

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MARCO ANTONIO PAULA PINHEIRO

**GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA A
ECONOMIA CIRCULAR: UMA PESQUISA MULTIMÉTODO NO
CENÁRIO BRASILEIRO**

Bauru/SP
2020

MARCO ANTONIO PAULA PINHEIRO

**GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA A
ECONOMIA CIRCULAR: UMA PESQUISA MULTIMÉTODO NO
CENÁRIO BRASILEIRO**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Jugend

Bauru/SP
2020

Pinheiro, Marco Antonio Paula.

Gestão de desenvolvimento de produtos para a economia circular: uma pesquisa multimétodo no cenário brasileiro/ Marco Antonio Paula Pinheiro. Bauru, 2020
165 f. : il.

Orientador: Daniel Jugend

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Desempenho da empresa. 2. Desenvolvimento de novos produtos. 3. Design sustentável. 4. Sustentabilidade. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARCO ANTONIO PAULA PINHEIRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 15 dias do mês de dezembro do ano de 2020, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de MARCO ANTONIO PAULA PINHEIRO, intitulada **GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA A ECONOMIA CIRCULAR: UMA PESQUISA MULTIMÉTODO NO CENÁRIO BRASILEIRO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. DANIEL JUGEND (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ENZO BARBERIO MARIANO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof^a. Dr^a. PAULA DE CAMARGO FIORINI (Participação Virtual) do(a) Departamento De Administração / Universidade Federal de São Carlos - Ufscar, Prof. Dr. FABIANO ARMELLINI (Participação Virtual) do(a) Department of Mathematical and Industrial Engineering / École Polytechnique de Montréal, Prof. Dr. CHARBEL JOSE CHIAPPETTA JABBOUR (Participação Virtual) do(a) Lincoln International Business School / University of Lincoln. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado

----- . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. DANIEL JUGEND

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antonio e Marli, por terem me educado com amor e princípios, e à minha esposa Érika Pinheiro, por ser minha fortaleza, sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela capacitação intelectual e desenvolvimento nesta etapa de minha carreira acadêmica.

À minha esposa Érika Pinheiro, por ser minha fortaleza, sempre me apoiando, independentemente do contexto ou situação.

Agradeço ao Professor Dr. Daniel Jugend, meu orientador. Além de ser paciente, sempre bem humorado e disposto, contribuiu diretamente com meu desenvolvimento, permitindo que pudesse aprimorar e adquirir novos conhecimentos a partir da oportunidade de trabalhar ao seu lado.

Ao Professor Dr. Charbel José Chiappetta Jabbour, pela dedicação aplicada à pesquisa, sendo um dos maiores motivadores de meu empenho científico desde a disciplina de métodos de pesquisa, a qual mudou minha visão sobre o mundo acadêmico.

Ao meu supervisor no estágio de pesquisa em Montréal, Prof. Dr. Fabiano Armellini, pelo apoio no desenvolvimento e aplicação de projetos pessoais e acadêmicos, contribuindo com seu conhecimento e compartilhando experiências incríveis.

Ao Professor Dr. Enzo Mariano, por contribuir diretamente com a qualidade da minha pesquisa, desde a defesa do mestrado, e principalmente, durante a disciplina de desenvolvimento humano, uma das mais desafiadoras do programa.

Agradeço também à Professora Dra. Paula Fiorini, pela amizade construída, pela qualidade do trabalho realizado nas disciplinas que estivemos juntos, além das colaborações na construção de artigos.

Agradeço também a todos os professores que se mostraram dedicados durante as disciplinas ministradas, compartilhando conhecimento e apoiando a expansão da pesquisa acadêmica, e aos colegas discentes, pela colaboração e troca de conhecimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo financiamento de parte desta pesquisa, com estágio no exterior (Processo CAPES/PRINT 88887.370707/2019-00).

