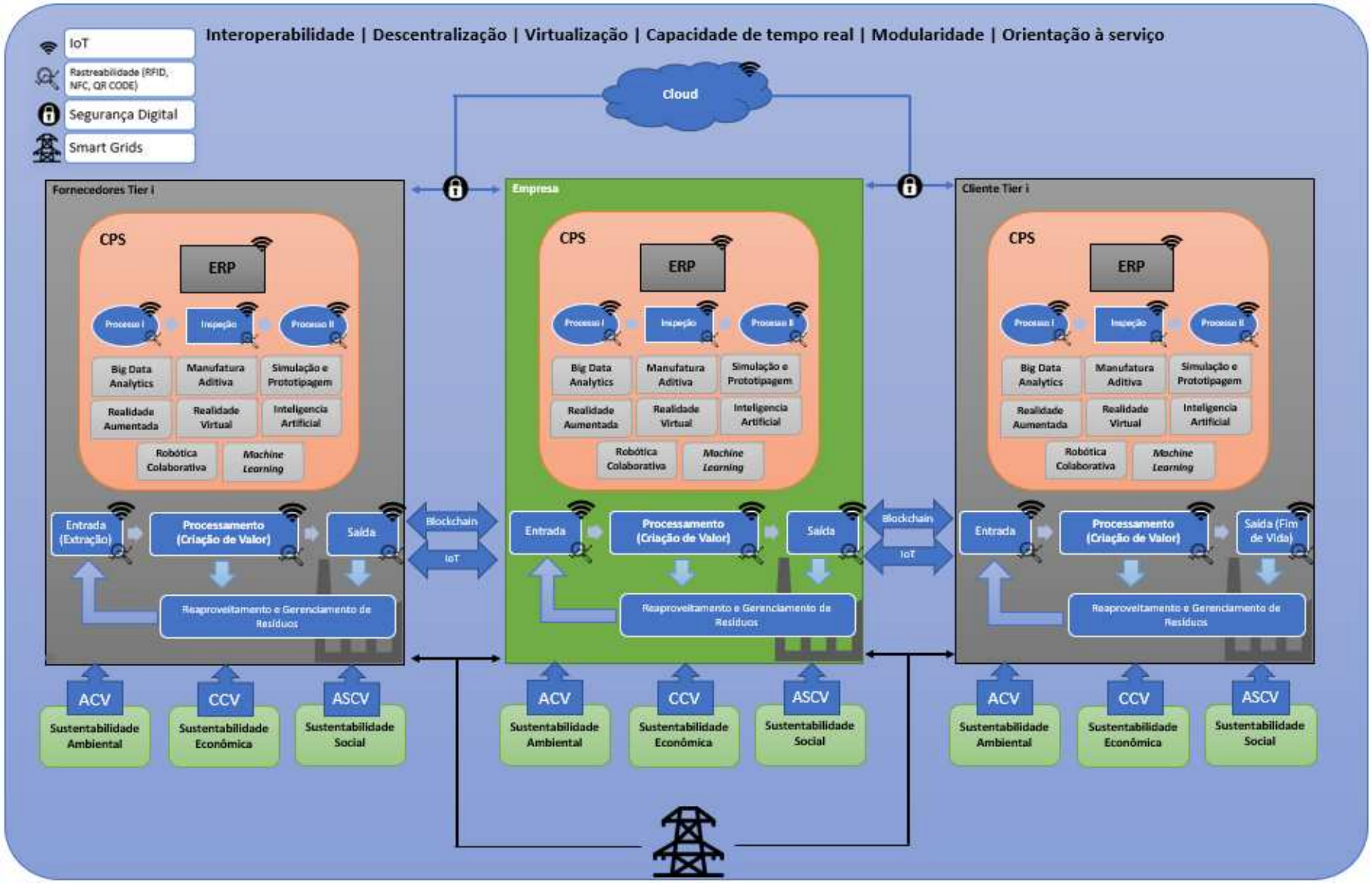


Figura 43 – Projeção do *framework* integrando I4.0 e sustentabilidade no nível de cadeia
Fonte: Elaboração própria.

Capítulo 6 – Estudo de Caso

Dadas as contribuições dos autores e identificadas as lacunas de aplicação, o presente capítulo apresenta a realização de um estudo de caso como procedimento para validar o *framework* a um segmento específico.

Aplicando-se os métodos e conceitos utilizados para concepção do modelo em questão, a aplicação do estudo de caso foi dividida em cinco partes principais, conforme resume a Figura 44.

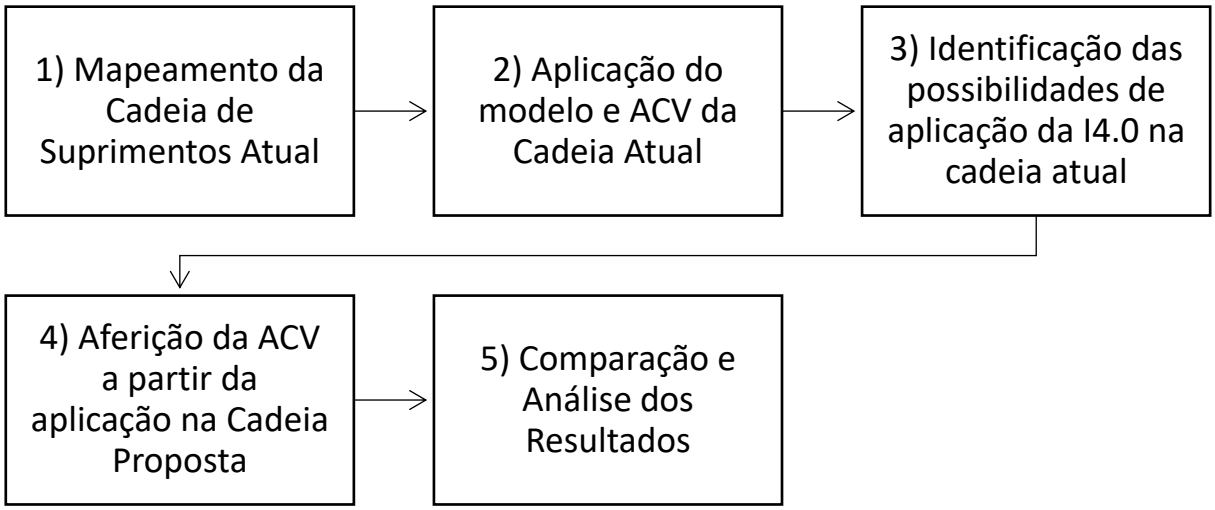


Figura 44 - Fluxograma com passos do estudo de caso.
Fonte: Elaboração própria.

As próximas seções irão detalhar cada um dos passos, desde a delimitação do produto e mapeamento da cadeia até a elaboração das considerações finais, incluindo também uma sessão adicional com as delimitações

6.1 Mapeamento da Cadeia de Suprimentos Atual

Essa etapa tem como objetivo realizar o mapeamento da cadeia atual sem a aplicação dos princípios da I4.0. Tendo em vista que a justificativa e a contextualização do presente trabalho definem o segmento de aplicação como sendo a indústria de prótese ortopédica, a definição do escopo para o mapeamento consiste na seleção da empresa, família de implantes e do produto a ser analisado. A partir da seleção do produto, seguiu-se com o mapeamento dos processos da cadeia de suprimentos necessária para transformação do produto nos fornecedores e na empresa foco do estudo de caso, como definem os próximos tópicos dessa sessão.

A empresa foco do estudo de caso, denominada nos termos da RDC 16:2013, norma da Anvisa que regulamenta o segmento ortopédico, como fabricante, fica situada no interior de São Paulo e atua principalmente no mercado brasileiro com significativa parcela do mercado na fabricação e distribuição de implantes principalmente para substituição de articulações afetadas por patologias ósseas crônico-degenerativas e traumas.

6.1.1 Seleção do implante

Na empresa foco do estudo de caso são produzidas dez diferentes famílias de implantes, conforme mostra a Tabela 4, que traz a quantidade média produzida mensalmente e o respectivo percentual de representação em relação ao total de faturamento da empresa.

Tabela 4 - Produtos e Origens

Família de Implantes	Origem	Peças Produzidas Média Mensal	% do Valor Total de Faturamento
Quadril	Alemanha, França, Espanha e Portugal	4.842	36%
Joelho	**Brasil**	**2.450**	**19%**
Coluna	Produção interna	6.646	16%
Trauma	Produção interna	7.703	13%
Crânio-maxilo-facial	Produção interna	7.125	5%
Endo prótese	Alemanha	414	4%
Cimento e Acessórios	Argentina	776	3%
Medicina Esportiva	Estados Unidos	1.164	2%
Extremidades	Produção interna	1.345	2%
Ombro	Produção interna	5	0%
Total		**32.473**	**100%**

Fonte: Elaboração própria

Os implantes de quadril, primeiro lugar em representatividade de valor, possuem a maior parte das etapas produtivas descentralizadas e executadas em diversos países da Europa. Os implantes de joelho, ocupando a segunda colocação na escala de valor, tem parte significativa de sua rota de fabricação centralizada num único fornecedor no Brasil. Logo, em virtude da facilidade de obtenção dos dados da cadeia de suprimentos local, optou-se pela família de implantes para joelho.

O produto escolhido para realização do estudo foi um componente do sistema de substituição das articulações do joelho denominado componente tibial, como mostra a Figura 45. O item em questão tem a produção anual de aproximadamente 10.000 unidades considerando todos os tamanhos que compõem a família do produto.

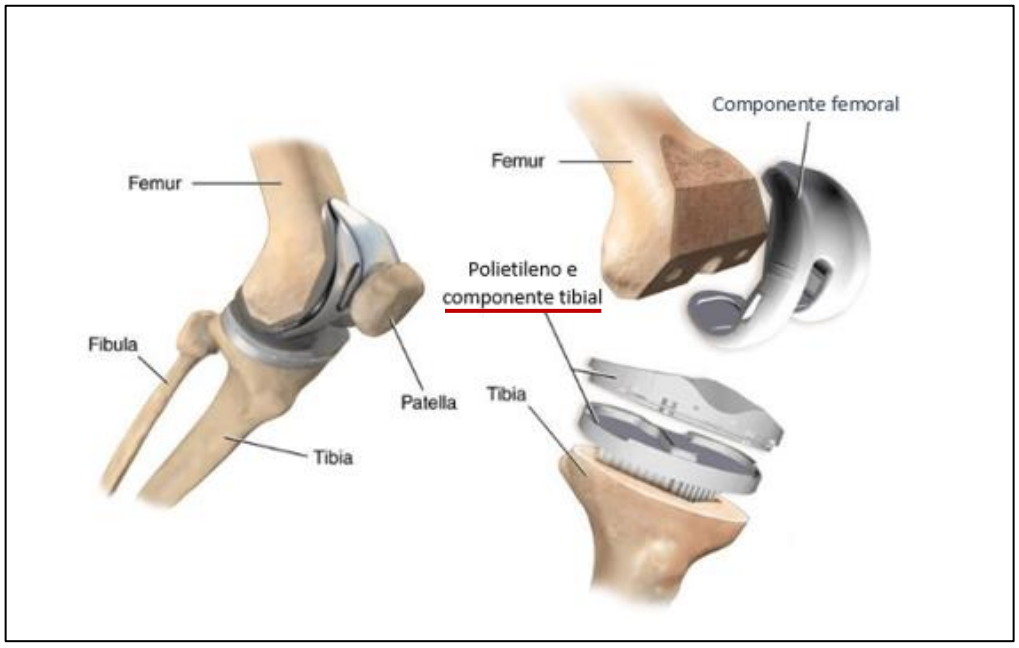


Figura 45 - Próteses para reposição de articulação do joelho
Fonte: Adaptado de Karam e Lopes (2005, s.p.).

O componente tibial, também conhecido como base tibial, é produzido utilizando uma liga normatizada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como F75, cuja composição química está expressa na Tabela 5.

O mapeamento da cadeia se deu via coleta de dados documentais e extração de dados de sistemas de informação, partindo da identificação das etapas que precedem e sucedem a chegada do material na fábrica onde está centralizado o trabalho, desde a origem da matéria prima até a disposição final do produto. A rota de fabricação do implante em questão passa por um fornecedor *tier 1* e é finalizada na unidade fabril da empresa foco do estudo de caso.

Tabela 5 - Composição da Liga ASTM F75

ELEMENTO	PORCENTAGEM
Cromo (Cr)	27,0 – 30,0
Molibdênio (Mo)	5,0 – 7,0
Níquel (Ni)	0 ,50 Máx.
Ferro (Fe)	0,75 Máx,
Carbono (C)	0,35 Máx.
Silício (Si)	1,00 Máx.
Manganês (Mn)	1,00 Máx.
Tungstênio (W)	0,20 Máx.
Fósforo (P)	0,020 Máx.
Enxofre (S)	0,010 Máx.
Nitrogênio (N)	0,25 Máx.
Alumínio (Al)	0,10 Máx.
Boro (B)	0,01 Máx.
Titânio	0,10 Máx.
Cobalto (Co)	Balanço

Fonte: Adaptado de ASTM F75 (2006).

6.1.2 Mapeamento de processos do fornecedor

A produção do implante em questão ocorre através de um processo de manufatura tradicional de micro fundição por cera perdida. As operações necessárias para transformação da matéria-prima no produto semiacabado foram mapeadas a partir da observação dos processos, consulta a documentos e ao ERP em visitas presenciais realizadas às quatro empresas fornecedoras do serviço de micro fundição que trabalham com biomateriais para ortopedia no Brasil, sendo três no estado de São Paulo e uma em Florianópolis, Santa Catarina, entre novembro de 2019 e março de 2020.

Apesar de haver pequenas diferenças entre a forma de realizar alguns processos entre as empresas visitadas, a ordem, métodos e equipamentos para realizar operações principais mapeadas foram equivalentes em todas, como resume a Figura 46.

Considerando a equivalência entre os processos, a tomada das informações mais detalhadas sobre os dados necessários para a ACV foi feita a partir de uma das empresas no interior de São Paulo por conta da facilidade de acesso e disposição no fornecimento dos dados.

Ao final do processamento realizado no fornecedor, se obtém a peça micro fundida com as dimensões próximas à da peça final, atendendo as especificações de composição

química e aos requisitos mecânicos e metalográficos do implante. A adequação da peça à dimensão final solicitada só é possível com processos de usinagem e polimento precisos, seguidos da assepsia completa inerente à natureza do produto. Esses processos são feitos pela empresa estudada e serão detalhados na sequência.

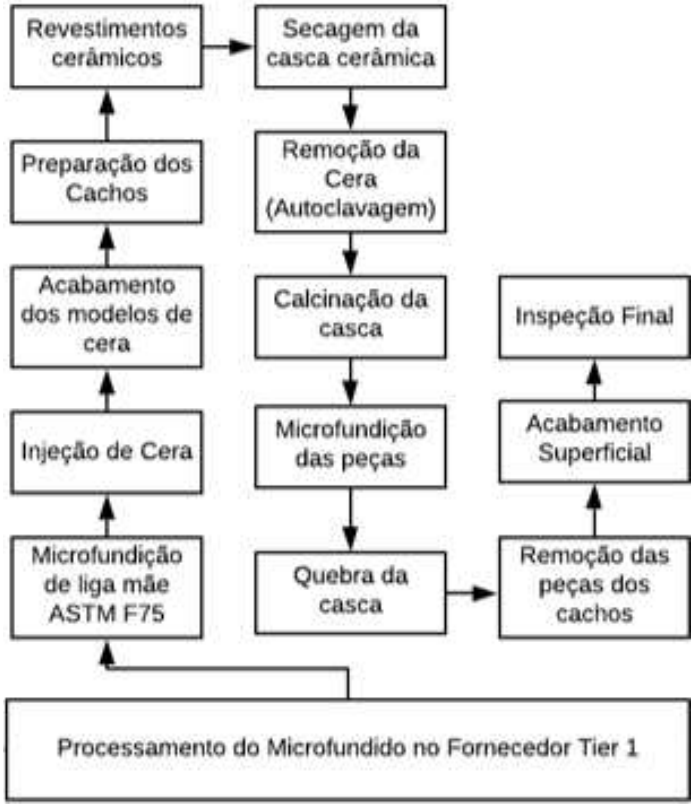


Figura 46 - Mapeamento do processo de micro fundição.
Fonte: Elaborado a partir do *framework* proposto.

6.1.3 Mapeamento de processos da empresa fabricante

Após o recebimento dos componentes tibiais microfundidos do fornecedor, os mesmos são submetidos a uma rigorosa inspeção de recebimento. Na sequência, são executados os processos de usinagem, medição, acabamento, limpeza inicial, jateamento, limpeza final, gravação a laser para inclusão de número de lote e garantia de rastreabilidade, passivação, inspeção final, embalagem e esterilização, como resume a Figura 47.

As operações destacadas em azul na Figura 47 foram removidas do escopo da ACV pois, independentemente do tipo de processo que originou o semiacabado a ser processado, são requisitos regulatórios e técnicos que precisam ser mantidos para garantir a assepsia, rastreabilidade e esterilidade dos implantes (BRASIL, 2001). Dessa forma, estão presentes em todas as cadeias (com ou sem I4.0). Os processos anteriores ao do fornecedor primeira camada

(*tier 1)* e posteriores à venda do produto pelo fabricante não serão abordados no presente estudo devido à delimitação de fronteira definida, conforme exposto no próximo tópico.

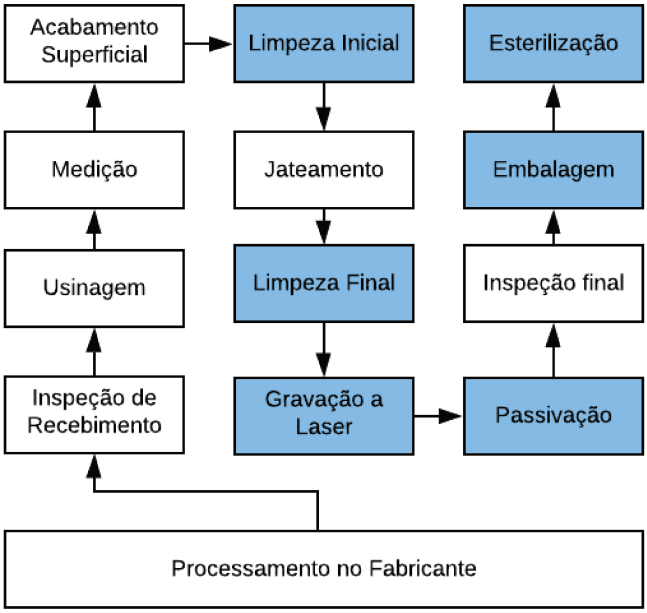


Figura 47 - Processos mapeados no fabricante
Fonte: Elaborado a partir do *framework* proposto.

6.1.4 Delimitação de fronteiras

A delimitação das fronteiras do sistema é feita para adequar o escopo do trabalho as restrições de tempo e informações disponíveis (GATTI; DE CASTILHO QUEIROZ; GARCIA, 2008), logo, o escopo do trabalho foi limitado ao processo de fabricação do componente tibial na empresa foco do estudo de caso e no fornecedor de primeira camada (*tier 1)*, responsável por cerca de 80% do processo produtivo do implante final.

A delimitação proposta também reforça que apenas os dados relacionados diretamente ao processo de manufatura serão analisados, tais como consumo de energia, matéria prima, investimentos em equipamentos e acessórios e custos de mão de obra direta. Os transportes, as etapas de embalagem e esterilização, os serviços de distribuição e demais processos realizados pós cliente 1 não foram analisados por serem comuns às duas cadeias, com e sem I4.0.

Considerando o mapeamento da cadeia de suprimentos e dos processos do fornecedor e as restrições da delimitação proposta, temos então a cadeia atual definida como mostra a Figura 48. Os próximos passos consistem na aplicação das técnicas de ACV conforme sugestão do *framework* proposto.