RESUMO

São várias e recentes as pesquisas apontando o desenvolvimento de produtos circulares (DPC) como fator relevante para se atender aos princípios da economia circular (EC). Apesar disto, sabe-se que a adoção do DPC em empresas de manufatura ainda é limitada. Soma-se a isso o fato de que são recentes os esforços de pesquisa que buscaram sistematizar o DPC e, ainda, não foram encontrados estudos que relacionassem este conceito com o desempenho das firmas. Assim, este estudo visa preencher esta lacuna, aprofundando o conhecimento em um contexto de complexidade e tendência, sobre a compreensão do DPC e as suas relações com as tecnologias da indústria 4.0, e *stakeholders* envolvidos; bem como investigar as suas influências no desempenho das firmas. Para isso, além de revisão sistemática e de conteúdo da literatura, foi realizado estudo de dois casos, sendo um em empresa de biodiversidade e outro em empresa de infraestrutura. Por fim, uma pesquisa quantitativa do tipo *survey* no setor de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) foi realizada, na qual a técnica *Partial Least Squares* (PLS) da Modelagem de Equações Estruturais (SEM) foi adotada para a análise dos dados coletados. Dentre os resultados apresentados nesta tese de doutorado, destaca-se primeiramente o desenvolvimento e teste do constructo DPC, o qual não foi encontrado na literatura. Considerando a validação das hipóteses, identificou-se a maior relação presente entre as tecnologias da indústria 4.0 e o DPC, com destaque para *big data*, *internet* das coisas, computação em nuvem e inteligência artificial. A pressão de *stakeholders* também se mostrou importante, na qual atores como a cadeia de suprimentos, mercado consumidor e governo são os mais relevantes neste contexto. Ainda, foi confirmado que a adoção do DPC pode influenciar positivamente os desempenhos ambiental e de mercado das empresas, nos quais os indicadores mais sensíveis são a diminuição na geração de resíduos sólidos e o aumento da competitividade, respectivamente.

Palavras-chave: Desempenho da empresa; desenvolvimento de novos produtos; *design* sustentável; sustentabilidade.

ABSTRACT

There are several and recent researches that have pointed out the circular product design (CPD) as a relevant factor to meet the principles of the circular economy (CE). Despite this, it is known that the adoption of CPD in manufacturing companies is still limited. Added to this is the fact that research efforts that sought to systematize the CPD are recent and, yet, no studies have been found that relate this concept to the performance of firms. Thus, this study aims to fill this gap, deepening knowledge in a context of complexity and trend, on understanding the CPD and its relations with the technologies of industry 4.0, and stakeholders involved; as well as investigating their influence on the performance of firms. For this, in addition to a systematic review and content of the literature, a study of two cases was carried out, one in a biodiversity company and the other in an infrastructure company. Finally, a quantitative survey in the Electrical and Electronic Equipment (EEE) sector was carried out, in which the Partial Least Squares (PLS) technique of Structural Equation Modeling (SEM) was adopted for the analysis of the collected data. Among the results presented in this doctoral thesis, the development and test of the CPD construct stands out, which was not found in the literature. Considering the validation of the hypotheses, we identified the biggest relationship between industry 4.0 technologies and the DPC, with emphasis on big data, internet of things, cloud computing and artificial intelligence. The pressure from stakeholders was also important, in which actors such as the supply chain, consumer market and government are the most relevant in this context. Furthermore, it was confirmed that the adoption of the CPD could positively influence environmental and market performance of companies, in which the most sensitive indicators are the decrease in the generation of solid waste and the increase in competitiveness, respectively.