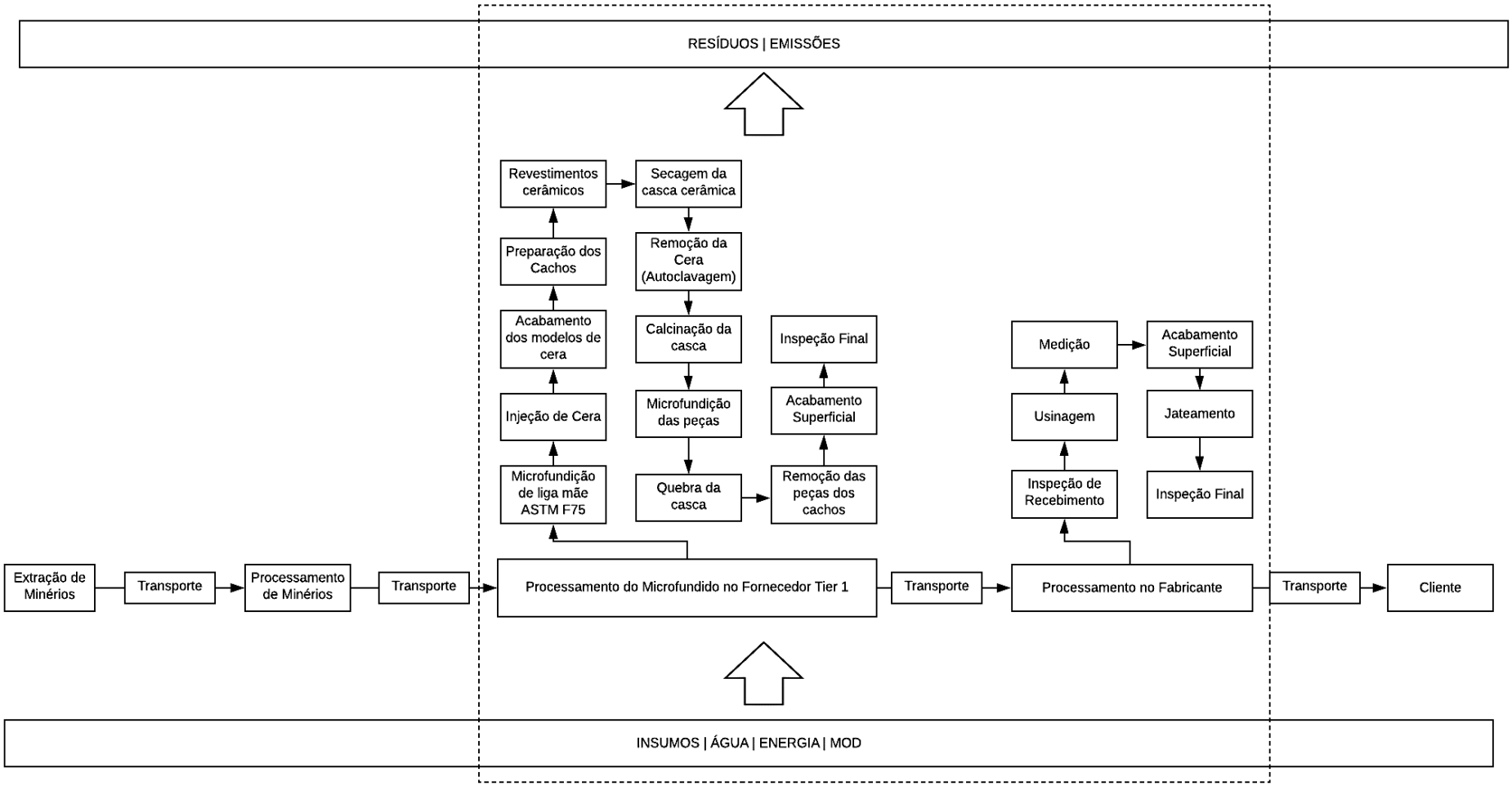


Figura 48 - Mapeamento da cadeia da indústria de próteses com destaque nas fronteiras do sistema analisado.
Fonte: Elaborado a partir do *framework* proposto.

6.2 Aplicação do modelo e ACV da cadeia atual

Nessa etapa, foram identificados por meio de coleta de dados documentais e extração de dados de sistemas de informação os indicadores de ACV, conforme modelo proposto por Garcia-Muiña *et al.* (2018). Também foram utilizados os passos para um estudo de ACV propostos pela norma ABNT NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura:

1. Definição do Objetivo e escopo;
2. Análise de Inventário;
3. Avaliação de Impactos;
4. Interpretação.

A primeira fase consiste em definir o objetivo e escopo da ACV utilizados tanto na cadeia atual quanto na cadeia proposta (com uso da I4.0). Na sequência, a análise de inventário define os indicadores e métodos de coleta utilizados para o ACV, CCV e ASCV nas duas cadeias, incluindo o detalhamento de cada tópico. Por fim, a avaliação de impactos e a interpretação foram realizadas em ambas as cadeias para correlacionar os indicadores da ACV aos ODS impactados.

6.2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo do estudo da ACV aqui conduzido é identificar os impactos da cadeia de fabricação tradicional do componente tibial na sustentabilidade do mesmo, comparando com a proposta de cadeia utilizando os princípios e tecnologias da I4.0.

Assim, o escopo do ACV é descrito a seguir:

a. Produto a ser estudado: componente tibial.
b. Funções do produto a ser analisada no estudo comparativo: componente protético metálico que exerce a função de substituição de parte da articulação do joelho.
c. Unidade funcional: uma unidade do produto componente tibial.
d. Fronteira do sistema: serão analisados os processos elementares do fornecedor *tier 1* e da indústria foco do estudo de caso. Não serão analisados os processos anteriores ao fornecedor *tier 1*, como a obtenção das matérias primas na origem, e os processos posteriores as etapas realizadas no fabricante, como a embalagem, esterilização e

envio do produto para os clientes. Tanto as etapas anteriores quanto as posteriores se mantêm praticamente as mesmas em ambos os modelos (tradicional e utilizando I4.0). Nessa etapa também se definiram os limites:

- Temporais: os dados foram coletados entre dezembro de 2019 e abril de 2020.
- Geográficos: os dados foram coletados em empresas do interior do estado de São Paulo. Os dados referentes a variáveis de cálculos, como Fator de Emissão do Sistema Nacional de Energia, o custo da mão de obra e o custo da energia podem variar dependendo da região da condução de novos estudos.
- Tecnológicos: a maior parte dos dados foi calculada utilizando tempos de processo cadastros em sistema e disponíveis em folhas de processo diretamente nas plantas visitadas. Logo, a incerteza dos dados é sujeita à precisão das informações disponibilizadas.

e. Categorias e metodologia para avaliação dos impactos selecionados: os impactos serão medidos de acordo com cada indicador levantado, relacionando-os com os respectivos ODS.
f. Requisitos de dados: como definido pela norma ABNT NBR ISO 14040:2009, os dados coletados podem ser medidos, calculados ou estimados. A descrição do método de coleta de cada dado foi destacada nos respectivos tópicos.
g. Limitações: o escopo do trabalho foi restrito a delimitação de fronteira proposta devido a disponibilidade de dados e recursos.
h. Requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados: os dados foram coletados de documentos, bases de dados de ERP e diretamente de processos. A qualidade dos dados está sujeita à precisão das informações dispostas pelo fornecedor e fabricante.

Considerando que há apenas um produto a ser estudado, os procedimentos de alocação que correlacionam física e economicamente os fluxos de produtos diferentes abordados numa mesma análise de ciclo de vida não são necessários.

6.2.2 Análise de Inventário

Na fase da análise de inventário são definidos os indicadores e suas respectivas unidades de comparação, método de coleta e de cálculo. Depois de coletados ou calculados, os indicadores devem ser convertidos em função da unidade funcional selecionada na definição de escopo. O lote de fabricação do implante em questão é de 220 peças. Logo, os valores encontrados serão divididos por 220 para adequação à unidade funcional.

Os indicadores selecionados para o trabalho são resumidos no Quadro 16. A escolha foi feita com base nos artigos da RSL e condicionada aos dados disponíveis. Os dados foram coletados em cada etapa de processo e foram sumarizados de forma a possibilitar o dimensionamento da ACV em cada dimensão da sustentabilidade.

Quadro 16 - Indicadores da ACV

Ferramenta	**Indicador**	**Unidade**	**Método de Coleta**
LCA (Ambiental)	Consumo de Energia	kWh	Cálculo de consumo utilizando Equação (1).
	Consumo de Matéria Prima (aproveitamento, produção de resíduos recicláveis e não recicláveis)	kg	Consumo aferido no processo (balança industrial)
	Emissões de CO_2	Kg CO_2	Cálculo de emissões utilizando Equação (2)
LCC (Econômico)	Custo de investimento em máquinas, ferramentais e acessórios	R$	Valor médio cotado dos equipamentos utilizados
	Custo de energia	R$ kWh	Valor por kWh
	Custo de matéria prima	R$	Custo da matéria prima
	Custo de MOD	R$	Custo de mão de obra empregada no processo
S-LCA (Social)	Oferta de empregos	und	Posições necessárias considerando CBO de cada função
	Média de Salário	R$	Média salarial sem encargos base CAGED/MTE
	Exposição a risco	Escala	Exposição a riscos ocupacionais e ambientais

Fonte: Elaborado a partir do *framework* proposto.

Como ferramenta para auxiliar no mapeamento dos processos, foi proposto um formulário geral para identificação de todos as máquinas, ferramentas, acessórios, recursos e mão de obra necessários em cada processo. A Figura 49 apresenta um recorte do formulário

contendo um exemplo de preenchimento. O número de identificação na frente de cada máquina é um índice para localização do equipamento na Tabela 6 elaborada para consolidar os dados e cálculos necessários para a condução da ACV.

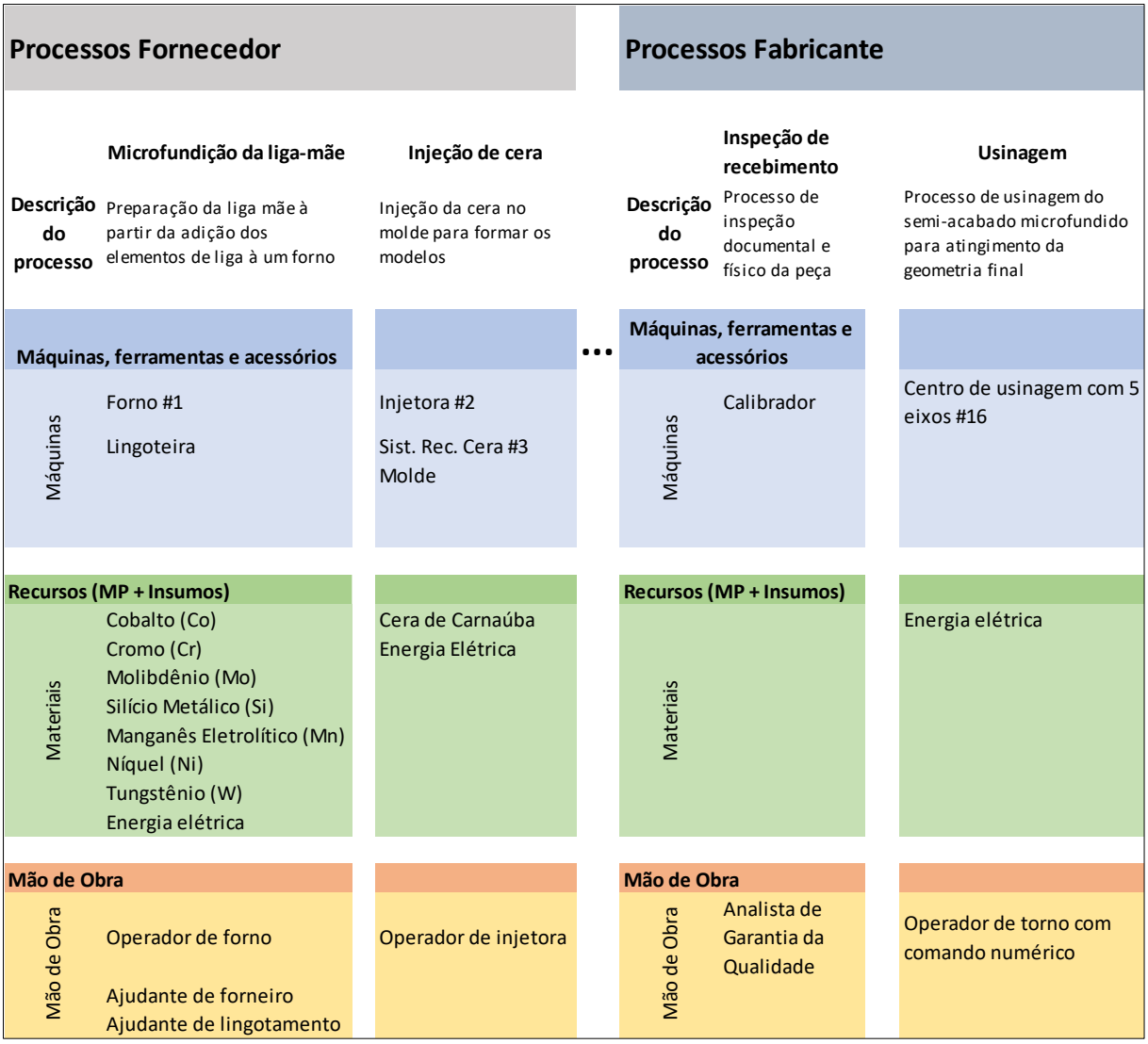


Figura 49 – Recorte do Formulário para mapeamento dos processos.
Fonte: Elaborado a partir do *framework* proposto.

A partir do mapeamento feito pelo formulário da Figura 49, foram criadas tabelas adicionais para a consolidação dos dados e execução dos cálculos necessários. O detalhamento dos cálculos foi realizado na explanação de cada indicador.

A Tabela 6 relaciona os equipamentos utilizados em cada processo no fornecedor e no fabricante, detalhando a descrição, valor médio cotado, tempo de uso para fabricação de 1 lote, potência instalada, consumo de energia e emissões. Os equipamentos que compõem o processo da empresa fabricante estão numerados com os índices #16, #17 e #18.

Tabela 6 - Mapeamento de equipamentos do processo tradicional

#	Descrição	Processos	Valor (R$)	Tempo de Uso no processo (h)	Potência Instalada do Eqto (kW)	Consumo energia por lote (kWh)	Consumo energia und. Funcional (kWh)	Emissões (kg CO_2 /lote)	Emissões (kg CO_2 /und))
Fornecedor									
#1	FORNO DE INDUÇÃO PARA FUNDIÇÃO MARCA SERVTHERM MODELO MK8. 125KW, 3000 HZ, 480V	Fundição da liga e fundição das peças	750.000	3,00	125,00	375,00	1,70	194,29	0,8831
#2	INJETORA DE CERA MARCA CECOMATEC - FORÇA DE FECHAMENTO 15t, pressão de injeção de até 210 bar. Curso de abertura máximo 700 mm	Injeção dos modelos de cera	272.400	1,50	10,00	15,00	0,07	7,77	0,0353
#3	SISTEMA DE PREPARAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE CERA - CECOMATEC - TEMPERATURA DE OPERAÇÃO 125ºC - CAPACIDADE 500l - HOMOGEINIZAÇÃO COM PÁS E RASPAGEM	Preparação e recuperação de cera	47.640	36,00	7,50	270,00	1,23	139,89	0,6359
#4	TANQUE DE LAMA COM AGITADOR - 1100(L) X 900 (P) X 1100 (A)mm - DIMENSÕES INTERNAS 800 X 750MM - CAPACIDADE 370L Rotação 26-27 RPM - POTÊNCIA DO MOTOR 2CV -	Banho 1 - Primeira Lama	46.440	0,50	1,47	0,74	0,00	0,38	0,0017
#5	CHUVA DE AREIA / CHAMOTE 1000(L) X 1500 (P) X 2700 (A)mm COM SISTEMA DE ELEVAÇÃO - CAPACIDADE 150KG	Banho 1 - Primeira Lama - Chuva de Areia Zircônio	39.600	0,50	2,20	1,10	0,01	0,57	0,0026
#6	TANQUE DE LAMA COM AGITADOR - 1100(L) X 900 (P) X 1100 (A)mm - DIMENSÕES INTERNAS 800 X 750MM - CAPACIDADE 370L Rotação 26-27 RPM - POTÊNCIA DO MOTOR 2CV	Banho 2 - Segunda Lama	48.600	0,50	1,47	0,74	0,00	0,38	0,0017
#7	CHUVA DE AREIA / CHAMOTE 1000(L) X 1500 (P) X 2700 (A)mm COM SISTEMA DE ELEVAÇÃO - CAPACIDADE 150KG	Banho 2 - Chuva de areia chamote fino	39.600	0,50	2,20	1,10	0,01	0,57	0,0026
#8	TANQUE DE LAMA COM AGITADOR - 1100(L) X 900 (P) X 1100 (A)mm - DIMENSÕES INTERNAS 800 X 750MM - CAPACIDADE 370L Rotação 26-27 RPM - POTÊNCIA DO MOTOR 2CV	Banho 3 - Terceira lama	48.600	0,50	1,47	0,74	0,00	0,38	0,0017
#9	CHUVA DE AREIA / CHAMOTE 1000(L) X 1500 (P) X 2700 (A)mm COM SISTEMA DE ELEVAÇÃO - CAPACIDADE 150KG	Banho 3 - Chuva de areia Chamote grosso	39.600	0,50	2,20	1,10	0,01	0,57	0,0026
#10	SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE (SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO) 58.000BTU - 17kwh - Capacidade 10 lotes simultâneos	Secagem dos cachos	12.000	96,00	1,70	163,20	0,74	84,55	0,3843

Tabela 6 - Mapeamento de equipamentos do processo tradicional - Continuação

#	Descrição	Processos	Valor (R$)	Tempo de Uso no processo (h)	Potência Instalada do Eqto (kW)	Consumo energia por lote (kWh)	Consumo energia und. Funcional (kWh)	Emissões (kg CO_2 /lote)	Emissões (kg CO_2 /und))
#11	AUTOCLAVE (BOILERCLAVE) SLTA-100 - 360L - 10 Kgf/cm2 - 180ºC - WECO	Remoção de cera	310.000	2,00	90,00	180,00	0,82	93,26	0,4239
#12	FORNO DE CALCINAÇÃO 1720(L) X 1250 (P) X 800 (A)mm - TEMPERATURA 1200C - ALIMENTAÇÃO GÁS GLP	Calcinação	157.200	3,00	68,50	205,50	0,93	106,47	0,4840
#13	MARTELETE DESMOLDADOR - CURSO 400mm - Pneumático	Remoção das peças dos cachos	46.560	0,50	13,70	6,85	0,03	3,55	0,0161
#14	LIXADEIRA DE CINTA CECOMATEC - MODELO ERG AR - 33m/s - 50x3000mm	Acabamento e remoção do massalote	21.200	1,00	2,20	2,20	0,01	1,14	0,0052
#15	SISTEMA DE JATEAMENTO COM COMPRESSOR - CABINE JATEAMENTO 900 X 900mm - COMPRESSOR 120 PÉS	Acabamento	19.000	1,00	2,20	2,20	0,01	1,14	0,0052
		Total Fornecedor	**1.898.440**	**147,00**	**331,81**	**1.225,46**	**5,57**	**634,91**	**2,89**
		Fabricante							
#16	Cento de Usinagem Romi D1250 ano 2009 c/ 4º eixo 10.000 RPM Comando FANUC	Usinagem	330.000	248,60	1,80	447,48	2,03	231,84	1,0538
#17	Lixadeira de Cinta para Metais 100 x 1220mm - 2 hp - MANROD-MR125	Acabamento superficial (lixamento/polimento)	2.900	17,60	1,49	26,22	0,12	13,59	0,0618
#18	SISTEMA DE JATEAMENTO COM COMPRESSOR - CABINE JATEAMENTO 900 X 900mm - COMPRESSOR 120 PÉS	Jateamento	19.000	2,00	2,20	4,40	0,02	2,28	0,0104
		Total Fabricante	**351.900**	**268,20**	**5,49**	**478,10**	**2,17**	**247,71**	**1,13**
		Total Geral	**2.250.340**	**415,20**	**337,30**	**1.703,56**	**7,74**	**882,61**	**4,01**

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Assim, a partir do mapeamento da cadeia atual e do processamento no fornecedor *tier 1* e no fabricante, os indicadores da análise de inventário foram calculados conforme descrevem os tópicos seguintes.