Keywords: Firm's performance; new product development; sustainable design; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Panorama da abordagem multimétodo e desenvolvimento desta tese.	26
Figura 2. Estrutura da tese.	30
Figura 3. Diagrama borboleta de <i>Ellen MacArthur Foundation</i>	34
Figura 4. Tipologia de abordagens de projeto para integridade de produto.	38
Figura 5. Modelo da pesquisa quantitativa.	49
Figura 6. Etapas aplicadas para busca e seleção da amostra dos artigos revisados.	52
Figura 7. Ilustração da distribuição geográfica das publicações.	69
Figura 8. Medidas do modelo estrutural.	101
Figura 9. <i>Framework</i> integrativo.	123

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolução das publicações ao longo do tempo.....	67
Gráfico 2. Abordagem metodológica das publicações.	70
Gráfico 3. Distribuição de métodos aplicados nas publicações.....	71
Gráfico 4. Distribuição das estratégias de <i>design</i>	76
Gráfico 5. Distribuição das tecnologias da indústria 4.0 relacionadas à adoção do DPC....	77
Gráfico 6. Distribuição dos <i>stakeholders</i> abordados pelos artigos revisados.	79
Gráfico 7. Distribuição dos desafios e barreiras associadas ao DPC.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Proposta de ações para a economia circular.	35
Quadro 2. Constructo pressão de <i>stakeholders</i>	59
Quadro 3. Constructo indústria 4.0.....	59
Quadro 4. Constructo desenvolvimento de produto circular.	60
Quadro 5. Constructo desempenho ambiental.	61
Quadro 6. Constructo desempenho de mercado.	61
Quadro 7. Principais artigos em quantidade de citações no tema DPC.....	72
Quadro 8. Principais estratégias de <i>design</i> (DfX).	73
Quadro 9. Principais variáveis comentadas pelos entrevistados da empresa A.	85
Quadro 10. Principais variáveis comentadas pelos entrevistados da empresa B.....	90
Quadro 11. Destaques da revisão sistemática na dimensão panorama da literatura.....	106
Quadro 12. Destaques da dimensão estratégias de <i>design</i> (DfX).....	111
Quadro 13. Destaques da dimensão tecnologias da indústria 4.0 na adoção do DPC.....	115
Quadro 14. Destaques da dimensão <i>stakeholders</i> relacionados com o DPC.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Avaliação do viés de não resposta.	64
Tabela 2. Principais periódicos em quantidade de artigos publicados.	68
Tabela 3. Principais continentes em quantidade de artigos publicados no tema DPC.	68
Tabela 4. Perfil das empresas e entrevistados.	92
Tabela 5. Avaliação do modelo de medição para indústria 4.0 e pressão dos <i>stakeholders</i>	94
Tabela 6. Avaliação do modelo para DPC, desempenhos ambiental e de mercado.	95
Tabela 7. Avaliação da validade discriminante e correlações.	96
Tabela 8. Avaliação do modelo estrutural.	98
Tabela 9. Testes das hipóteses.	99
Tabela 10. Avaliação do viés de endogeneidade por meio do teste de Heckman.	102
Tabela 11. Avaliação de efeitos não lineares.	103
Tabela 12. Avaliação da heterogeneidade não observada usando o método FIMIX.	104

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	18
1.2	Relevância e Justificativas	23
1.3	Questão e Objetivos de Pesquisa	27
1.3.1	Objetivos específicos	28
1.4	Estrutura da Tese	29
2	REVISÃO TEÓRICA	31
2.1	Economia Circular	31
2.2	Desenvolvimento de Produtos Circulares	36
2.3	Tecnologias da indústria 4.0 no DPC	41
2.4	O papel dos stakeholders no DPC	44
2.5	Desempenho ambiental e de mercado das empresas	46
3	MÉTODO DE PESQUISA	50
3.1	Revisão Sistemática da Literatura	50
3.2	Etapa de Estudo de Casos	54
3.2.1	<i>Elaboração do questionário de pesquisa</i>	55
3.2.2	<i>Processo de seleção das empresas</i>	56
3.3	Etapa Quantitativa	57
3.3.1	<i>Natureza das variáveis e medidas adotadas</i>	58
3.3.2	<i>Descrição da amostra e coleta de dados</i>	62
3.3.3	<i>Análise dos dados</i>	64
4	RESULTADOS	66
4.1	Revisão Sistemática da Literatura	66
4.1.1	<i>Panorama da literatura em DPC</i>	66
4.1.2	<i>Abordagem metodológica e características da literatura</i>	69