Consumo de energia elétrica

Tendo em vista a crescente demanda por energia e a eminência do esgotamento das matrizes energéticas não renováveis, aferir o consumo energético dos processos é fundamental para avaliar o impacto ao ODS 7, relativo a assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos.

O cálculo de consumo de energia elétrica utilizado para determinar a energia necessária para fabricação do componente tibial é dado a partir da Equação 1:

$$C_e = \sum_{i=1}^{n} P.\Delta t \qquad (1)$$

C_e: Consumo de Energia elétrica (kW)

P: Potência instalada do equipamento (kW)

Δt: tempo de operação (h)

i: processos fabris

Como resumido na Tabela 6, temos então que o consumo energético para a fabricação do lote completo é de 1703,56 kWh, que convertido na unidade funcional resulta em 7,74 kWh por componente tibial.

Consumo de matéria prima

Considerando a origem mineral da matéria-prima, a aferição do consumo por unidade funcional é fundamental para avaliação do impacto aos ODS 3 (assegurar acesso a recursos para vida saudável), 9 (promover a industrialização sustentável) e 12 (consumo e produção sustentáveis).

O consumo de matéria-prima, assim como o peso total do lote de fabricação foram aferidos no processo utilizando balanças industriais, como resume a

Tabela 7. Cada lote é dimensionado com 150kg devido à capacidade do forno e cadinho utilizados no processo.

Tabela 7 - Composição da matéria prima utilizada no processo

Descrição	Quantidade	Und	Valor Unit	Valor Total
Cobalto (Co)	93,87	kg	236,5	22.199,62
Cromo (Cr)	43,18	kg	53,58	2.313,53
Molibdênio (Mo)	9,39	kg	255,6	2.399,25
Silício Metálico (Si)	1,41	kg	10,62	14,95
Manganês Eletrolítico (Mn)	1,41	kg	17,63	24,82
Níquel (Ni)	0,47	kg	88,86	41,71
Tungstênio (W)	0,28	kg	198,4	55,87
Peso total de um lote	**150,00**	**kg**	**Total**	**27.049,75**

Fonte: Elaborado com base na ACV

Considerando que o peso unitário da peça é de 270 gramas e a quantidade final de peças produzidas é de 220 unidades, consistindo em 20 cachos de 10 unidades, o peso total convertido em peças é de 58,52kg, resultando num aproveitamento de 39%. Segundo informação de processo do fornecedor, os canais de ligação entre as peças necessários na montagem dos cachos precisam conter massa suficiente para garantir que o fluxo da liga para dentro das cascas cerâmicas ocorra, visto que o processo de envase ocorre de forma gravitacional, evitando assim que ocorram deformidades estruturais, rechupes e porosidade no interior das peças.

Tabela 8 - Aproveitamento do processo de micro fundição

	Peso (em kg)	%
Peças Fabricadas	58,52	39%
Canais dos cachos	76,88	51%
Resíduos não reaproveitáveis	15,00	10 %
Total	**150,00**	**100,0%**

Fonte: Elaborado com base na ACV

Logo, considerando o percentual de perca do processo de 10%, como mostra a Tabela 8, temos que o consumo de matéria prima por unidade funcional é de 0,293 kg.

Além do consumo de matéria prima, o processo de micro fundição por cera perdida tem como característica a impossibilidade do aproveitamento das cascas cerâmicas. A Tabela 9 resume os insumos necessários para a fabricação do lote de 150kg e da unidade funcional.

Tabela 9 - Insumos utilizados no processo de micro fundição

#	Processos	Insumos Utilizados	Qtd por lote (kg)	Qtd por und (em kg)	Valor Unit (R$)	Valor total por lote(R$)	Valor por Unidade (R$)
#4	Banho 1 - Primeira Lama	SILICA E FARINHA DE ZIRCONITA	4,76	0,02	61,41	292,31	1,33
#5	Banho 1 - Primeira Lama - Chuva de Areia Zircônio	AREIA DE ZIRCONITA	6,24	0,03	14,95	93,29	0,42
#6	Banho 2 - Segunda Lama	SILICA	9,63	0,04	17,20	165,64	0,75
#7	Banho 2 - Chuva de areia chamote fino	AREIA DE ZIRCONITA	9,63	0,04	14,95	144,00	0,65
#8	Banho 3 - Terceira lama	SILICA	9,63	0,04	17,20	165,64	0,75
#9	Banho 3 - Chuva de areia Chamote grosso	CHAMOTE	9,63	0,04	5,38	51,76	0,24
Total			**49,52**	**0,23**		**912,63**	**4,15**

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Como resumido, os 49,52kg de insumos não são reaproveitados na microfundição, configurando-se como resíduos gerados no processo. Esses resíduos são destinados a empresas de produção de refratários onde são convertidos em tijolos e revestimentos para fornos e churrasqueiras.

Cálculo de emissões de CO_2

As emissões de CO_2 consistem num importante indicador de contribuição para o efeito estufa e impactam diretamente os ODS 12 (consumo e produção sustentáveis) e 13 (combate a mudanças climáticas).

De acordo com Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, ou *Intergovernmental Panel on Climate Change*, (IPCC), os principais indicadores que mensuram o impacto nas mudanças climáticas podem ser definidos pelas emissões diretas quilogramas de

CO_2 a atmosfera (kg CO_2) e pela conversão de outras emissões, como CH_4 e N_20, em quilogramas de CO_2 equivalentes (kg CO_2e) (IPCC, 2006).

De acordo com Castro, Pereira e Freitas (2018), no segmento de fundição metalúrgica, entre os quatro principais gases que contribuem para aumento do efeito estufa, o CO_2 representa mais de 99% do total das emissões, logo, a unidade definida para o presente estudo foi a de kg CO_2 direta.

Considerando que a parte predominante das máquinas ao longo da cadeia são alimentadas por energia elétrica, o cálculo emissões de CO_2 foi feito com base no escopo 2 do IPCC que analisa emissões decorrentes da geração de energia elétrica adquirida pela empresa resumido da Equação 2 (IPCC, 2006):

$$EC = C_e.F \qquad (2)$$

EC: Emissão CO_2

CE: Consumo de Energia elétrica (kWh)

FE: Fator de Emissão do Sistema Interligado Nacional (kgCO_2/kW/h)

O Fator de Emissão do Sistema Interligado Nacional utilizado foi obtido pela média do ano de 2019, conforme dados mais recentes publicados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações na Tabela 10:

Tabela 10 - Fator de Emissão Médio (kgCO_2/kWh) - Mensal

Mês	**Fator**
Janeiro	0,3540
Fevereiro	0,5573
Março	0,5075
Abril	0,5095
Maio	0,4794
Junho	0,4175
Julho	0,5914
Agosto	0,5312
Setembro	0,5606
Outubro	0,5370
Novembro	0,5720
Dezembro	0,5997
Média 2019	**0,5181**

Fonte: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações (2019)

A Equação 2 proposta foi utilizada para o cálculo das emissões por lote e por unidade funcional da Tabela 6, resultando em 882,61 kg CO_2 por lote e 4,01 kg CO_2 por unidade do produto.

Custo de investimento em máquinas, ferramentas e acessórios

Os custos levantados do LCC foram coletados entre março e abril de 2020 e para as estimativas de nacionalização foram utilizadas as taxas de conversão abaixo:

- Dólar para Real: 1 USD = R$ 4,50
- Euro para Real: 1 EUR = R$ 5,00

O custo total estimado dos equipamentos da cadeia tradicional é de R$ 2.250.340,00. Nesse caso, a conversão em relação à unidade funcional não faz sentido, uma vez que a estrutura da fábrica pode ser usada por um número *n* de ciclos.

Custo de energia

Para realização dos cálculos foi utilizada a tarifa de R$ 0,6282 por kWh, conforme tabela da concessionária distribuidora de energia elétrica da região do fabricante da categoria média e alta tensão fora ponta, ou seja, período fora do horário de pico de três horas diárias consecutivas com maior consumo e, por consequência, maior tarifa de energia (ELEKTRO, 2019).

Multiplicando os valores sumarizados pela Equação 1 à tarifa da energia, temos então o custo de R$ 1.070,18 por lote e R$ 4,86 por unidade funcional.

Custo de matéria-prima

O custo de matéria-prima (MP) foi calculado utilizando os dados das Tabelas 11, 12 e 13. Considerando o aproveitamento de 39% somado à perda de 10%, temos então o custo total de matéria prima emprega da na fabricação do lote é de 49% do valor total da MP, resultando em R$ 13.254,38. Convertendo em relação à unidade funcional tem-se R$ 60,25 como custo de MP.

Acrescentando a esses valores o custo dos insumos utilizados Tabela 9, temos respectivamente os custos de R$ 14.167,01 e R$ 64,40 para fabricação do lote e da unidade funcional.

Custo de mão de obra direta

Devido a preocupação de alguns autores como Birkel *et al.* (2019) com os riscos sociais da implantação da I4.0 em contraposição a autores como Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018) que propõem um ganho de segurança das operações, foram escolhidos os indicadores de custo de mão de obra direta, oferta de empregos, média salarial e exposição a riscos, diretamente relacionados com o ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico).

Para o levantamento das informações envolvendo mão de obra direta (MOD), foi proposto um formulário que utiliza a Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) informada pelo fornecedor e fabricante. Com base no CBO informado, algumas informações como média de salário e carga horária são publicamente disponíveis pelos portais do Ministério do Trabalho e Emprego.

Assim como as demais informações da CCV, o período de apuração dos dados foi entre março e abril de 2020.

O custo de mão de obra direta foi calculado conforme a equação 3

$$C_{MOD} = \sum_{i=1}^{n} C_{CBO}.\Delta t \quad (3)$$

C_{MOD}: Custo da mão de obra direta

C_{CBO}: Custo hora de cada CBO que participa da operação

Δt: tempo da operação

i: número da operação

Com base nos dados da Tabela 11, o custo de MOD somados os valores da média salarial de todas as posições necessárias para realização dos processos ao longo da cadeia do fornecedor e do fabricante. Assim tem-se então o custo de MOD por lote é de 3.015,29 e 13,71 por unidade funcional.

Tabela 11 - Mapeamento de mão de obra direta da cadeia tradicional

CBO	Descrição do cargo	Processo	Carga Horária Semanal	Média Salarial (R$/mês)	Salário Hora (R$/hr)	Tempo Processo (h)	Custo MOD Lote	Custo MOD und funcional
822115	Forneiro metalúrgico	1. Microfundição da liga mãe	43	2.022	9,47	1,00	9,47	0,04
821205	Ajudante de forneiro	1. Microfundição da liga mãe	40	1.757	8,75	1,00	8,75	0,04
722210	Ajudante de lingotamento	1. Microfundição da liga mãe	40	1.347	6,81	1,00	6,81	0,03
811770	Operador de Injetora de cera	2. Injeção de Cera	44	1.558	7,14	1,50	10,71	0,05
784205	Auxiliar de linha de produção	3. Acabamento modelo de cera	44	1.458	6,67	1,00	6,67	0,03
784205	Auxiliar de linha de produção	4. Montagem dos cachos	44	1.458	6,67	1,50	10,01	0,05
722325	Operador de Sistema de Areia Para Fundição	5. Revestimento - formação da casca	44	1.629	7,43	3,00	22,29	0,10
722220	Operador de Máquina Centrifugadora de Fundição	5. Revestimento - formação da casca	44	1.763	8,04	3,00	24,12	0,11
822115	Operador de forno metalúrgico (autoclave)	6. Remoção da cera (autoclave)	43	2.022	9,47	2,00	18,94	0,09
811205	Operador de Sistema de Calcinação	7. Calcinação	43	1.355	6,25	3,00	18,75	0,09
822115	Operador de forno	8. Microfundição das peças	43	2.022	9,47	2,00	18,94	0,09
821205	Ajudante de forneiro	8. Microfundição das peças	40	1.757	8,75	2,00	17,50	0,08
821205	Ajudante de forneiro	8. Microfundição das peças	40	1.757	8,75	2,00	17,50	0,08
722215	Operador de Acabamento de Peças Fundidas	9. Quebra da casca (martelo pneumático)	44	1.542	7,05	0,50	3,53	0,02
821450	Operador de esmeril e serra de disco	10. Remoção/separação peças dos cachos	44	1.649	7,52	1,00	7,52	0,03
821450	Operador de esmeril e serra de disco	11. Acabamento/remoção do massalote	44	1.649	7,52	1,00	7,52	0,03
821435	Operador de jato abrasivo	11. Acabamento/remoção do massalote	44	1.857	8,45	1,00	8,45	0,04
391205	Operador de inspeção de qualidade	12. Inspeção Final	44	1.843	8,46	2,00	16,92	0,08
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F01 - Inspeção de Recebimento	43	3.089	14,29	2,00	28,58	0,13
721430	Operador de torno com comando numérico	F02 - Usinagem	44	2.212	10,08	248,00	2.499,84	11,36
352305	Metrologista	F03 - Medição	43	2.737	12,67	3,00	38,01	0,17
721210	Operador de produção	F04 - Polimento	44	1.926	8,79	17,60	154,70	0,70
821435	Operador de jato abrasivo	F05 - Jateamento	44	1.857	8,45	2,00	16,90	0,08
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F06 - Inspeção Final	43	3.089	14,29	3,00	42,87	0,19
Total	**24**			**45.354**			**3.015,29**	**13,71**

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Oferta de Empregos e média salarial

A classificação da MOD direta necessária para cada operação foi feita considerando como base a Classificação Brasileira de Ocupações. Para a operação da cadeia tradicional são necessárias 24 posições diferentes. A média salarial dos funcionários da cadeia tradicional é de R$ 1.890, variando entre R$ 1.355 (Operador do Sistema de Calcinação) e R$ 3.089 (Analista de Garantia da Qualidade).

Exposição a risco

A Secretaria Especial de Previdência e Trabalho do Ministério da Economia, por meio das Normas Regulamentadoras (NR) 9, NR-12 e da Portaria no 25/1994, classifica os riscos ocupacionais em cinco tipos: físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e acidentais, como resume a Figura 50:

Figura 50 - Riscos Ocupacionais
Fonte: Adaptado de Iwamoto *et al.* (2008, s.p.)

Para identificação do nível de risco foi proposto um formulário para que o departamento de segurança do trabalho classificasse a exposição de cada posição de acordo com mapa de risco e estudo de Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA) considerando as áreas onde o colaborador fica a maior parte do seu tempo. A consolidação das respostas dos formulários recebidos digitalmente compõe a Tabela 12 - Mapeamento dos riscos ocupacionais e ambientais da cadeia tradicional. A análise dos riscos foi conduzida na etapa de avaliação de impactos e interpretação.

Tabela 12 - Mapeamento dos riscos ocupacionais e ambientais da cadeia tradicional

CBO	Descrição do cargo	Processo	Riscos físicos	Riscos químicos	Riscos biológicos	Riscos ergonômicos	Riscos de acidentes
822115	Forneiro metalúrgico	1. Microfundição da liga mãe	Elevado	Leve	N/A	Leve	Moderado
821205	Ajudante de forneiro	1. Microfundição da liga mãe	Moderado	Leve	N/A	Leve	Leve
722210	Ajudante de lingotamento	1. Microfundição da liga mãe	Elevado	Leve	N/A	Moderado	Moderado
811770	Operador de Injetora de cera	2. Injeção de Cera	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
784205	Auxiliar de linha de produção	3. Acabamento modelo de cera	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
784205	Auxiliar de linha de produção	4. Montagem dos cachos	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
722325	Operador de Sistema de Areia Para Fundição	5. Revestimento - formação da casca	N/A	Leve	N/A	Moderado	N/A
722220	Operador de Máquina Centrifugadora de Fundição	5. Revestimento - formação da casca	N/A	Leve	N/A	Moderado	N/A
822115	Operador de forno metalúrgico (autoclave)	6. Remoção da cera (autoclave)	Elevado	N/A	N/A	Leve	Moderado
811205	Operador de Sistema de Calcinação	7. Calcinação	Leve	N/A	N/A	Moderado	Moderado
822115	Operador de forno	8. Microfundição das peças	Moderado	Leve	N/A	Leve	Leve
821205	Ajudante de forneiro	8. Microfundição das peças	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
821205	Ajudante de forneiro	8. Microfundição das peças	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
722215	Operador de Acabamento de Peças Fundidas	9. Quebra da casca (martelo pneumático)	Moderado	N/A	N/A	Leve	Leve
821450	Operador de esmeril e serra de disco	10. Remoção/separação peças dos cachos	Moderado	N/A	N/A	Leve	Elevado
821450	Operador de esmeril e serra de disco	11. Acabamento/remoção do massalote	Moderado	N/A	N/A	Leve	Elevado
821435	Operador de jato abrasivo	11. Acabamento/remoção do massalote	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
391205	Operador de inspeção de qualidade	12. Inspeção Final	Leve	N/A	N/A	Leve	Leve
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F01 - Inspeção de Recebimento	Leve	N/A	N/A	Leve	Leve
721430	Operador de torno com comando numérico	F02 - Usinagem	Moderado	Leve	N/A	Moderado	Moderado
352305	Metrologista	F03 - Medição	Moderado	N/A	N/A	Moderado	Leve
721210	Operador de produção	F04 - Polimento	Moderado	N/A	N/A	Moderado	Moderado
821435	Operador de jato abrasivo	F05 - Jateamento	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F06 - Inspeção Final	Leve	N/A	N/A	Leve	Leve

Fonte: Elaborado a partir de ASCV.

6.3 Identificação da aplicação da I4.0 na cadeia produtiva

Seguindo o roteiro proposto pelo *framework* do presente trabalho, finalizado o mapeamento e aferição da ACV da cadeia de suprimentos atual, partiu-se para a fase das propostas de melhoria. Nessa etapa, com base nas indicações de aplicação dos autores da RSL, foram identificadas as possibilidades de utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 para proposta uma nova cadeia.

De acordo com as indicações de Bonilla *et al.* (2018), Sjödin *et al.* (2018) e Tsai e Lu (2018), a manufatura aditiva, tecnologia que utiliza os princípios de interoperabilidade, virtualização e capacidade de tempo real integrados com *IoT*, se apresenta como um processo industrial capaz de produzir peças de geometria complexa de forma eficiente, reduzindo desperdícios, consumo de matéria prima, energia e geração de resíduos. Desse modo, a proposta foi substituir o fornecedor *tier 1* da cadeia tradicional por um que utilize a tecnologia I4.0 de manufatura aditiva em conjunto com os princípios associados e, posteriormente, avaliar a fabricação do mesmo produto utilizados os métodos de ACV, CCV e ASCV sugeridos por Garcia-Muiña *et. al.* (2018).

O novo fornecedor *tier 1* analisado foi a AMS Engenharia, pioneira no Brasil em tecnologias de manufatura aditiva, que se dispôs a executar os testes e fornecer todas as informações de processo necessárias para a realização do ACV.

Os processos mais eficientes para manufatura aditiva são feitos por Deposição por Energia Direcionada (DED). Para impressão de materiais metálicos, a tecnologia indicada é a sinterização direta de metal por laser. Como define a ISO/ASTM 52900:2015 - *Additive manufacturing — General principles — Terminology*, neste processo, um feixe laser funde o metal de adição em pó, arame ou fita, de forma que a sobreposição de cordões e consecutiva sobreposição de camadas resulte na construção de peças tridimensionais de alta precisão (ASTM, 2015). Há ainda um processo de pré-aquecimento e resfriamento que ocorrem dentro do mesmo equipamento. Ao fim do processo, as peças são removidas da base, limpas e inspecionadas para expedição, como resume a Figura 51.