4.1.3	<i>Impacto da pesquisa</i>	71
4.1.4	<i>Estratégias de design (DfX)</i>	72
4.1.5	<i>Tecnologias da indústria 4.0 relacionadas à adoção do DPC</i>	77
4.1.6	<i>Principais stakeholders inerentes ao DPC</i>	78
4.1.7	<i>Desafios e barreiras relacionadas ao DPC</i>	79
4.2	<i>Etapa de Estudo de Casos</i>	81
4.2.1	<i>Caracterização das empresas</i>	81
4.2.2	<i>Resultados do caso A</i>	82
4.2.2.1	<i>Práticas para adoção do DPC</i>	82
4.2.2.2	<i>Contexto do desenvolvimento de produtos de biodiversidade</i>	84
4.2.3	<i>Resultados do caso B</i>	86
4.2.3.1	<i>Práticas para adoção do DPC</i>	87
4.2.3.2	<i>Contexto do desenvolvimento de produtos de infraestrutura</i>	89
4.3	<i>Etapa Quantitativa</i>	92
4.3.1	<i>Perfil das empresas respondentes</i>	92
4.3.2	<i>Avaliação do modelo de medição</i>	93
4.3.3	<i>Avaliação do modelo estrutural</i>	97
4.3.4	<i>Modelo conceitual e o teste de hipóteses</i>	98
4.3.5	<i>Verificações de robustez</i>	102
5	<i>DISCUSSÕES</i>	105
5.1	<i>Panorama Geral do DPC</i>	105
5.2	<i>Discussão Integrada dos Resultados</i>	107
5.2.1	<i>Estratégias de design (DfX)</i>	107
5.2.2	<i>Tecnologias da indústria 4.0</i>	111
5.2.3	<i>Pressão e relevância dos stakeholders</i>	116
5.2.4	<i>O impacto do DPC no desempenho das firmas</i>	120

5.3 Framework Integrativo	122
6 CONCLUSÕES	125
6.1 Principais Contribuições.....	125
6.2 Implicações Teóricas	128
6.3 Implicações Práticas	130
6.4 Limitações e Direções Futuras	131
FINANCIAMENTO	134
REFERÊNCIAS	135
APÊNDICE A – Lista de Artigos Revisados (<i>Scopus</i>)	157
APÊNDICE B – Questionário aplicado na etapa de estudo de casos.....	160
APÊNDICE C – Carta-convite e questionário aplicado na etapa quantitativa.....	162

1 INTRODUÇÃO

Diante do recente destaque promovido à adoção da Economia Circular (EC) como forma de realizar o uso mais sustentável dos recursos naturais (ELIA; GNONI; TORNESE, 2020; KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018), e do processo de desenvolvimento de produtos (PDP) como meio para buscar atingir a sustentabilidade ambiental (SHAHBAZI et al., 2020), esta tese aplica uma abordagem multimétodo que visa o aprofundamento no campo de conhecimento em desenvolvimento de produtos circulares (DPC), a análise de suas relações com a indústria 4.0 e a pressão de *stakeholders*, assim como sua influência nos desempenhos ambiental e de mercado de empresas operantes no cenário brasileiro. Temas que vem se mostrando prementes em recentes pesquisas publicadas, porém, ainda sem uma análise conjunta entre eles.

Em momento em que se debate a transição de um sistema linear de produção e consumo para uma EC, a gestão de desenvolvimento de produtos e serviços é relevante, pois contribui para esta transição (SHAHBAZI; JÖNBRINK, 2020). Em nível internacional, sob um modelo de desenvolvimento sustentável, as considerações de EC vem sendo analisadas sob a ótica de sua integração com o PDP (MORENO et al., 2016; SUBRAMANIAN et al., 2018), e recentemente apontada na literatura como o “desenvolvimento de produto circular” ou “*circular product design*” no idioma inglês (MESTRE; COOPER, 2017; SHAHBAZI et al., 2020).

Assim, esta tese baseia-se principalmente na definição proposta por Shahbazi et al. (2020), na qual a integração da EC ao PDP apoia a tomada de decisões e valoriza a circularidade dos produtos, por meio das estratégias de *design for X* (DfX), associadas ao DPC (BOCKEN et al., 2016; DEN HOLLANDER et al., 2017).

Inicialmente, uma revisão sistemática da literatura foi realizada com o objetivo de identificar o ‘*estado da arte*’, as lacunas, a relevância e implicações dos tópicos relacionados ao tema. Esta etapa inicial da pesquisa foi necessária para a definição dos constructos a serem investigados, e construção dos instrumentos de pesquisa aplicados na etapa empírica desta tese, composta pela realização do estudo de dois casos, um em empresa de biodiversidade, e outro de infraestrutura, setores relevantes para o cenário da construção civil no Brasil, bem como por uma pesquisa quantitativa tipo *survey*, aplicada em 142 empresas pertencentes ao setor de equipamentos eletroeletrônicos (EEE). Destaca-se que estes três setores investigados (biodiversidade, infraestrutura e EEE), estão entre os considerados mais promissores para a adoção da EC no cenário brasileiro (EMF, 2017).

Neste presente capítulo é apresentado o contexto geral desta pesquisa, assim como suas justificativas e objetivos.

1.1 Contextualização

A dissociação entre o crescimento econômico e o uso de recursos naturais tem sido apontada como uma discussão necessária na busca pelo desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS, 2017), visto que as preocupações com a poluição global, mudanças climáticas, perda de biodiversidade, e o esgotamento de recursos finitos tem assumido um papel cada vez mais relevante (MORENO et al., 2016; HALSTENBERG et al. 2019). Ainda, a preocupação com fatores como a utilização dos recursos e a preservação ambiental, por exemplo, tem crescido entre os consumidores e influenciado os governos a introduzirem regulamentações mais rígidas para as empresas, de modo que as tem forçado a repensar os impactos ambientais de suas atividades e processos (MCALOONE; PIGOSSO, 2017).

É reconhecido que o atual modelo econômico de crescimento linear “extrair-produzir-usar-descartar”, o qual depende de recursos finitos, tem exposto países à volatilidade e ganhos limitados de produtividade, além da perda de valor ocorrida pela geração dos resíduos (GARCÍA-BARRAGÁN, EYCKMANS; ROUSSEAU, 2019). Assim, como forma de suplantar este cenário, novas tendências tecnológicas passaram a surgir no contexto global, de modo a afetar organizações e o comportamento de consumo, criando novas oportunidades, novos modelos de negócios, como resultado, novos produtos (GEISSINGER et al., 2019).

A União Europeia (UE) e os países parceiros do Leste Europeu, por exemplo, têm fortalecido sua cooperação ao meio ambiente, e aplicado os conceitos de EC desde o Acordo de Paris (EUROPEAN UNION, 2018), abordando as principais preocupações ambientais, concentrando-se, em particular, nos desafios e oportunidades associadas à transição da economia linear para a circular. Além disso, a UE tem reafirmado a necessidade de manter a ação ambiental e climática no topo das agendas políticas e econômicas, apoiando os países parceiros orientais a modernizar a economia com foco no meio ambiente, para uma mitigação das mudanças climáticas e aquecimento global (EUROPEAN UNION, 2018).