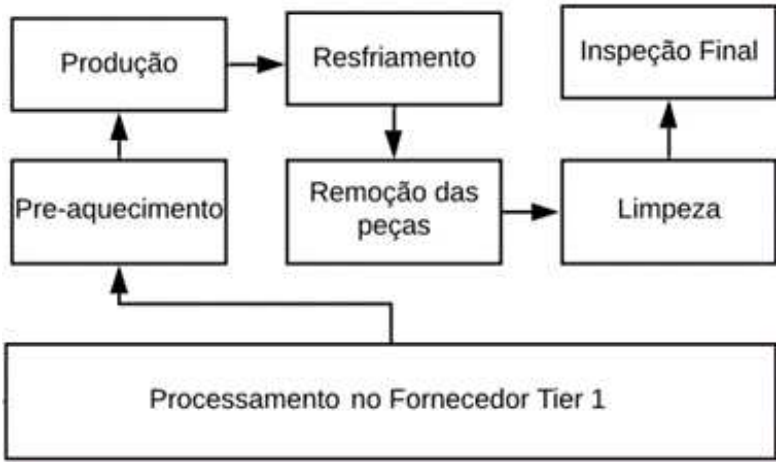


Figura 51 - Fluxo de processos proposto no fornecedor *tier 1* para a produção do componente tibial.
Fonte: Elaborado com base no *framework* proposto.

A utilização da manufatura aditiva resulta numa peça semiacabada com dimensões muito mais próximas do desejado na peça final, dispensando a necessidade de processos de usinagem e sua respectiva medição no fabricante. A nova cadeia para fabricação do componente tibial é representada na Figura 52.

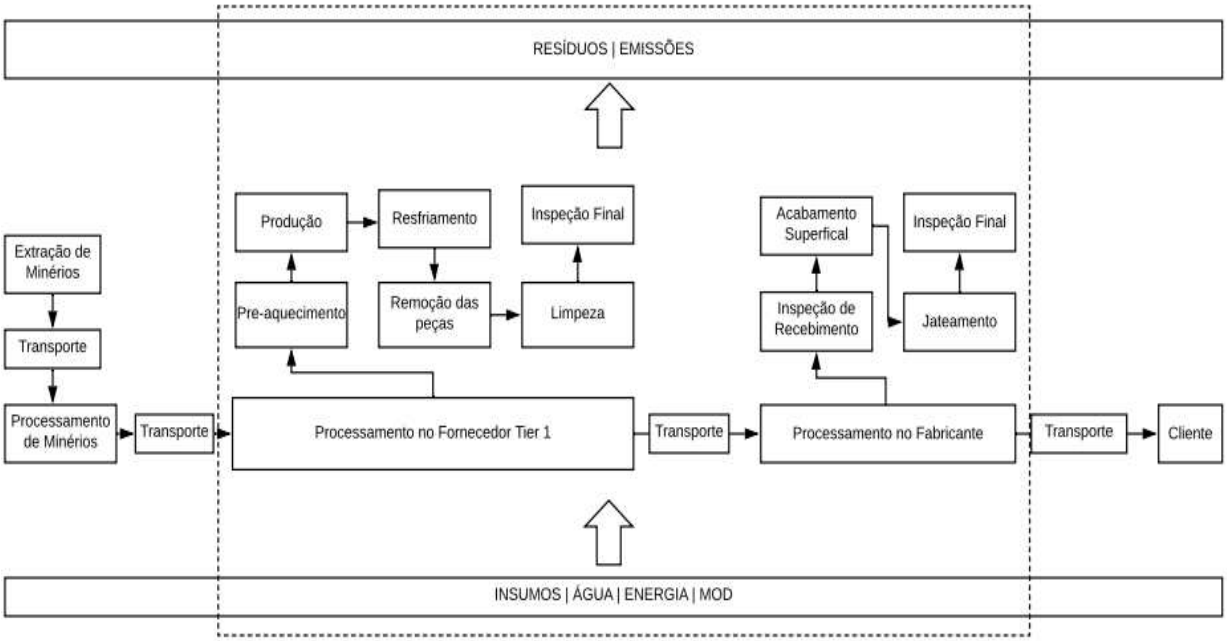


Figura 52 - Proposta de Cadeia para fabricação do componente tibial utilizando I4.0
Fonte: Elaborado a partir do *framework* proposto.

Considerando o material e geometria do implante, a máquina indicada pelo fabricante para a confecção do produto foi a EOS M290. De acordo com informações fornecidas pela empresa, a máquina tem capacidade de imprimir peças em alumínio, em ligas de titânio

Ti64ELI, ligas de aço inox 17-4PH e 316L e ligas de níquel, além do cobalto cromo ASTM F75 - *Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants*, material especificado para o implante em questão.

Figura 53 - Máquina EOS M 290
Fonte: Imagem fornecida por AMS Engenharia (2020, s.p.).

Definida a proposta de cadeia, a próxima etapa consiste em avaliar seu desempenho frente ao processo de fabricação tradicional, como explanado nos tópicos a seguir.

6.4 Aferição do ACV da Cadeia Proposta

A aferição da ACV parte da mesma definição de objetivo e escopo em relação à cadeia tradicional. Para que se possa comparar as cadeias, os dados para elaboração dos mesmos indicadores aferidos na primeira etapa foram obtidos por meio da simulação processo de fabricação do componente tibial. A simulação foi feita utilizando a tecnologia de virtualização, que emula os dados reais de fabricação num ambiente virtual.

A simulação do processo para obtenção dos dados para execução da ACV foi feita utilizando o software *Materialise Medics v20* com a colaboração da fabricante e distribuidora de máquinas para manufatura aditiva.

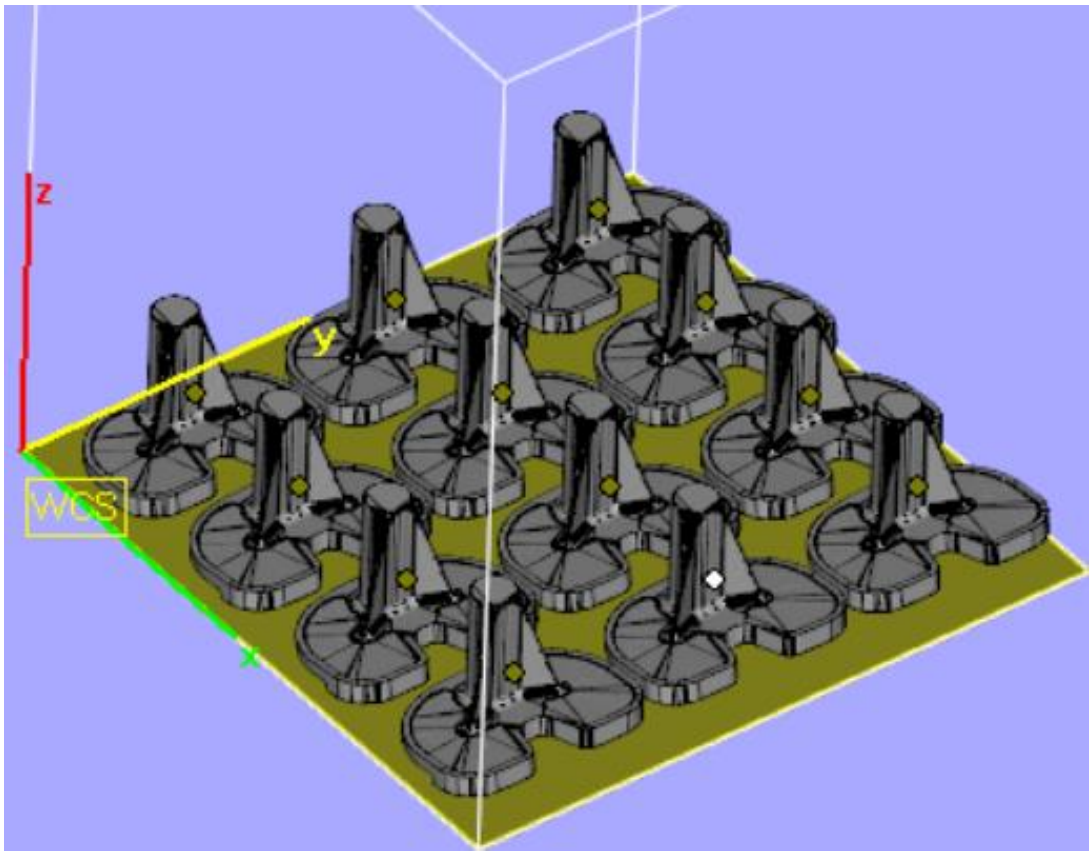


Figura 54 - Montagem das bases no software de simulação.
Fonte: Elaborado por AMS Engenharia (2020, s.p.).

Os parâmetros na simulação reproduzem com alta fidelidade o processo final, inclusive fornecendo os dados de perda de MP, tempo total, potência empregada no laser e aproveitamento da plataforma, como detalha a análise de inventário a seguir.

6.4.1 Análise de Inventário da cadeia com uso da I4.0

O cálculo dos indicadores foi feito com base nos mesmos métodos utilizados na análise de inventário da cadeia tradicional (Sessão 6.2). Como a montagem das peças resultou num lote mínimo de 12 unidades para melhor aproveitamento da plataforma, a conversão em relação à unidade funcional será representada pela fração 1/12. A Tabela 13 resume os equipamentos, potência e tempo de uso utilizadas para os cálculos dos indicadores.

Tabela 13 - Mapeamento de equipamentos do processo I4.0

#	Descrição	Processos	Valor (R$)	Tempo de Uso no processo (h)	Potência Instalada do Eqto (kW)	Consumo energia por lote (kWh)	Consumo energia und. Funcional (kWh)	Emissões (kg CO_2 e/lote)	Emissões (kg CO_2 e/und))
Fornecedor									
#1	EOS M 290 - YB-FIBER LASER 400W - 32A - 400V - POTÊNCIA MÁXIMA 8,5kW - PLATAFORMA 250 x 250 x 325 mm	Manufatura aditiva	3.314.200	20,00	3,25	65,00	5,42	33,68	2,8064
#2	SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA MANUAL	Recuperação de MP	25.000	0,50	0,50	0,25	0,02	0,13	0,0108
		Total Fornecedor	3.339.200	20,50	3,75	65,25	5,44	33,81	2,82
Fabricante									
#15	Lixadeira de Cinta para Metais 100 x 1220mm - 2 hp - MANROD-MR125	Acabamento superficial (lixamento/polimento)	2.900	0,96	1,49	1,43	0,12	0,74	0,0618
#16	SISTEMA DE JATEAMENTO COM COMPRESSOR - CABINE JATEAMENTO 900 X 900mm - COMPRESSOR 120 PÉS	Jateamento	19.000	0,06	2,20	0,13	0,01	0,07	0,0057
		Total Fabricante	21.900	1,02	3,69	1,56	0,13	0,81	0,07
Total			**3.361.100**	**21,52**	**7,44**	**66,81**	**5,57**	**34,62**	**2,88**

Fonte: Elaborada a partir da ACV.

Consumo de energia elétrica

A potência aferida para o teste no equipamento foi de aproximadamente 3,25 kW, dado equivalente a estudos como o de LIU *et al.*(2018). Assim, como mostra a Tabela 13, a estimativa de consumo de energia para a fabricação do lote de 12 peças é de 66,81 kWh e de 5,57 kWh por unidade funcional.

Consumo de matéria prima

Considerando que a MP utilizada nos dois casos é a mesma e apresenta a mesma densidade, estimasse uma redução de peso de aproximadamente 10% pela ausência de sobremetal por conta da proximidade da geometria final do implante. O aproveitamento do processo é de aproximadamente 96%.

Considerando o acréscimo da perda de 4% e redução de peso de 10%, o consumo de matéria prima por unidade funcional é de 0,252 kg.

Cálculo de emissões de CO_2

Utilizando-se da mesma equação e fator de emissão do inventário da cadeia tradicional nos dados da Tabela 13, tem-se 34,62 kg CO_2 emitidos no lote 2,88 kg CO_2 por unidade funcional produzida.

Custo de investimento em máquinas, ferramentas e acessórios

Considerando as informações da Tabela 13 calculadas conforme os mesmos parâmetros do custo e nacionalização da aferição da primeira cadeia, tem-se então o valor total de R$ 3.361.100 como investimento necessário total.

Custo de energia

Como resumido na Tabela 13, a estimativa de custo de energia para a fabricação do lote de 12 peças é de R$ 41,97 e de R$ 3,50 por unidade funcional.

Custo de matéria prima

O custo unitário da MP utilizada é de R$ 700,00. Considerando os cálculos efetuados para o consumo de matéria prima, tem-se então que o custo da MP para a fabricação do lote e da unidade funcional é de R$ 2.116,80 e R$176,40, respectivamente.

Custo de mão de obra direta

Diferente de cadeia de produção tradicional, as ocupações relacionadas a I4.0 ainda não estão devidamente catalogadas na Classificação Brasileira de Ocupações. Foram escolhidas então ocupações com funções semelhantes, como programador CAD/CAM de máquinas de comando numérico, como mostra a Tabela 14.

Como não há necessidade de acompanhamento durante o processo de impressão, o tempo de atividade do programador foi estimado com base no tempo da duração da programação e projeto da peça para simulação. Ao final do processo é necessário apenas que um operador de produção faça a remoção da peça do suporte e a limpeza da peça. Assim, o custo de MOD por lote produzido é de R$ 70,61 e R$ 5,88 convertendo para a unidade funcional.

Oferta de Empregos e média salarial

As funções de mão de obra direta necessárias para operação da cadeia com uso da I4.0 são preenchidas por 7 profissionais com média salarial de R$ 2.404, variando entre R$ 1.843 (Operador de Inspeção de Qualidade) e R$ 3.098 (Programador de CAD/CAM), como mostra a Tabela 14.

Exposição a risco

Os dados sobre o risco foram estimados de acordo com o PPRA e históricos informados pela empresa fornecedora do equipamento e estão resumidos na Tabela 15. As análises serão feitas em comparação com a cadeia tradicional na sessão de avaliação de impactos.

Tabela 14 - Mapeamento de MOD da proposta I4.0

CBO	Descrição do cargo	Processo	Carga Horária Semanal	Média Salarial (R$/mês)	Salário Hora (R$/hr)	Tempo Processo (h)	Custo MOD Lote	Custo MOD und funcional
317115	Programador CAD/CAM de máquinas de comando numérico	1. Produção (Projeto e programação da máquina)	44	3.098	14,18	2,00	28,36	2,36
721210	Operador de produção	2. Remoção e limpeza das peças	44	1.926	10,94	0,50	5,47	0,46
391205	Operador de inspeção de qualidade	3. Inspeção final	44	1.843	10,47	0,50	5,23	0,44
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F01 - Inspeção de Recebimento	43	3.089	17,96	0,50	8,98	0,75
721210	Operador de produção	F04 - Polimento	44	1.926	10,94	1,00	10,94	0,91
821435	Operador de jato abrasivo	F05 - Jateamento	44	1.857	10,55	0,25	2,64	0,22
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F06 - Inspeção Final	43	3.089	17,96	0,50	8,98	0,75
Total				**2.404**			**70,61**	**5,88**

Fonte: Elaborado a partir do fluxograma de processo.

Tabela 15 - Mapeamento de riscos ocupacionais da proposta I4.0

CBO	Descrição do cargo	Processo	Riscos físicos	Riscos químicos	Riscos biológicos	Riscos ergonômicos	Riscos de acidentes
317115	Programador CAD/CAM de máquinas de comando numérico	1. Produção (Projeto e programação da máquina)	Leve	N/A	N/A	Leve	N/A
721210	Operador de produção	2. Remoção e limpeza das peças	Moderado	Leve	N/A	Moderado	Moderado
391205	Operador de inspeção de qualidade	3. Inspeção final	Leve	N/A	N/A	Leve	Leve
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F01 - Inspeção de Recebimento	Leve	N/A	N/A	Leve	Leve
721210	Operador de produção	F04 - Polimento	Moderado	N/A	N/A	Moderado	Moderado
821435	Operador de jato abrasivo	F05 - Jateamento	Leve	Leve	N/A	Leve	Leve
391210	Analista de Garantia da Qualidade	F06 - Inspeção Final	Leve	N/A	N/A	Leve	Leve

Fonte: Elaborado a partir do fluxograma de processo.

6.5 Comparação e análise dos resultados

Nessa etapa do trabalho, os resultados obtidos na ACV da cadeia atual foram comparados aos resultados da ACV utilizando a I4.0. A comparação foi feita com base nos indicadores e sua relação com os ODS, como apresentado nas próximas seções.

Optou-se por não se utilizar softwares específicos como o *Open LCA* para ACV, uma vez que esse tipo de ferramenta demanda o acesso à bases de dados que normalmente restritas, pagas e de difícil acesso. No entanto, a conformidade em relação aos métodos e resultados encontrados em comparação a estudos já existentes na literatura, como Epstein, Sykes e Carris (2011), Liu *et al.*(2018) e Castro, Pereira e Freitas (2018), validam a proposta do presente trabalho baseado no escopo das normas de ACV e nas diretrizes do IPCC (2006) para cálculo dos indicadores de consumo de energia elétrica e emissões de CO_2.

6.5.1 Avaliação de impactos e Interpretação

A Tabela 16 consolida os resultados da cadeia tradicional frente a proposta I4.0 por lote e por unidade funcional. A seta verde ao lado da variação de cada indicador sinaliza os impactos positivos da I4.0, enquanto a vermelha destaca os pontos negativos. Os indicadores de consumo de matéria-prima foram desdobrados nos índices aproveitamento de processo e geração de resíduos não recicláveis para melhor avaliação do processo.

Tabela 16 - Tabela comparativa dos indicadores

			Tradicional		I4.0		
	Indicador	Unidade	Lote	Und. Func.	Lote	Und. Func.	Variação
ACV (Ambiental)	Consumo de Energia	kWh	1.703,56	7,74	66,81	5,57	-28% ↑
	Consumo de Matéria Prima	kg	150,00	0,29	3,02	0,25	-14% ↑
	Aproveitamento do processo	%	0,39	0,39	0,96	0,96	146% ↑
	Geração de resíduos não recicláveis	kg	49,52	0,23	0,12	0,01	-96% ↑
	Emissões de CO2	Kg CO2/und	882,61	4,01	34,62	2,88	-28% ↑
CCV (Econômico)	Custo de investimento em máquinas, ferramentais e acessórios	R$	2.250.340,00		3.361.100,00		49% ↓
	Custo de energia	R$ kWh	1.070,18	4,86	41,97	3,50	-28% ↑
	Custo de matéria prima	R$	13.254,38	64,40	2.116,80	176,40	174% ↓
	Custo de MOD	R$	3.015,29	13,71	70,61	5,88	-57% ↑
ASCV (Social)	Oferta de empregos	und	24,00		7,00		-71% ↓
	Média de Salário	R$	1.890,00	1.890,00	2.404,00	2.404,00	27% ↑

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Nota-se que a I4.0 foi superior em todos os aspectos ambientais, mais ainda é mais cara e, como sugerido por Birkel *et al.* (2019), apresenta riscos para os empregos de mão de obra direta, como destacam os próximos tópicos.

Consumo e custo de energia elétrica

O consumo de energia por unidade funcional é 28% menor na cadeia I4.0 sugerida, confirmando a hipótese de Bonilla *et al.* (2018) sobre os ganhos em relação a eficiência. Para comparar os processos foi elaborada a Tabela 17 elencando-os a partir do maior consumo de energia elétrica por unidade funcional.

Tabela 17 - Consumo de Energia e Emissões por Unidade Funcional

Rota	**Processos**	**Consumo energia und. Funcional (kWh)**	**Emissões (kg CO_2 e/und))**
I4.0	Manufatura aditiva	5,417	2,806
Tradicional	Usinagem	2,034	1,054
Tradicional	Fundição da liga e fundição das peças	1,705	0,883
Tradicional	Preparação e recuperação de cera	1,227	0,636
Tradicional	Calcinação	0,934	0,484
Tradicional	Remoção de cera	0,818	0,424
Tradicional	Secagem dos cachos	0,742	0,384
Tradicional	Acabamento superficial (lixamento/polimento)	0,119	0,062
I4.0	Acabamento superficial (lixamento/polimento)	0,119	0,062
Tradicional	Injeção dos modelos de cera	0,068	0,035
Tradicional	Remoção das peças dos cachos	0,031	0,016
I4.0	Recuperação de MP	0,021	0,011
Tradicional	Jateamento	0,020	0,010
I4.0	Jateamento	0,011	0,006
Tradicional	Acabamento e remoção do massalote	0,010	0,005
Tradicional	Acabamento	0,010	0,005
Tradicional	Banho 1 - Primeira Lama - Chuva de Areia Zircônio	0,005	0,003
Tradicional	Banho 2 - Chuva de areia chamote fino	0,005	0,003
Tradicional	Banho 3 - Chuva de areia Chamote grosso	0,005	0,003
Tradicional	Banho 1 - Primeira Lama	0,003	0,002
Tradicional	Banho 2 - Segunda Lama	0,003	0,002
Tradicional	Banho 3 - Terceira lama	0,003	0,002

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Devido à consolidação de todos os processos num único equipamento, nota-se que o gasto energético da manufatura aditiva lidera o ranking. No entanto, como mostra a Figura

55, que representa o consumo por processo na área dos retângulos, a junção dos quatro primeiros processos da cadeia tradicional já apresenta dimensão maior do que toda a operação da produção usando manufatura aditiva.

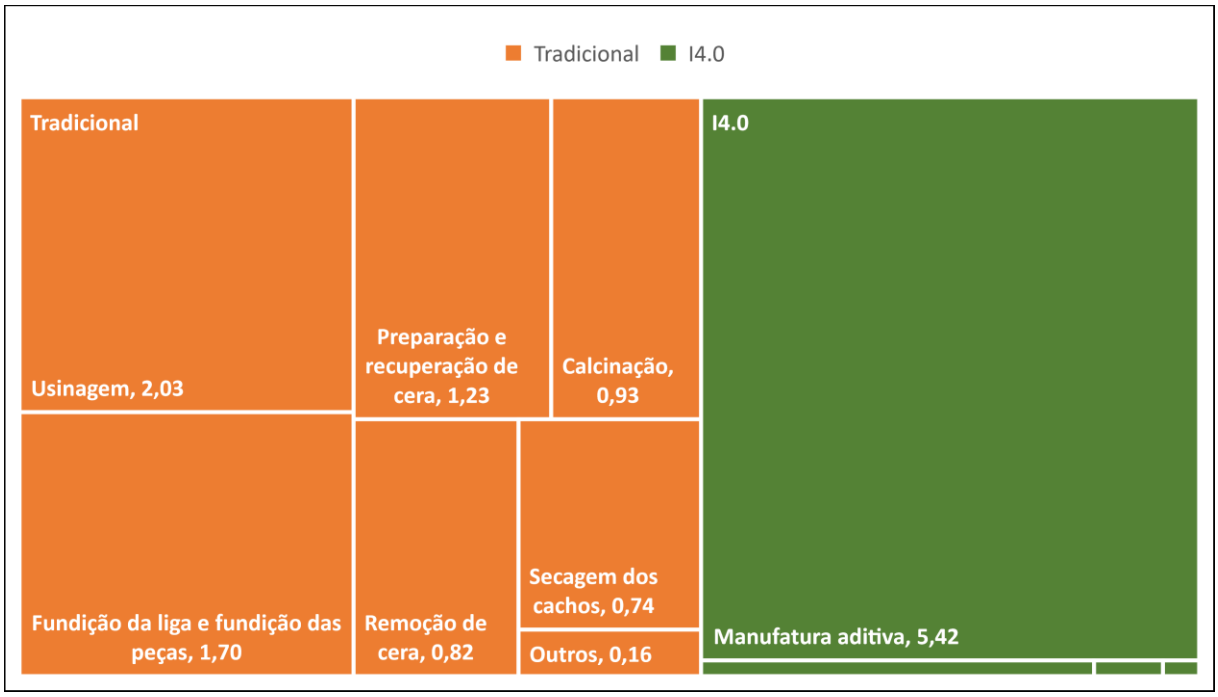


Figura 55 - Consumo de energia por processo em kW por unidade funcional
Fonte: Elaborado a partir da ACV.

A diferença de consumo por unidade funcional é de 2,18 kWh. Multiplicando pela produção anual de 10.000 unidades do produto em questão, tem-se uma redução de consumo de energia elétrica superior a 21,2 kWh, resultando numa economia de 28%. A redução de custo de energia ocorre na mesma proporção, sendo de R$ 1,36 por unidade e R$ 13.623,71 considerando o volume anual.

Consumo de matéria prima, aproveitamento do processo e geração de resíduos

O gráfico expresso na Figura 56 representa a geração de resíduos e consumo de matéria prima em cada processo, revelando a superioridade do processo I4.0 nas duas categorias. Considerando a depleção e esgotamento das matérias-primas, principalmente considerando que os materiais para confecção dos produtos em questão são extraídos por mineração, o processo proposto se apresenta mais sustentável e impactando positivamente os ODS 3 (assegurar acesso a recursos para vida saudável), 9 (promover a industrialização sustentável) e 12 (consumo e produção sustentáveis).

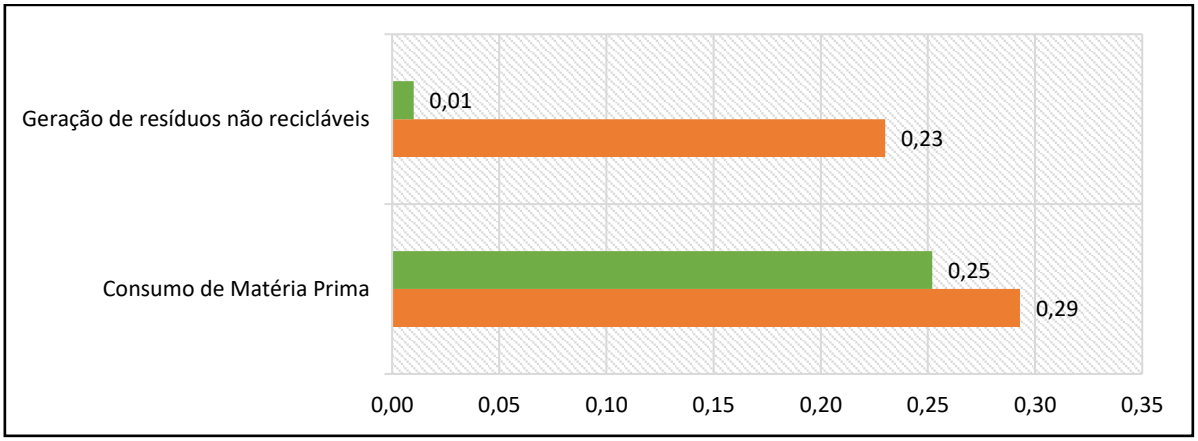


Figura 56 - Geração de Resíduos e Consumo de MP por unidade funcional
Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Cada base tibial pesa em média 266 gramas. No processo tradicional, os 150kg de matéria prima são convertidos num lote de 220 peças (18 cachos de 12 peças cada), resultando num aproveitamento da operação de 39%, como mostra a Figura 57. Do restante, 10% são perdidos e descartados no processo e 51% do material é reaproveitado sob a forma de canais que precisam ser refundidos e empregados em um novo processo. Apesar da possibilidade de aproveitamento, toda a energia elétrica e emissões geradas para o reprocessamento da liga são duplicados com o reprocessamento.

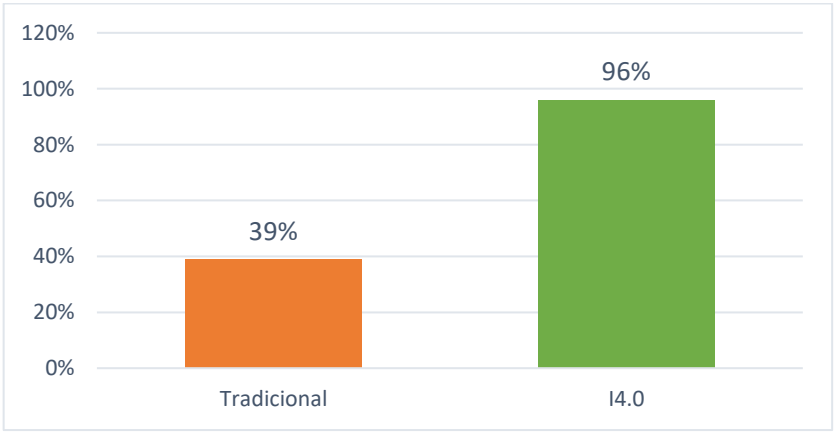


Figura 57 - Aproveitamento de matéria prima no processo.
Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Quando levamos em conta o consumo anual, os 410kg de material economizados no processo I4.0 são suficientes para a confecção de mais 1627 implantes.

Cálculo de emissões de CO_2

O escopo utilizado para cálculo de emissões de CO_2 se dá em função do consumo energético, logo, observa-se o mesmo percentual de redução. A redução de aproximadamente 28% das emissões de CO_2 por unidade funcional representa 1,13kg CO_2.

A Figura 58 compara os produtos originados das duas cadeias com produtos de uso cotidiano e exemplos de materiais processados. Nota-se que o valor aferido do novo produto é inferior à emissão de CO_2e originada do processamento de 1kg de plástico e muito próximas as geradas por uma refeição com carne vermelha.

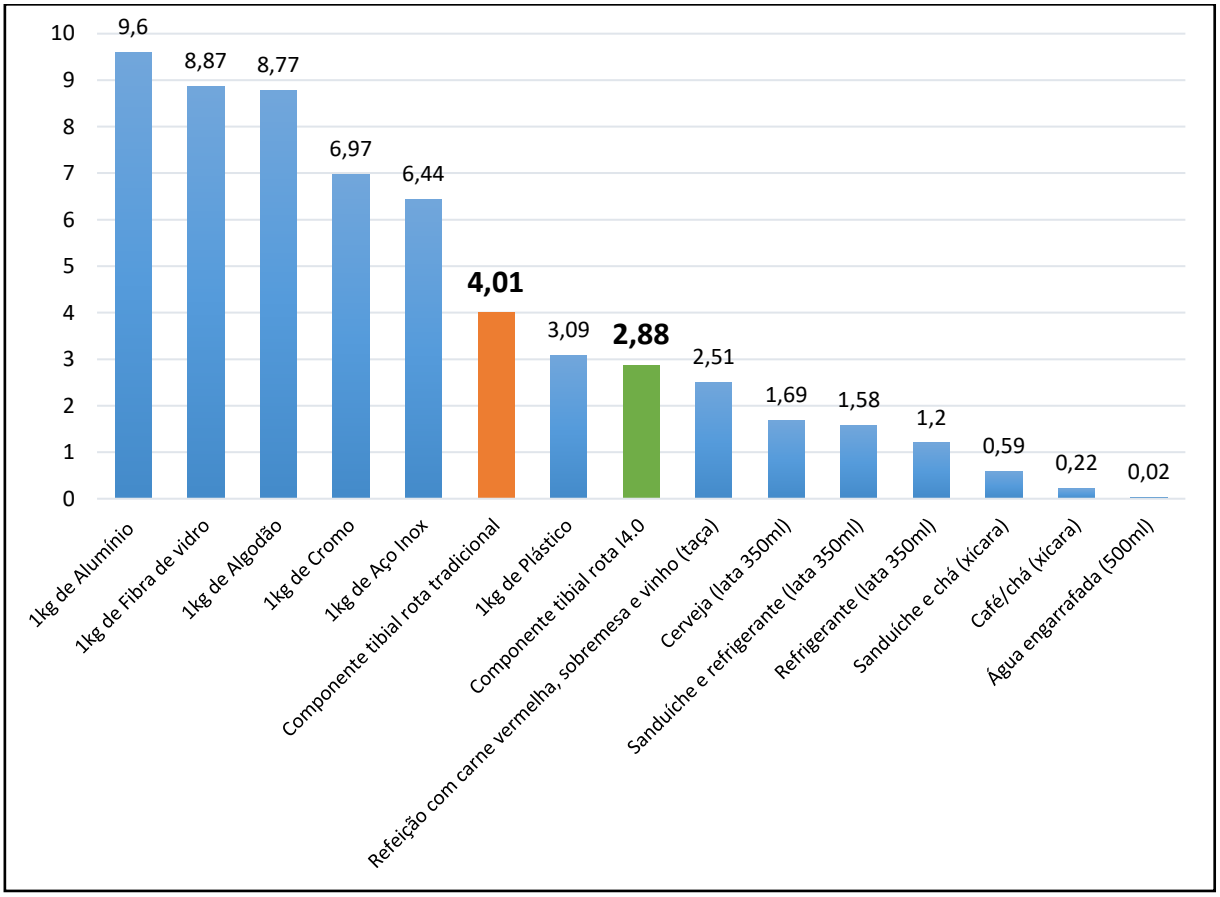


Figura 58 - Gráfico de kg CO_2e emitido por unidade
Fonte: Adaptado de Epstein, Sykes e Carris (2011) em conjunto com ACV

Considerando a produção anual de 10.000 unidades de componente tibial, tem-se uma redução de emissões superior a 11,2 toneladas de CO_2 por ano.

Custo de investimento em máquinas, ferramentas, acessórios e matéria prima

O valor de investimento para o aparelhamento da cadeia 4.0 foi 49% superior se comparado à cadeia tradicional. O custo da matéria prima foi ainda maior, apresentando um salto de 174% em relação ao processo atual.

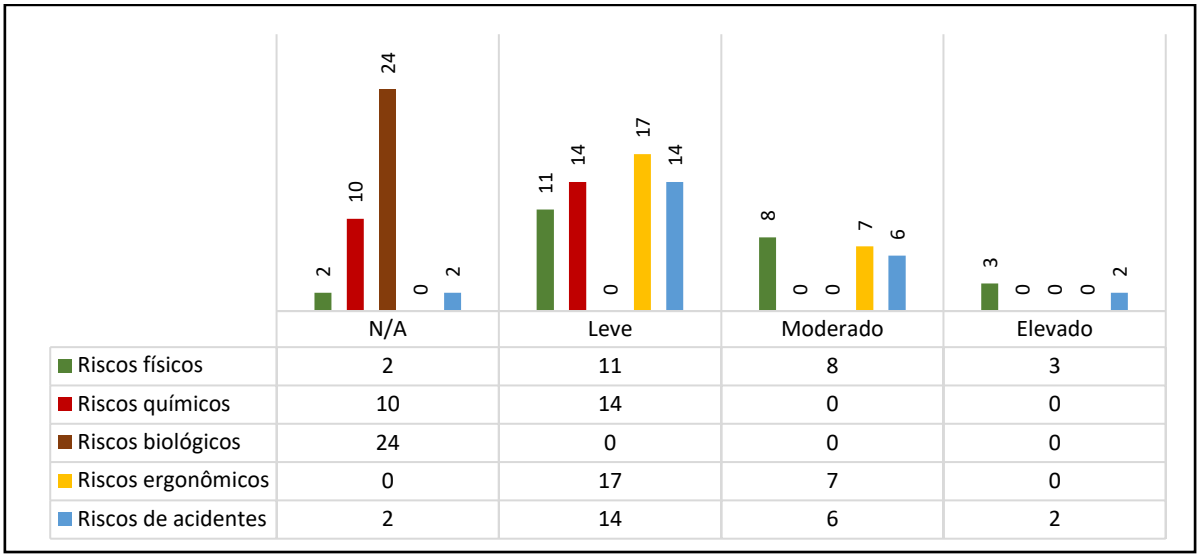
De acordo com Birkel *et al.* (2019), Moktadir *et al.* (2018) e Müller e Voigt (2018), os altos investimentos configuram uma importante restrição à implantação e expansão da I4.0 principalmente no contexto de países em desenvolvimento e espera-se que, à exemplo de outras tecnologias, os preços tendam a ser reduzidos num curto prazo. Adicionalmente, como os materiais e equipamentos são importados, sofrem influência de variações do cenário macroeconômico que afetam as taxas cambiais.

Desse modo, entende-se que a existência de uma indústria de produção de equipamentos para a I4.0 no Brasil tornaria a implantação dessas tecnologias mais viável e muitos benefícios ambientais seriam atingidos pelas empresas.

Oferta de Empregos, média salarial, exposição ao risco e custo de MOD

Os resultados encontrados nas análises de inventário foram concordantes com os encontrados por Birkel *et al.* (2019), quanto a preocupação com a perda de empregos, e Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018), quanto a redução de riscos aos funcionários.

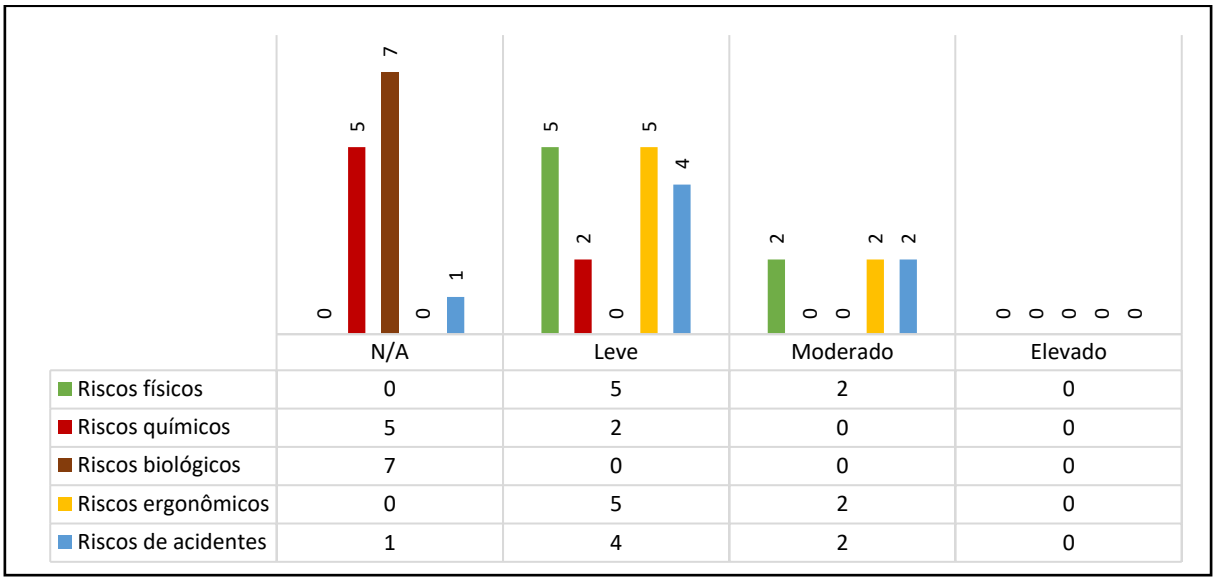
Observa-se nas Figura 59 e 60 o número de cargos que apresentam exposição aos cinco tipos de riscos ocupacionais na cadeia tradicional e na cadeia com I4.0, respectivamente. No caso da cadeia tradicional foram identificadas exposição a cinco riscos elevados, sendo três físicos e dois de acidente, e vinte e um riscos moderados, oito físicos, sete ergonômicos e seis de acidentes.



	N/A	Leve	Moderado	Elevado
Riscos físicos	2	11	8	3
Riscos químicos	10	14	0	0
Riscos biológicos	24	0	0	0
Riscos ergonômicos	0	17	7	0
Riscos de acidentes	2	14	6	2

Figura 59 - Riscos ocupacionais e ambientais da cadeia tradicional.
Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Na cadeia com a proposta I4.0 (Figura 60), reduziu-se a exposição a risco de forma geral, sendo zero para risco elevado e seis para risco moderado (riscos físicos, ergonômicos e de acidentes).