Um outro país que tem se mostrado atento à legislação orientada a EC é a China (ZHU et al., 2019). Uma das ações da China alinhadas à preocupação ambiental foi aprovar a política “*National Sword*”, a qual proíbe a importação de resíduos plásticos não industriais (WANG et al., 2020). Neste sentido, uma política de gerenciamento do ciclo de vida dos produtos tende a direcionar empresas a assumirem a responsabilidade pelo resíduo criado, visando a transição de uma sociedade descartável para outra na qual há mais cuidado sobre como os recursos fluem pela economia.

Considerando estas políticas de gerenciamento de ciclo de vida dos produtos, o Canadá também pode ser considerado um dos países pioneiros, uma vez que possui 94 categorias de produtos cobertos por leis nas quais produtores, varejistas e consumidores

compartilham os custos de lidar com esses produtos no final de sua vida útil (SAGE, 2018). Um outro país de destaque em ações sustentáveis é a Dinamarca, premiada pela Organização das Nações Unidas (ONU) por adotar políticas que promovam a transição para a produção sustentável, o que está alinhado com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (UNITED NATIONS, 2018).

O contexto brasileiro também foi identificado como uma oportunidade para a adoção da EC em alta escala, uma vez que características como a abundância de recursos naturais, a dinâmica da economia informal, e o tamanho substancial do mercado em termos de território e população possuem amplo potencial para gerar valor em vários níveis de produção (EMF, 2017). Apesar das principais indústrias agrícolas e de manejo de terras florestais no Brasil ainda serem dominadas por um modelo linear de produção, a transição para a EC tem sido sugerida em três principais áreas: (i) Ativos Agrícolas e Biodiversidade; (ii) Infraestrutura e Construção; e (iii) Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) (EMF, 2017).

Neste sentido, para responder às demandas de clientes sensíveis às questões ambientais e, ao mesmo tempo, requisitos e restrições legais da EC, as empresas podem adotar práticas de DPC. No entanto, estas ponderações podem levar a projetos de produtos mais complexos em relação aos processos tradicionais, que não envolvem a circularidade (SUBRAMANIAN et al., 2018). Esta maior complexidade deve-se a natureza destes projetos de produtos que visam, sobretudo, empregar o conceito de *ciclo fechado*, de modo a considerar aspectos como o compartilhamento e a recuperação, reciclagem, remanufatura, reutilização, reparo e reforma de produtos e componentes (SINGH; ORDONEZ, 2016).

Diante destas tendências para diminuição de geração de resíduos e maior valor agregado nos ciclos produtivos, novos modelos econômicos e orientados a circularidade têm se apresentado como oportunidades para as empresas (HAN et al., 2017). O relatório da *Ellen MacArthur Foundation* (2015), por exemplo, identificou que a transição para a EC na Europa

poderia adicionar 1 trilhão de dólares ao PIB até 2030, aumentar a renda familiar em 3 mil dólares por ano e reduzir pela metade as emissões de CO₂ em comparação com os níveis atuais (EMF, 2015). Ainda, com a adoção do DPC, é previsto que haja um número crescente de novas oportunidades para produtos e serviços regenerativos e eco inovadores (EUROPEAN COMMISSION, 2019).

Alguns exemplos que permeiam a adoção do DPC já têm sido relatados na literatura. Haffmans et al. (2018), por exemplo, avaliaram um caso em que a embalagem plástica foi substituída pelo processo de uso de laser de alta definição para criar uma etiqueta diretamente no produto, com foco na eliminação do plástico em alimentos orgânicos. Em 2017, a empresa apresentada no estudo economizou 750.000 embalagens usando esta tecnologia em abacates. Outro exemplo de abordagem circular para produto é o canudo comestível lançado no mercado como iniciativas inovadoras e com apelo ecológico (BARRUCHO, 2018). Vários países, incluindo o Brasil, proibiram a produção, a comercialização e o uso de canudos de plástico, gerando oportunidades no mercado para estratégias circulares (BARRUCHO, 2018).