	N/A	Leve	Moderado	Elevado
Riscos físicos	0	5	2	0
Riscos químicos	5	2	0	0
Riscos biológicos	7	0	0	0
Riscos ergonômicos	0	5	2	0
Riscos de acidentes	1	4	2	0

Figura 60 - Riscos ocupacionais e ambientais da cadeia I4.0.
Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Para que se pudesse quantificar a comparação entre as cadeias, foi proposta a criação de um índice utilizando o cálculo da média ponderada de exposição dos riscos. Para tanto, foi criada uma escala crescente com os valores: zero para N/A; um para risco leve; dois para risco moderado; e três para risco elevado, como mostra a Tabela 18.

Tabela 18 – Índices de risco das duas propostas de cadeia.

	Nível de Risco	Grau de Risco	Riscos físicos	Riscos químicos	Riscos biológicos	Riscos ergonômicos	Riscos de acidentes
Tradicional	N/A	0	2	10	24	0	2
	Leve	1	11	14	0	17	14
	Moderado	2	8	0	0	7	6
	Elevado	3	3	0	0	0	2
	Índices cadeia tradicional		**1,50**	**0,58**	**0,00**	**1,29**	**1,33**
I4.0	N/A	0	0	5	7	0	1
	Leve	1	5	2	0	5	4
	Moderado	2	2	0	0	2	2
	Elevado	3	0	0	0	0	0
	Índices cadeia I4.0		**1,29**	**0,29**	**0,00**	**1,29**	**1,14**

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

A Figura 61 resume graficamente os dados da Tabela 18 e mostra redução da exposição a riscos físicos, químicos e a acidentes proporcionado pela rota I4.0.

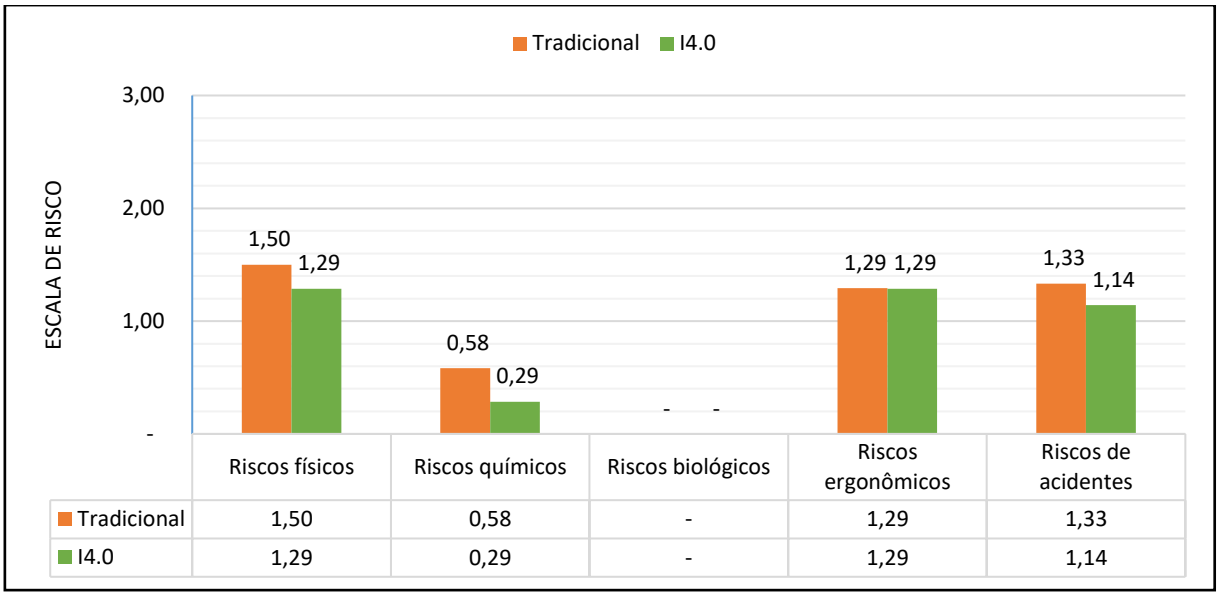


Figura 61 - Gráfico comparativo da exposição a risco ocupacionais e ambientais das duas cadeias.
Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Nota-se que a migração dos processos para tecnologias I4.0 minimiza a exposição aos riscos se constitui como uma alternativa para substituir processos perigosos, como a operação manual dos fornos de micro fundição que trabalham a temperaturas superiores a 1200ºC. Além de expostos a menos riscos, as ocupações da I4.0 também apresentam maior remuneração, totalizando um salário 27% maior se comparado aos trabalhadores da cadeia tradicional, contribuindo positivamente ao ODS 10 (redução da desigualdade).

O impacto também é positivo nos custos de MOD, que apresentam uma redução de 57% em relação a unidade funcional, como mostra a Tabela 16 pela característica de centralizar em uma só máquina o que é dividido em várias células de trabalho na rota tradicional.

Se por um lado a I4.0 se mostra vantajosa ao empregador por ter menores custos de MOD e menos risco de processos trabalhistas gerados pela exposição a riscos, por outro, existe o impacto à oferta de empregos.

O processo de impressão aditiva na máquina em questão dispensa qualquer acompanhamento, fazendo sozinha o trabalho de 17 pessoas da rota tradicional, considerando as etapas da fundição da liga até o acabamento das peças micro fundidas. Em empresas de menor porte, alguns funcionários acabam ocupando mais de uma função, mas considerando um cenário com a capacidade produtiva totalmente ocupada e todos os CBOs devidamente empregados, a migração para I4.0 traria uma redução de 24 para 7 no número de profissionais necessários para se dispor do mesmo produto, não considerando nesse caso os trabalhadores de áreas de apoio como manutenção e almoxarifado, por exemplo.

A realocação desses profissionais e a preparação da MOD para utilizar as novas tecnologias se configuram então como uma preocupação real, demandando maiores estudos, como defendem Nagy *et al.* (2018) e Moktadir *et al.* (2018).

6.5.2 Análise de lote mínimo e custo unitário da peça

Além da análise dos indicadores, algumas considerações adicionais podem ser feitas considerando o lote mínimo de produção e o custo unitário da peça. A cadeia tradicional precisa de um lote mínimo 150kg por conta das limitações técnicas do processo de microfundição, como o tamanho do cadinho e a capacidade do forno, resultando num total de 220 peças. Na cadeia que utiliza a manufatura aditiva, o lote mínimo é de 12 peça, utilizando cerca de 3kg de MP, ou seja, uma diferença de 18 vezes.

A diferença mostrada entre o lote mínimo dos dois processos é bastante significativa. Se por um lado há maior diluição de custos e emissões por unidade funcional na cadeia tradicional, por outro tem-se o impacto na personalização. Caso houvesse a necessidade de criação de um implante personalizado ou da prototipagem de um novo produto, utilizando o custo unitário do componente tibial em cada cadeia expresso na Tabela 19, o custo de produção total do lote de 220 peças na cadeia tradicional seria de R$ 18.253,40, enquanto na cadeia I4.0

poderiam ser produzidas apenas 12 peças com o custo total de R$ 2.229,36. Os custos de testes e prototipagens são cerca de oito vezes maiores na cadeia tradicional, fazendo da manufatura aditiva uma opção vantajosa na modalidade de implantes customizados, na prototipagem de novos produtos e ou na produção de itens de pequenos lotes para itens de baixa demanda.

Quanto ao custo unitário da peça, a Tabela 19 foi elaborada para comparar os resultados finais da cadeia tradicional e da proposta I4.0. A estimativa de custos levou em consideração o custo da matéria prima, dos insumos, da energia e da MOD.

Tabela 19 - Composição de custo final da peça

	Tradicional	**I4.0**	**Var %**
Custo de energia	4,86	3,50	-28%
Custo de matéria prima e insumos	64,40	176,40	174%
Custo de MOD	13,71	5,88	-57%
Custo da peça	**82,97**	**185,78**	**124%**

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Apesar da diferença ser expressiva no custo da peça, há uma série de custos intangíveis que devem ser considerados na tomada de decisão de migração para a Indústria 4.0, tais como como custos de acidentes, desperdício, custo da não qualidade (ex: porosidades internas do processo de microfundição), impactos ambientais e perda de clientes por falta de personalização que são característicos da cadeia tradicional.

Outro fator de decisão sobre qual cadeia utilizar é a quantidade de componentes tibiais necessárias para atender à solicitação do cliente. A manufatura aditiva se apresenta mais vantajosa para pequenos lotes e apresenta custo menor do que o da cadeia tradicional para até lotes de até 96 peças, como mostra a Figura 62, que traz o custo unitário do componente tibial produzido em cada rota multiplicado pelo lote mínimo e múltiplo da manufatura aditiva.

Nota-se também que a redução dos custos de MP se apresenta como fator chave para que o produto em questão tenha sua viabilidade expandida para outros cenários. Espera-se que com a popularização dos novos métodos de fabricação, os ganhos de economia de escala na produção dos equipamentos e materiais possam auxiliar na adoção da I4.0.

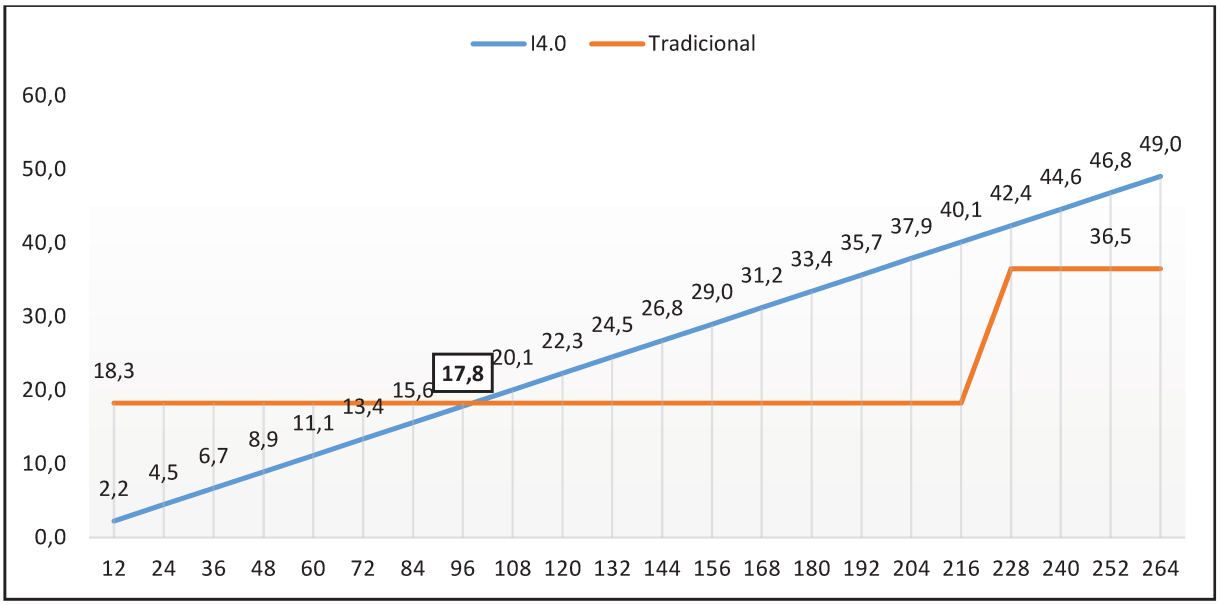


Figura 62 - Custo dos lotes de fabricação de componentes tibiais nas duas cadeias em Reais/1000.
Fonte: Elaboração própria.

6.5.3 Impactos das cadeias nos ODS

Considerando a análise de cada indicador feita nos tópicos anteriores e a proposta de integração entre I4.0 e sustentabilidade do presente trabalho, é fundamental que se analise o impacto de cada um aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

A Tabela 20 foi gerada para resumir os indicadores, ODS e respectivos impactos positivos e negativos.

Nota-se que, exceto pela oferta de empregos e pelo custo dos equipamentos e matéria prima, os ODS 3, 7, 8, 9, 12 e 13, resumidos na Tabela 20 foram positivamente impactados mostrando que a I4.0 pode ser um meio para encontrar uma produção mais sustentável e garantir o atendimento das demandas das próximas gerações, respondendo, então, afirmativamente a pergunta de pesquisa do problema.

Tabela 20 - Impactos do processo de manufatura aditiva de componentes tibiais aos ODS por indicador

	Indicador	ODS Impactado	Impacto
ACV (Ambiental)	Consumo de Energia	#7	Positivo
	Consumo de Matéria Prima	#3, #9 e #12	Positivo
	Aproveitamento do processo	#3, #9 e #12	Positivo
	Geração de resíduos não recicláveis	#3, #9 e #12	Positivo
	Emissões de CO_2	#12 e #13	Positivo
CCV (Econômico)	Custo de investimento em máquinas, ferramentais e acessórios	#8 e #9	Negativo
	Custo de energia	#8 e #9	Positivo
	Custo de matéria prima	#8 e #9	Negativo
	Custo de MOD	#8 e #9	Positivo
ASCV (Social)	Oferta de empregos	#8	Negativo
	Média de Salário	#8	Positivo
	Exposição a riscos	#8	Positivo

Fonte: Elaborado a partir da ACV.

Figura 63 - ODS positivamente impactados pela cadeia I4.0.
Fonte: adaptado de ONU (2015, p.18).

Capítulo 7 – Discussão

O objetivo geral do trabalho é criar um modelo de análise para avaliar a contribuição da I4.0 para uma produção mais sustentável ao longo de ciclo de vida do produto, em especial no segmento de próteses ortopédicas. Para tanto, a proposta do *framework* desse trabalho foi unir modelos de integração entre I4.0 e sustentabilidade com aplicações diversas encontrados na RSL e aplicá-los mantendo a abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dado pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura e ABNT NBR ISO 14044:2006 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.

Dessa forma, o *framework* criado se mostrou adequado para a avaliação das contribuições da I4.0 à sustentabilidade ambiental, econômica e social, uma vez que foi possível comparar a cadeia atual com a proposta I4.0 e identificar os impactos positivos e negativos de cada uma em relação às dimensões da sustentabilidade, incluindo a associação dos impactos aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, parte integrante dos objetivos secundários definidos no escopo do trabalho.

Quanto aos demais objetivos secundários, necessários para resposta da pergunta de pesquisa e para atingimento do objetivo geral do trabalho, entende-se que a consolidação do conhecimento relevante sobre os temas sustentabilidade e I4.0, obtidos a partir da RSL e da análise bibliométrica, foram fundamentais para compreender o atual estado da pesquisa na área. Por meio desse levantamento foi possível identificar a carência de estudos envolvendo a aplicação de modelos para comparar casos reais de produtos manufaturados utilizando cadeias tradicionais e cadeias I4.0. Nesse aspecto, o presente trabalho configura-se como importante contribuição, pois aplica o *framework* desenvolvido no segmento de implantes ortopédicos, cuja demanda crescente justifica intervenções para que as necessidades das próximas gerações continuem a ser atendidas.

Sobre a qualidade dos dados utilizados na Avaliação do Ciclo de Vida, destaca-se que a aferição do processo atual foi feita a partir dos documentos de processos e informações no ERP. Entende-se que haveria mais precisão e facilidade na obtenção das informações se todos os equipamentos estivessem conectados entre si, como propõe a I4.0.

Identificou-se também durante a ACV que o fornecedor tem grande impacto na sustentabilidade do produto em ambas as cadeias. Logo, entende-se que, em relação aos âmbitos, a sustentabilidade do produto e processo são sujeitos a sustentabilidade da cadeia. Esse ponto se destaca como contribuição importante do presente trabalho, uma vez que as análises feitas não se restringiram a empresa foco do estudo de caso, mas estenderam-se pela cadeia.

Quanto aos desafios da implantação da sustentabilidade para Países Em Desenvolvimento (PED) identificados no Capítulo 2, entende-se que o investimento e fomento da I4.0 por parte do governo e da iniciativa privada seriam providenciais para que as dificuldades técnicas como a falta de estrutura tecnológica, a conexão instável entre as companhias e a complexidade na integração da TI com as tecnologias de operação sejam enfrentadas.

Também em resposta aos desafios encontrados, as contribuições do presente trabalho trazem esclarecimentos quanto aos impactos ambientais positivos da utilização da I4.0, mas outros fatores como a insegurança de dados continuam sendo preocupantes, justificando futuros estudos na área de TI.

O atingimento da viabilidade financeira para pequenos lotes ou para implantes personalizados também se configuram como uma importante contribuição. Uma sugestão adicional para minimizar o alto investimento necessário seria a formação de cooperativas para compartilhamento dos equipamentos, uma vez que os custos de operação mais baixos que as cadeias tradicionais proporcionam competitividade e seriam fundamentais para que ganhos em economia de escala barateassem os equipamentos e insumos necessários na I4.0.

A formação de uma indústria de base capaz de construir os equipamentos para a I4.0 no Brasil constitui-se como uma possível forma de alocar a mão de obra excedente das aplicações e, como dupla vantagem, minimizar o impacto dos fatores macroeconômicos que incidem na compra de equipamentos importados. Adicionalmente, a mão de obra excedente gerada pela utilização da I4.0 nos processos poderia ser alocada no segmento da educação, enfrentando assim a carência de formação de equipes e profissionais qualificados para lidar com as novas tecnologias.

7.1 Análise do nível de maturidade da cadeia

Considerando o mapeamento e as dificuldades encontradas, o nível de maturidade e progresso das cadeias, segundo o método de Sjödin *et al.* (2018), seria consideravelmente diferente. Entende-se que a cadeia atual da empresa não se enquadra nem no primeiro nível de interconexão de tecnologias. Isso implica que há um caminho longo a ser trilhado para a implantação total da I4.0.

Com a aplicação dos princípios e tecnologias da I4.0 propostos no trabalho, a cadeia atual poderia ser caracterizada como nível III na escala proposta pelo autor, pois traria as tecnologias conectadas, a viabilização de coleta e compartilhamento de dados e a análise de processos em tempo real. Ainda segundo Sjödin *et al.* (2018), há notáveis ganhos com o aumento da eficiência dos processos, a redução dos custos operacionais, o aumento da qualidade do produto, da segurança e da sustentabilidade através da redução de desperdícios. Isso foi confirmado ao se aplicar o *framework* proposto, pois com a alteração proposta foi possível obter reduções expressivas do consumo de matéria-prima, energia elétrica e desperdício, além da redução dos custos operacionais e da exposição a riscos.

Porém, para atingimento do nível de manufatura inteligente, máxima escada segundo o método de Sjödin *et al.* (2018), uma possível proposta seria alterar a concepção do projeto do produto e partindo para uma customização completa com a fabricação de implantes personalizados e com a geometria perfeitamente adaptada à anatomia do paciente.

No entanto, como sugerem Moktadir *et al.* (2018) e Müeller, Kiel e Voigt (2018), importantes passos ainda precisam ser dados para se difundir a I4.0 em matéria de infraestrutura, como disponibilidade de conexão à internet de alta velocidade, atualizações dos parques fabris e padronização de bases e formatos de dados.

Concordando com Manavalan e Jayakrishna (2019a), outro ponto de dificuldade encontrada é a coexistência de várias fases da RI ao longo da cadeia de suprimentos e, como no estudo de caso pesquisado, inclusive dentro de uma mesma empresa. Há equipamentos completamente manuais ao lado de centros de usinagem automatizados executando praticamente as mesmas funções. Isso se deve a fatores como o custo dos equipamentos, revelando a carência de investimentos e de formação de profissionais que possam utilizar as tecnologias e recursos da I4.0.

7.2 Aplicações adicionais da I4.0 para a sustentabilidade da empresa

Em adição as aplicações identificadas e utilizadas nas operações de manufatura do implante utilizado como produto estudado, há opções de utilização no curto prazo, tanto na alteração do produto em questão quanto nas etapas posteriores do ciclo de vida.

Em relação às especificações do produto, o equipamento de impressão aditiva utilizado na simulação tem capacidade de gerar materiais trabeculados. A Figura 64 mostra a formação de acabamento superficial trabeculado numa superfície metálica. Esse acabamento consiste na formação de estruturas geométricas microscópicas de dimensão e porosidade controladas na superfície da peça.

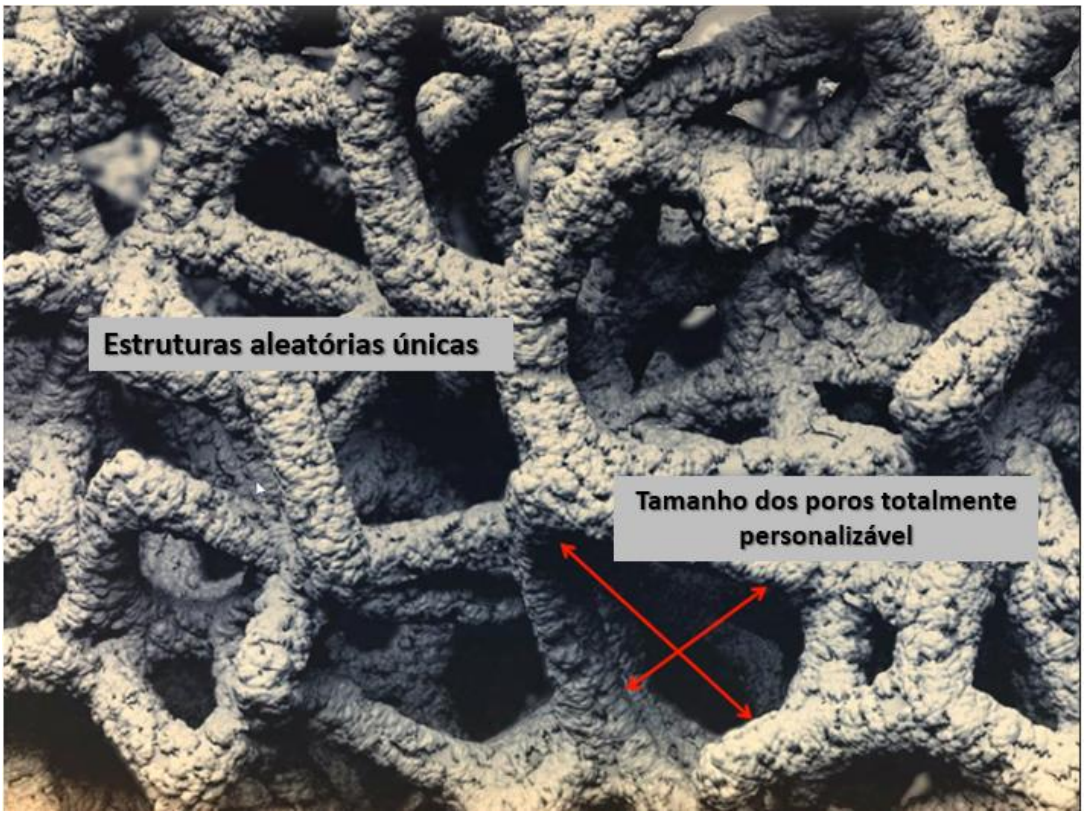


Figura 64 - Acabamento superficial trabeculado.
Fonte: Imagem fornecida por AMS Engenharia (2020, s.p.)

A Figura 65 mostra a aplicação proposta no componente tibial estudado no presente trabalho. O acabamento superficial melhora integração óssea e pode substituir processos de revestimento de plasma spray de titânio e de hidróxido de apatita, utilizados hoje para obter o mesmo resultado. A dispensa dessas operações de alto custo poderia ajudar a viabilizar a utilização das novas tecnologias num prazo mais curto.

Figura 65 - Opções de aplicação de acabamento trabeculado ao implante.
Fonte: Imagem fornecida por AMS Engenharia (2020, s.p.).

Essas sugestões advogam que a alteração do projeto do produto em si também configura como uma forma de viabilizar melhor a I4.0 à cadeia.

Outra possibilidade de ganho mapeada, mas não aplicada na ACV desse trabalho é a utilização dos princípios e tecnologias da I4.0 para eliminar as etapas de inspeção, reconhecidas pelo Lean como desperdícios pois não agregam valor ao produto. Além do escaneamento direto utilizando sensores no processo, o uso de tecnologias como *Big Data* e *Analytics* em conjunto com identificadores RFID atuando num ambiente de CPS possibilita a formação de históricos que podem ser utilizados para justificar a implantação de sistemas de qualidade assegurada, dispensando a necessidade de repetidas inspeções na peça ao longo do processo de fabricação.

Ainda em relação a implantes ortopédicos, há aplicações adicionais que utilizam manufatura aditiva para confecção de próteses totalmente customizadas feitas a partir da anatomia do paciente, atingindo maior nível de compatibilidade e ajudando na melhoria da qualidade de vida (GAO *et al*., 2018; GUBIN *et al*., 2016).

Extrapolando as fronteiras de sistema delimitadas no presente trabalho, há tecnologias que podem ser utilizadas nas etapas do ciclo de vida que envolvem a aplicação do implante no paciente, como a utilização de sistema de realidade aumentada e realidade virtual em cirurgias (PARK *et al*., 2020). Esse tipo de aplicação pode reduzir o tempo de cirurgia, reduzir os riscos e melhorar os resultados para as equipes médicas e para os pacientes.

Conclusão

Como enunciado no princípio desse trabalho, encontrar uma forma de atender as demandas dessa geração sem prejudicar as próximas é um grande desafio e a proposta desse estudo foi oferecer uma contribuição significativa para o entendimento de como os princípios e tecnologias da Indústria 4.0 contribuem para a sustentabilidade das cadeias de produção.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo entender como os princípios e tecnologias da I4.0 podem garantir uma maior sustentabilidade das empresas, em especial, das empresas do segmento de implantes ortopédicos.

Para tanto, realizou-se uma pesquisa exploratória, seguida de uma revisão sistemática de literatura, de sua respectiva análise bibliométrica e de um estudo de caso para aplicação do *framework* proposto.

A principal contribuição do trabalho foi entender as contribuições da I4.0 para a sustentabilidade, sendo elas:

- ambientalmente: melhoria de aproveitamento e eficiência do processo, a redução do consumo de energia, de matéria prima, de geração de resíduos e de emissões de CO_2;
- economicamente: redução dos custos de energia e de mão de obra direta;
- socialmente: na redução dos riscos e melhoria de salário dos trabalhadores.

Outra contribuição importante do trabalho diz respeito ao levantamento de barreiras para o uso da I4.0 para maior sustentabilidade, tais como os custos elevados de investimento em equipamentos, o alto custo de matéria prima e a necessidade de realocação da mão de obra, revelando a existência de alguns *trade-offs.* Apesar de ser mais sustentável ambientalmente, proporcionar melhores salários e reduzir os riscos, o alto custo dos equipamentos e insumos, a falta de infraestrutura e a preocupação com a capacitação e a realocação da mão de obra são desafios consistentes e reforçam a necessidade de investimento e pesquisa sobre o tema.

Assim, para uma contribuição da I4.0 para a sustentabilidade há a necessidade de trabalhar de forma mais completa na gestão empresarial com ações como:

i) alterar o projeto do produto: utilizar princípios e tecnologias da I4.0 para fabricação de implantes personalizados, cujo valor agregado e benefícios para o cliente são maiores mantendo o custo de fabricação;
ii) baratear ou facilitar o acesso a equipamentos e insumos: como modo de auxiliar na viabilização da I4.0 em relação a minimizar os investimentos iniciais, indica-se como sugestão aos elaboradores de políticas o incentivo a criação de cooperativas para compartilhamento de equipamentos destinado a indústrias pequenas e médias;
iii) calcular externalidades no custo da cadeia tradicional: estimar os custos de acidentes, desperdício, custo da não qualidade, impactos ambientais e perda de clientes por falta de personalização para melhor comparação com a cadeia I4.0.

Uma terceira contribuição do trabalho é o método usado, em especial o framework. Assim, entende-se que o caminho traçado foi tão importante quanto o resultado final atingido. A definição da metodologia iniciada a partir da realização da RSL trouxe grandes contribuições consolidando o conhecimento publicado sobre os temas sustentabilidade e I4.0 publicados até o momento e foi fundamental para definir a estrutura dos tópicos do trabalho. Ainda, o uso da avaliação do ciclo de vida foi determinante para levantamento dos indicadores e comparação entre os sistemas tradicionais frente as propostas da I4.0, como proposto no escopo do trabalho.

Quanto a proposta do *framework*, os principais componentes foram dados a partir da RSL, que contextualizou o estado da pesquisa atual sobre os temas, e da realização da bibliometria, importante para conhecer os autores e *clusters* de pesquisa com contribuições mais representativa. Assim, consolidando o conhecimento existente e preenchendo as lacunas encontradas, foi proposto o *framework* e deu-se sequência ao mapeamento da cadeia tradicional, a proposta do novo fluxo e a comparação utilizando as ferramentas de ACV que resultou na identificação dos ganhos e, consequentemente, na resposta positiva a pergunta de pesquisa do presente trabalho.

Logo, a partir dos materiais e métodos utilizados e com base no levantamento bibliográfico e no estudo de caso realizado conclui-se que, de fato, a I4.0 pode contribuir para uma produção mais sustentável. Mesmo levando em conta a natureza qualitativa da pesquisa, os possíveis ganhos da aplicação dos princípios e tecnologias da I4.0 como sugerido no

framework proposto são representativos e reforçam necessidade de explorar as possibilidades fornecidas pela nova Revolução Industrial.

Por fim, entende-se que os resultados aqui apontados são uteis para a alta administração adotar estratégias para empresas mais sustentáveis, assim como para gestores, em especial de produção e cadeia produtiva, estudarem e reduzirem os impactos negativos das operações. Ainda, os resultados são importantes como direcionadores de políticas públicas para fomentar a adoção tanto de práticas mais sustentáveis (análise do ciclo de vida, impacto social, etc.) como da própria Indústria 4.0.

Limites do trabalho

A presente dissertação limitou-se a aplicar *framework* o proposto ao segmento de fabricação de implantes e instrumentais ortopédicos pelo escopo e justificativa do trabalho. A utilização em outros segmentos é aplicável e sujeita a limitações de escopo que os mapeamentos realizados possam propor.

A pesquisa não se ateve aos aspectos da relação entre produtividade e demanda, assim como aos requisitos técnicos de Tecnologia da Informação, como a programação propriamente dita ou a criação de interfaces de comunicação para implantação dos princípios e tecnologias da I4.0. A análise das propriedades mecânicas, químicas ou metalográficas dos materiais utilizados no estudo de caso também não fez parte do escopo do trabalho, atendo-se as questões que envolvem a sustentabilidade da operação. As análises de biocompatibilidade, citotoxicidade, integração óssea e demais ensaios requisitados pela ISO 10993 – Avaliação Biológica de Dispositivos Médicos, Resolução RDC/Anvisa nº 185/01 e demais reguladores não foram inclusos no escopo do trabalho.

Quanto à condução da ACV, o estudo destinou-se principalmente à pesquisa acadêmica com intensão de utilizar os ACV para efeito de comunicação pública das análises comparativas encontrada, mas sem objetivar compor informações para rotulagem dos produtos, dispensando assim a necessidade de análise crítica conforme destaca a norma ABNT NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.

Quanto ao fluxo do produto, a etapa de tratamento térmico, comum para ambas as rotas, não foi abordado por ser executado em um fornecedor de segunda camada, fora do escopo do trabalho.

Quanto à formulação da proposta de cadeia I4.0, apesar da pesquisa ter identificado diversos princípios e tecnologias aplicáveis, o escopo do trabalho manteve-se focado na manufatura aditiva, uma vez que a utilização apenas desse recurso já foi suficiente para resultar em alterações significativas na sustentabilidade ao longo do ciclo de vida do produto.

Trabalhos futuros

Para futuras pesquisas, recomendasse expandir os limites da fronteira de sistema para uma cobertura completa da cadeia de suprimentos, incluindo desde a extração da matéria prima da natureza até a disposição final dos implantes e embalagens.

Baseando-se na pesquisa bibliográfica feita ao longo do trabalho, utilizando os princípios e tecnologias da I4.0 como interoperabilidade, rastreabilidade, capacidade de comunicação em tempo real, *CPS, Big Data, Analytics* e *Smart Grids* conectados por meio de *IoT* para formação de *Smart Factories*, entende-se que todos os dados de produção necessários ao longo da execução dos passos do *framework*, tais como aproveitamento, consumo e emissões seriam mais precisos e facilmente obtidos. Recomendam-se futuros trabalhos para analisar os possíveis ganhos a partir da aplicação desses e outros princípios e tecnologias da I4.0.

Em relação ao custo de investimento dos equipamentos, recomenda-se para trabalhos futuros o uso de técnicas de análise da depreciação de ativos e vida útil dos equipamentos para avaliação da durabilidade e retorno do investimento a longo prazo. Sugere-se também a pesquisa sobre mercado de carbono como possível subsídio nos estudos de viabilização.

Em relação aos desafios para a implantação da I4.0, recomenda-se também futuros estudos em relação à construção de redes e a segurança de informações na nuvem.

Referências Bibliográficas

ARCESE, G. et al. State of the art in S-LCA: integrating literature review and automatic text analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 3, p. 394–405, 2018.

ASTM**. ASTM F75: Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants.** ASTM International, 2006.

BAHRIN, M. et al. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 6–13, p. 137–143, 2016.

BANCO MUNDIAL. **Industry Value Added**. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS?end=2018&start=1960&view=chart. Acesso em: 14 set. 2019.

BARBIERI, J. C. et al. Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. **Revista de Administração de Empresas**, v. v. 50, n. n. 2, p. 146–154, 2010.

BARENJI, R. V. et al. Cyber-physical-based PAT (CPbPAT) framework for Pharma 4.0. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 567, p. 118445, 2019.

BELTRÃO, K. I. et al. **Capacidade funcional dos idosos: Uma análise dos suplementos Saúde da PNAD**. n. 45 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

BIDERMAN, R. et al. **Guia de compras públicas sustentáveis: uso do poder de compra do governo para a promoção do desenvolvimento sustentável**. Centro de Estudo em Sustentabilidade. GVces, 2008.

BIRKEL, H. S. et al. Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 2, 2019.

BONILLA, S. H. et al. Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 10, p. 1–24, 2018.

BRASIL. Ministério Da Ciência Tecnologia e Inovações. **Fator de Emissões de CO2**. Brasília: 2019. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html#:~:text=Resumidamente%2C o fator de emissão,de CO2 das últimas. Acesso em: 02 de abril de 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Envelhecimento e saúde da pessoa idosa.** Brasília: 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Resolução RDC nº 185, de 22 de outubro de 2001.** Brasília: 2001. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/documents/33912/264673/Manual+para+regularização+de+implantes+ortopédicos+na+Anvisa/cf171f36-45fa-44bd-bf27-37afd9581ce0. Acesso em: 14 set. 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Gastos Públicos com Saúde**. Brasília: 2019. Disponível em: http://www.portaltransparencia.gov.br/funcoes/10-saude?ano=2019. Acesso em: 14 set. 2019.

BRESSANELLI, G. et al. Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 3, 2018.

BRETTEL, M. et al. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **World Academy of Science**, v. 8, n. Engineering and Technology, p. 8, 2014.

CARVALHO, N. et al. Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 671–678, 2018.

CASTRO, R. C.; PEREIRA, F. V. DO P.; FREITAS, N. P. Inventário de Gases de Efeito Estufa em Fundições de Aço. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 13, n. 1, p. 55–67, 2018.

CHEN, I. J.; PAULRAJ, A. Towards a theory of supply chain management: The constructs and measurements. **Journal of Operations Management**, v. 22, n. 2, p. 119–150, 2004.

CLARK, G. The Industrial Revolution. **Handbook of Economic Growth**. 1. ed. London: Elsevier, p. 217–26, 2014.

CLARK, G. The industrial revolution: A cliometric perspective. **Handbook of Cliometrics**, 1. Ed. London: Elsevier, p. 197–235, 2016.

CONNELLY, M. **Fatal misconception: The struggle to control world population**. Harvard University Press. 2008.

DASSISTI, M.; SEMERARO, C.; CHIMENTI, M. Hybrid Exergetic Analysis-LCA approach and the Industry 4.0 paradigm: Assessing Manufacturing Sustainability in an Italian SME. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 655–662, 2019.

DAVIS, J. R. **Handbook of materials for medical devices.** Ohio. ASTM International, 2003.

DE JACQUES, J. J. **Estudo de iniciativas em desenvolvimento sustentável de produtos em empresas calçadistas a partir do conceito berço ao berço**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 2011.

DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. et al. When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, n. 132, p. 18 - 25, 2018.

DE VRIES, J. The Industrial Revolution and the Industrious Revolution. **The Journal of Economic History**, v. 54, n. 2, p. 249–270, 1994.

DESLAURIERS, J.P. **Recherche qualitative: guide pratique**. McGraw-hill, 1991.

DING, B. Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 119, p. 115–130, 2018.

DREYER, L. C.; HAUSCHILD, M. Z.; SCHIERBECK, J. A Framework for Social Life Cycle Impact Assessment. **Journal of Lifecycle Assessment**, v. 11, n. 2, p. 88–97, 2006.

EHRLICH, P. R. **The population bomb**. New York. Ballentine Books, ed. 19, 1978.

ELEKTRO. **Tabela Elektro 2019**. Disponível em: https://www.elektro.com.br/Media/Default/Tarifas/Tarifas-Media-e-Alta-Tensao.pdf. Acesso em: 4 maio. 2020.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. **California management review**, v. 36, n. 2, p. 90–100, 1994.

ELKINGTON, J. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental quality management**, v. 8, n. 1, p. 37–51, 1998.

ENDERLE, J.; BRONZINO, J. D. **Introduction to Biomedical Engineering**. 3. ed. Connectcut: Academic Press, 2011.

ENGELHARDT, S. A. The Orthopaedic Industry and Its Suppliers: An Overview. **Bone Zone - Strategic Sourcing for the Orthopaedic Industry**, v. Vol. 6, n. 4, p. 16–20, 2007.

EPSTEIN, D.; SYKES, J.; CARRIS, J. **Oficina Carbon Footprint**. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/255/_arquivos/3_como_medir_creditos_de_carbono_255.pdf. Acesso em: 5 abr. 2020.

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.

FIKSEL, J.; MCDANIEL, J.; SPITZLEY, D. Measuring product sustainability. **Journal of Sustainable Product Design**, p. 7–18, 1998.

FINKBEINER, M. et al. Towards life cycle sustainability assessment. **Sustainability,** v. 2, n. 10, p. 3309-3322, 2010.

FISK, P. **People planet profit: How to embrace sustainability for innovation and business growth**. Kogan Page Publishers, 2010.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da Pesquisa Científica**. Curso de Especialização em Comunidades Virtuais de Aprendizagem-Informática Educativa. Universidade Estadual do Ceara. 2002.

FREITAS, W. R. S.; JABBOUR, C. J. C. Utilizando estudo de caso (s) como estratégia de pesquisa qualitativa: boas práticas e sugestões. **Revista Estudo & Debate**, v. 18, n. 2, p. 7–22, 2011.

FROSCH, R. A.; GALLOPOULOS, N. E. Strategies for manufacturing. **Scientific American**, v. 261, n. 3, p. 144–152, 1989.

GAFFNEW, O. Sustainable Development Goals: Improving human and planetary wellbeing. **Global Change**, n. 82, p. 20–23, 2014.

GALLOPÍN, G. C. **A systems approach to sustainability and sustainable development**. United Nat ed. Santiago, Chile: United Nations Publications, v. 64, 2003.

GAO, C. et al. Additive manufacturing technique-designed metallic porous implants for clinical application in orthopedics. **RSC advances**, v. 8, n. 44, p. 25210–25227, 2018.

GARCIA-MUIÑA, F. E. et al. The paradigms of Industry 4.0 and circular economy as enabling drivers for the competitiveness of businesses and territories: The case of an Italian ceramic tiles manufacturing company. **Social Sciences**, v. 7, n. 12, p. 1–31, 2018.

GARRIDO-HIDALGO, C. et al. IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0. **IEEE Access**, v. 6, p. 28417–28437, 2018.

GATTI, J. B.; DE CASTILHO QUEIROZ, G.; GARCIA, E. E. C. Recycling of aluminum can in terms of life cycle inventory (LCI). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 3, p. 219, 2008.