Produtos que abordam novos modelos de negócios por meio da servitização e sistemas produto-serviço ou *product-service system* (PSS) no idioma inglês, também apresentam sinergia com DPC (DEN HOLLANDER et al., 2017; HALSTENBERG et al., 2019). Nesse sentido, a rápida evolução das tecnologias digitais pode ser considerada um fator que contribui para a adoção do DPC (BAG et al., 2020; HALSTENBERG et al., 2019; ROSA et al., 2020), sendo que pesquisas sobre a aplicação destas tecnologias tem despontado em nível global (GHISELLINI et al., 2016). O compartilhamento de produtos e serviços por meio da intensificação da tecnologia da informação e a adoção de aplicativos móveis, também podem serem usados para o PSS (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; MCALOONE; PIGOSSO, 2017).

Vale notar que a aplicação da transformação digital no sistema produtivo e consequentemente no projeto do produto pode ser associada à Indústria 4.0 (JABBOUR et al., 2020; TSENG et al., 2018), sendo que estas novas tecnologias digitais apresentam potencial para oferecer soluções para reduzir os impactos negativos das organizações e sociedade sobre o meio ambiente, uma vez que a digitalização pode contribuir para o menor consumo de materiais durante o processo produtivo e consumo dos produtos (JABBOUR et al., 2020; NOBRE; TAVARES, 2019).

Algumas empresas também têm adotado tecnologias da Indústria 4.0 visando o menor consumo de energia e a melhor eficiência no consumo de insumos (TIWARI et al., 2015). Neste sentido, estudos também têm sugerido a importância de tecnologias da Indústria 4.0 para a adoção do DPC (por exemplo: LIN et al., 2017; HALSTENBERG et al., 2019), uma vez que estas tecnologias podem impulsionar o desenvolvimento de produtos inteligentes ou “*smart products*” (HALSTENBERG et al., 2019), assim como facilitar a adoção da manufatura aditiva nas empresas (DESPEISSE et al., 2017; SAUERWEIN et al., 2019).

Para países em desenvolvimento como o Brasil, a capacitação em soluções digitais também pode desempenhar um papel relevante, gerando impacto transformador nos avanços do país, a partir da adoção de novas tecnologias nos processos produtivos (EMF, 2017). As tecnologias da indústria 4.0 tem sido relatada como meio para superar estas barreiras (DE SOUSA JABBOUR et al, 2018), no entanto, pode exigir esforços de *stakeholders*, como governos e formuladores de políticas, em cooperação com indústrias e consumidores finais (DESPEISSE et al., 2017).

Apesar de governos, empresas e instituições acadêmicas já começarem a explorar estas oportunidades colaborativas relacionadas à EC (HAN et al., 2017; TECCHIO, et al., 2017), a literatura tem mostrado desafios associados à adoção do DPC (KANE et al., 2018). Sabe-se que ainda faltam tecnologias de produto e processos e que apoiem a adoção da EC,

os seus investimentos tendem a serem altos, e ainda existe incerteza se os consumidores estão preparados e mesmo dispostos a pagar mais caro por produtos oriundos das estratégias circulares, como por exemplo, produzidos com materiais reciclados ou reutilizados, e produtos remanufaturados (JESUS; MENDONÇA, 2018).

Outros aspectos relevantes em se romper com os padrões de linearidade são associados à legislação ineficaz e a cultura organizacional não alinhada à EC (KIRCHHERR et al., 2018), além das questões econômicas, como a incerteza de retorno do investimento em processos e produtos alinhados à EC (RITZÉN; SANDSTRÖM, 2017). O risco em se desenvolver e produzir produtos pouco atraentes para os mercado, acrescido dos poucos incentivos legais também têm se mostrado como barreiras à adoção da EC (BRESSANELLI et al., 2018). Por exemplo, a falta de demanda do mercado já havia sido identificada como uma barreira à adoção do *ecodesign* (BOKS, 2006; COSTA et al., 2017; JABBOUR et al., 2018), o que possivelmente deve se manter para o contexto do DPC.