GBEDEDO, M. A.; LIYANAGE, K.; GARZA-REYES, J. A. Towards a Life Cycle Sustainability Analysis: A systematic review of approaches to sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1002–1015, 2018.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto alegre: Editora da UFRGS, v. 2, n. 1, 2009.

GHADIMI, P. et al. Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. **Computers & Industrial Engineering**, v. 127, p. 588–600, 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, v. 5, n. 61, p. 16–17, 2002.

GRIGGS, D. et al. Policy: Sustainable development goals for people and planet. **Nature**, v. 495, n. 7441, p. 305, 2013.

GROUP, M. M. **Internet World Stats**, 2019. Disponível em: <https://www.internetworldstats.com/stats.htm>. Acesso em: 6 ago. 2019

GUBIN, A. V et al. Challenges and perspectives in the use of additive technologies for making customized implants for traumatology and orthopedics. **Biomedical Engineering**, v. 50, n. 4, p. 285–289, 2016.

GUINEE, J. B. et al. Life Cycle Assessment of Life Cycle Assessment of. **Environmental science and Technology**, v. 45, n. 310420, p. 22–29, 2011.

GUINÉE, J. B.; DE HAES, H. A. U.; HUPPES, G. Quantitative life cycle assessment of products: 1: Goal definition and inventory. **Journal of Cleaner Production**, v. 1, n. 1, p. 3–13, 1993.

GUPTA, S.; PALSULE-DESAI, O. D. Sustainable supply chain management: review and research opportunities. **IIMB Management Review**, v. 23, n. 4, p. 234–245, 2011.

HELMING, K.; PÉREZ-SOBA, M.; TABBUSH, P. **Sustainability impact assessment of land use changes**. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2008.

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

HIDAYATNO, A.; DESTYANTO, A. R.; HULU, C. A. Industry 4.0 Technology Implementation Impact to Industrial Sustainable Energy in Indonesia: A Model Conceptualization. **Energy Procedia**, v. 156, p. 227–233, 2019.

HIGGINS, J. P. T.; GREEN, S. **Cochrane handbook for systematic reviews of interventions**. Wiley Online Library, 2008.

HOTELLING, H. The economics of exhaustible resources. **Journal of political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137–175, 1931.

HUBBARD, G. Measuring organizational performance: beyond the triple bottom line. **Business Strategy and the Environment**, v. 18, n. 3, p. 177–191, 1 mar. 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Síntese de indicadores sociais : uma análise das condições de vida da população brasileira : 2013**. n. 32 ed. Rio de Janeiro. 2013.

IBGE. Instituo Brasileiro de Geografia e Estatística. **Síntese de indicadores sociais. Informações demográficas e socioeconômicas**. n. 37 ed. Rio de Janeiro. 2013.

IUNG, B.; LEVRAT, E. Advanced maintenance services for promoting sustainability. **Procedia CIRP**. Elsevier B.V, v. 22, p. 15-22, 2014

IWAMOTO, H. H. et al. Saúde ocupacional: controle médico e riscos ambientais. **Acta Scientiarum. Health Sciences**, v. 30, n. 1, p. 27–32, 2008.

JACOBS, P.; GARDNER, J.; MUNRO, D. Sustainable and equitable development: An emerging paradigm. **Conservation with Equity: Strategies for Sustainable Development, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Cambridge, UK**, p. 17–29, 1987.

KAGERMANN, H.; JOHANNES, H. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. **Final report of the Industrie 4.0 WG**, n. April, p. 82, 2013.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 408–425, 2018.

KARAM, F. C.; LOPES, M. H. I. Ortopedia - Origem Histórica, o ensino no Brasil e estudos metodológicos pelo mundo. **Scientia Medica**, v. 15, n. n. 3, p. 172–178, 2005.

KAYIKCI, Y. Sustainability impact of digitization in logistics. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 782–789, 2018.

KHAN, K. S. et al. Five steps to conducting a systematic review. **Journal of the royal society of medicine**, v. 96, n. 3, p. 118–121, 2003.

KIEL, D. et al. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. **International Journal of Innovation Management**, v. 21, n. 8, p. 34, 2017.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1–26, 2004.

KRAJNC, D.; GLAVIČ, P. Indicators of sustainable production. **Clean technologies and environmental policy**, v. 5, n. 3–4, p. 279–288, 2003.

KUHLMAN, T.; FARRINGTON, J. What is sustainability? **Sustainability**, v. 2, n. 11, p. 3436-3448, 2010.

LAKATOS, E.; MARCONI, M. DE A. **Metodologia científica**. São Paulo, Editora Atlas, Ed. 1, 1991.

LEBEL, L.; LOREK, S.; DANIEL, R. Sustainable production consumption systems. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 33, p. 241-275, 2014.

LEE, G.-C.; KIM, R. H. Incidence of modern alumina ceramic and alumina matrix composite femoral head failures in nearly 6 million hip implants. **The Journal of arthroplasty**, v. 32, n. 2, p. 546–551, 2017.

LELE, S. M. Sustainable development: a critical review. **World development**, v. 19, n. 6, p. 607–621, 1991.

LIU, Z. Y. et al. Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 834–845, 2018.

LJUNGBERG, L. Y. Materials selection and design for development of sustainable products. **Materials & Design**, v. 28, n. 2, p. 466–479, 2005.

LUTHRA, S.; MANGLA, S. K. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 168–179, 2018.

MALTHUS, T. R. **Population: The First Essay**. Cambridge: Cambridge University, 1798.

MALTHUS, T. R. An essay on the principle of population. 1798. **The Works of Thomas Robert Malthus, London, Pickering & Chatto Publishers**, v. 1, p. 1–139, 1986.

MAN, J. C. DE; STRANDHAGEN, J. O. An Industry 4.0 Research Agenda for Sustainable Business Models. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 721–726, 2017.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. An Analysis on Sustainable Supply Chain for Circular Economy. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 477–484, 2019a.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers & Industrial Engineering**, v. 127, p. 925–953, 2019b.

MARTÍN-GÓMEZ, A.; AGUAYO-GONZÁLEZ, F.; LUQUE, A. A holonic framework for managing the sustainable supply chain in emerging economies with smart connected metabolism. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 219–232, 2019.

MARTÍNEZ, E. et al. Comparative evaluation of life cycle impact assessment software tools through a wind turbine case study. **Renewable Energy**, v. 74, p. 237–246, 1 fev. 2015.

MATOS, D. R.; ARAUJO, T. Qualidade de vida e envelhecimento: questões específicas sobre osteoartrose. **Psicologia em Estudo**, v. 14, n. 3, p. 511–518, 2009.

MAXWELL, D.; VAN DER VORST, R. Developing sustainable products and services. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 8 SPEC., p. 883–895, 2003.

MEADOWS, D. H. et al. **The limits to growth: a report to the club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. Universe Books, New York, NY, USA, 205p, 1974.

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.

MOKTADIR, M. A. et al. Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. **Process Safety And Environmental Protection**, v. 117, p. 730–741, jul. 2018.

MORRAR, R.; ARMAN, H.; MOUSA, S. The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0): A Social Innovation Perspective. **Technology Innovation Management Review**, v. 7, n. 11, p. 12–20, nov. 2017.

MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K.-I. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2018.

MÜLLER, J. M.; VOIGT, K.-I. Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 5, n. 5, p. 659–670, 2018.

NAGY, J. et al. The role and impact of industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain-the case of hungary. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 10, 2018.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Our common journey: a transition toward sustainability**. National Academies Press, Washington DC, 1999.

O'BRIEN, C. Sustainable production–a new paradigm for a new millennium. **International Journal of Production Economics**, v. 60, p. 1–7, 1999.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Programme for the Further Implementation of Agenda 21**. New York, 1997. Disponível em: https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N97/774/73/PDF/N9777473.pdf?OpenElement. Acesso em: 10 de julho de 2019.

ONU. Organização das Nações Unidas. **17 Objetivos para transformar o mundo**. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/. Acesso em: 14 set. 2019.

ONU. Organização das Nações Unidas. **A Agenda 2030**. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/. Acesso em: 14 set. 2019.

ONU. Organização das Nações Unidas. **World Population Prospects 2019**. New York. 2019 Disponível em: https://population.un.org/wpp/. Acesso em: 23 abr. 2020.

ORTHOWORLD. **The Orthopaedic Industry Annual Report**. 2019. Disponível em: https://www.bonezonepub.com/2298-orthopedic-industry-surpasses-51-billion-in-global-revenue. Acesso em: 27 nov. 2019.

PAMPANELLI, A. B.; FOUND, P.; BERNARDES, A. M. Sustainable manufacturing: the lean and green business model. In: **Sustainable Operations Management**. Springer, p. 131–161. 2015.

PARAGAHAWEWA, U.; BLACKETT, P.; SMALL, B. Social life cycle analysis (S-LCA): some methodological issues and potential application to cheese production in New Zealand. **Report by Agresearch**, v. 96, 2009.

PARK, B. J. et al. Augmented and Mixed Reality: Technologies for Enhancing the Future of IR. **Journal of Vascular and Interventional Radiology**, Vol. 31, n. 7, p. 1074-1082, 2020.

PARK, J. B.; BRONZINO, J. D. **Biomaterials - Principles and Applications**. Vol. 1, 2n ed. Florida: CRC Press LLC, 2003.

PICONI, C.; PORPORATI, A. A. Bioinert ceramics: Zirconia and alumina. **Handbook of Bioceramics and Biocomposites**, p. 59–89, 2016.

PINZONE, M. et al. A framework for operative and social sustainability functionalities in Human-Centric Cyber-Physical Production Systems. **Computers and Industrial Engineering**, 2019.

PORTER, M. E. **Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance**. 1985. ed. New York, NY, USA: Free Press, 1985.

PRAUSE, G. Sustainable business models and structures for Industry 4.0. **Journal of Security & Sustainability**, v. 5, n. 2, p. 159-169, 2015.

PRAUSE, G.; ATARI, S. On sustainable production networks for industry 4.0. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, v. 4, n. 4, p. 421–431, 2017.

RAO, J. S. Industrial Revolution. In: **History of Rotating Machinery Dynamics. History of Mechanism and Machine Science**, vol 20. Springer, Dordrecht, 2011.

RAZAK, I. H. A. et al. ISO 13485: 2003. **The TQM Journal**, v. 21, n. 1, p. 6–19, 2009.

RELVAS, C. et al. Sistema de fabrico rápido de implantes ortopédicos. **Revista Brasileira de Ortopedia**, v. 44, n. 3, p. 260–265, 2009.

ROCHA, B. A. DA S.; NETO, R. J. DE L.; DUARTE, T. M. G. P. **Desenvolvimento do processo de produção de próteses em ligas de Titânio INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto, 2010.

RODRIGUES, L. F.; JESUS, R. A.; SCHÜTZER, K. Industrie 4.0 – Uma Revisão da Literatura. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 19, n. 38, p. 33–45, 30 dez. 2016.

ROY, R. Sustainable product-service systems. **Futures**, v. 32, n. 3–4, p. 289–299, 2000.

SAMPAIO, R.; MANCINI, M. C. Estudos de Revisão Sistemática: Um Guia para Síntese Criteriosa da Evidência Científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.

SANTOS, K. et al. Opportunities Assessment of Product Development Process in Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1358–1365, 2017.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. World Economic Forum, Suíça, Davos, 2017.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1699–1710, 2008.

SILVESTRE, B. Sustainable supply chain management: current debate and future directions. **Gestão & Produção**, v. 23, n. 2, p. 235–249, 2016.

SJÖDIN, D. R. et al. Smart Factory Implementation and Process Innovation: A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing. **Research Technology Management**, v. 61, n. 5, p. 22–31, 2018.

SRIVASTAVA, S. K. Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. **International journal of management reviews**, v. 9, n. 1, p. 53–80, 2007.

STACHOVÁ, K. et al. External partnerships in employee education and development as the key to facing industry 4.0 challenges. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 2, p. 345-364 2019.

STOCK, T. et al. Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 118, p. 254–267, 2018.

STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 536–541, 2016.

STRANDHAGEN, J. O. et al. Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 359–369, 2017.

TORBACKI, W.; KIJEWSKA, K. Identifying Key Performance Indicators to be used in Logistics 4.0 and Industry 4.0 for the needs of sustainable municipal logistics by means of the DEMATEL method. **Transportation Research Procedia**, v. 39, p. 534–543, 2019.

TSAI, W.-H.; LU, Y.-H. A framework of production planning and control with carbon tax under industry 4.0. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, p. 3321-3345, 2018.

TUMELERO, C.; SBRAGIA, R.; EVANS, S. Cooperation in R & D and eco-innovations: The role in companies' socioeconomic performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 1138–1149, 2019.

VANCLAY, F. The triple bottom line and impact assessment: how do TBL, EIA, SIA, SEA and EMS relate to each other? **Journal of Environmental Assessment Policy and Management**, v. 06, n. 03, p. 265–288, 2004.

VELEVA, V.; ELLENBECKER, M. Indicators of sustainable production : framework and methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 1, p. 519–549, 2001.

VINODH, S.; RATHOD, G. Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 8, p. 833–842, 2010.

WAIBEL, M. W. et al. Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 731–737, 2017.

WANG, T.; ZHANG, Y.; YU, H.; WANG, F. **Advanced Manufacturing Technology in China: A Roadmap to 2050**. Springer Berling Heidelberg, 2012.

WCED. **Our common future**. Oxford University Press, New York, EUA, 1987.

WIERSUM, K. F. 200 years of sustainability in forestry: lessons from history. **Environmental management**, v. 19, n. 3, p. 321–329, 1995.

WILDERER, P. A. Sustainable water resource management: the science behind the scene**. Sustainability Science,** v. 2, n.1, p. 1-4, 2007.

WILLIAMS, D. F. The Williams dictionary of biomaterials. **Materials Today,** v. 3, n. 2, p. 1-29, 1999.

WOODWARD, D. G. Life cycle costing - Theory, information acquisition and application. **International Journal of Project Management**, v. 15, n. 6, p. 335–344, 1997.

YAZDI, P. G.; AZIZI, A.; HASHEMIPOUR, M. An empirical investigation of the relationship between overall equipment efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, p. 3031-3059, 2018.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e métodos**. Bookman Editora, Porto Alegre, 2015.

APÊNDICE A – Lista de Artigos da RSL

Quadro 17 - Artigos da RSL

#	Título do Artigo	Revista	Ano	Autores
1	A framework of production planning and control with carbon tax under industry 4.0	Sustainability	2018	Lu, Y.H. e Tsai, W.H.
2	A holonic framework for managing the sustainable supply chain in emerging economies with smart connected metabolism	Resources, Conservation and Recycling	2019	Aguayo-González, F., Luque, A. e Martín-Gómez, A.
3	A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements	Computers & Industrial Engineering	2019	Jayakrishna, K. e Manavalan, E.
4	An Analysis on Sustainable Supply Chain for Circular Economy	Procedia Manufacturing	2019	Jayakrishna, K. e Manavalan, E.
5	An empirical investigation of the relationship between overall equipment efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach	Sustainability	2018	Azizi, A., Hashemipour, M. e Yazdi, P.G.
6	An Industry 4.0 Research Agenda for Sustainable Business Models	Procedia CIRP	2017	Man, J.C. e Strandhagen, J.O.
7	Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection	Process Safety and Environmental Protection	2018	Ali, S.M., Kusi-Sarpong, S., Moktadir, M.A. e Shaikh, M.A.A.
8	Cooperation in R & D and eco-innovations: The role in companies' socioeconomic performance	Journal of Cleaner Production	2019	Evans, S., Sbragia, R. e Tumelero, C.
9	Cyber-physical-based PAT (CPbPAT) framework for Pharma 4.0	International Journal of Pharmaceutics	2019	Akdag, Y., Barenji, R.V., Oner, L. e Yet, B.
10	Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers	Sustainability	2019	Birkel, H.S., Hartmann, E., Müller, J.M., Veile, J.W. e Voigt, K.I.
11	Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies	Process Safety and Environmental Protection	2018	Luthra, S. e Mangla, S.K
12	Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies	Sustainability	2018	Adrodegari, F., Bressanelli, G., Perona, M. e Saccani, N.
13	External partnerships in employee education and development as the key to facing industry 4.0 challenges	Sustainability	2019	Kohnová, L., Papula, J., Stacho, Z. e Stachová, K.

#	Título do Artigo	Revista	Ano	Autores
14	Hybrid Exergetic Analysis LCA approach and the Industry 4.0 paradigm: Assessing Manufacturing Sustainability in an Italian SME	Procedia Manufacturing	2019	Chimenti, M., Dassisti, M. e Semeraro, C.
15	Identifying Key Performance Indicators to be used in Logistics 4.0 and Industry 4.0 for the needs of sustainable municipal logistics by means of the DEMATEL method	Transportation Research Procedia	2019	Kijewska, K. e Torbacki, W.
16	Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges	Sustainability	2018	Bonilla, S.H., da Silva, M.T., Gonçalves, R.F., Sacomano, J.B. e Silva, H.R.O.
17	Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential	Process Safety and Environmental Protection	2018	Kohl, H., Kunz, S., Obenaus, M. e Stock, T.
18	Industry 4.0 Technology Implementation Impact to Industrial Sustainable Energy in Indonesia: A Model Conceptualization	Energy Procedia	2019	Destyanto, A.R., Hidayatno, A. e Hulu, C.A.
19	Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains	Computers & Industrial Engineering	2019	Ghadimi, P., Heavey, C., Lim, M.K e Wang, C.
20	Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements	Procedia Manufacturing	2017	Moloko, N., Oosthuizen, G.A., Steenkamp, L.P. e Waibel, M.W.
21	IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0	IEEE Access	2018	Garrido-Hidalgo, C., Hortelano, D., Lopez, V., Olivares, T., Roda-Sanchez, L. e Ruiz, M.C.
22	Logistics 4.0 and emerging sustainable business models	Advances in Manufacturing	2017	Fragapane, G., Sharma, N., Stangeland, A.B.H., Strandhagen, J.O., Strandhagen, J.W. e Vallandingham, L.R.
23	Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing	Procedia Manufacturing	2018	Carvalho, N., Cazarini, E., Chaim, O. e Gerolamo, M.
24	On sustainable production networks for industry 4.0	Entrepreneurship and Sustainability Issues	2017	Atari, S. e Prause, G.
25	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0	Procedia CIRP	2016	Seliger, G. e Stock, T.

#	Título do Artigo	Revista	Ano	Autores
26	Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains	Process Safety and Environmental Protection	2018	Ding, B.
27	Smart Factory Implementation and Process Innovation: A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing	Research Technology Management	2018	Leksell, M., Parida, V., Petrovic, A. e Sjödin, D.R.
28	Sustainability impact of digitization in logistics	Procedia Manufacturing	2018	Kayikci, Y.
29	Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology	2018	Müller, J.M., Voigt, K.I.
30	Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0	International Journal of Innovation Management	2017	Arnold, C., Kiel, D., Müller, J.M. e Voigt, K.I.
31	Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives	Process Safety and Environmental Protection	2018	Gawankar, S. A., Gunasekaran, A. e Kamble, S.S.
32	The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0): A Social Innovation Perspective	Technology Innovation Management Review	2017	Arman, H., Morrar, R. e Mousa, S.
33	The paradigms of Industry 4.0 and circular economy as enabling drivers for the competitiveness of businesses and territories: The case of an Italian ceramic tiles manufacturing company	Social Sciences	2018	Ferrari, A.M., Garcia-Muiña, F.E., González-Sánchez, R. e Settembre-Blundo, D.
34	The role and impact of industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain-the case of Hungary	Sustainability	2018	Erdei, E., Máté, D., Nagy, J., Oláh, J. e Popp, J.
35	What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability	Sustainability	2018	Kiel, D., Müller, J.M. e Voigt, K.I.
36	When titans meet – Can industry 4.0 revolutionize the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors	Technological Forecasting and Social Change	2018	de Sousa Jabbour, A.B.L, Foropon, C., Godinho Filho, M. e Jabbour, C.J.C.

Fonte: Elaborado a partir da RSL.