1.2 Relevância e Justificativas

Pela característica recente da integração entres os temas EC e PDP, grande parte dos estudos nessas áreas concentram-se no entendimento teórico e aplicação da abordagem qualitativa para sua investigação (JABBOUR et al., 2020; PINHEIRO et al., 2019; SHAHBAZI et al., 2020). Além disso, poucos registros empíricos e, sobretudo, quantitativos estão disponíveis na literatura avaliando o conceito DPC. Desta forma, sua implementação apresenta-se como um desafio considerável para as empresas, projetistas e profissionais envolvidos com o PDP (LIEDER et al., 2017), visto que ainda é difícil alcançar os objetivos da EC, pois tanto as dificuldades de implementação, bem como as influências e os impactos

desse novo modelo econômico ainda estão em estudo em diversos setores industriais (CEHA, 2017).

Estas circunstâncias têm levado as empresas, especialmente de manufatura, a uma posição incerta quando se trata de práticas circulares, uma vez que os potenciais ganhos da adoção do DPC ainda estão em fase de exploração (SOUSA-ZOMER et al., 2018). Além disso, Subramanian et al., (2018) apontaram que a inclusão dos aspectos da EC no PDP está mudando o processo tradicional da gestão do desenvolvimento de produtos. Para estes autores, fatores como considerações de novas práticas com foco em ciclos fechados, aspectos regulamentares e de *marketing*, por exemplo, podem aumentar o tempo de desenvolvimento e lançamento dos produtos no mercado, bem como seus custos (SUBRAMANIAN et al., 2018). Como estas alterações atenderão aos requisitos dos clientes de produtos, serviços e tecnologias para as próximas décadas será uma consideração importante para a área de desenvolvimento de novos produtos.

Apesar de literatura indicar a importância de *stakeholders* (BALDASSARRE et al., 2017; GUPTA et al., 2019), bem como a relevância do papel da transformação digital e avanço da Indústria 4.0 na adoção da EC (BAG et al., 2020; ROSA et al., 2020), não se encontraram estudos que analisem as suas relações de influências em uma pesquisa multimétodos (qualitativa e quantitativa) e, especialmente, considerando a realidade de países emergentes como o Brasil. Ainda, é importante destacar que em países como o Brasil que ainda possuem um vazio institucional em relação a EC, o papel dos *stakeholders* torna-se ainda mais relevante para a adoção de práticas circulares (JABBOUR et al., 2020). Dessa forma, a teoria dos *stakeholders* merece ser mais profundamente investigada em EC e em DPC, especialmente, quando se considera este ambiente de vazio institucional identificado por Jabbour et al. (2020).

Além disso, como sugeriu a *Ellen MacArthur Foundation* em seu relatório (EMF, 2017), o cenário brasileiro necessita de uma análise mais completa do tamanho e do escopo de suas oportunidades em três áreas chaves: (i) Ativos Agrícolas e Biodiversidade; (ii) Infraestrutura e Construção; e (iii) Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) (EMF, 2017). Reforçando a relevância da economia brasileira, o relatório do *Global E-Waste Monitor* avaliou a quantidade de resíduos criados a partir de eletroeletrônicos descartados, e o Brasil lidera a classificação na América Latina, produzindo anualmente 1.500 toneladas de resíduos (BALDÉ et al., 2017).

Especificamente, empresas do setor de EEE são relevantes pois seus componentes são altamente poluentes (BOVEA; PÉREZ-BELIS, 2018; SASSANELLI et al., 2020) e desafios relacionados à reutilização e remanufatura de eletroeletrônicos já foram identificados na literatura do DPC (BOVEA; PÉREZ-BELIS, 2018; TALENS PEIRÓ et al., 2017). Ainda, dentre a indústria de manufatura, o setor de EEE está se tornando cada vez mais importante, no qual as tecnologias podem auxiliar o planejamento da produção na escolha dos processos ideais para projetos de automação, por exemplo (MAYR et al., 2018).

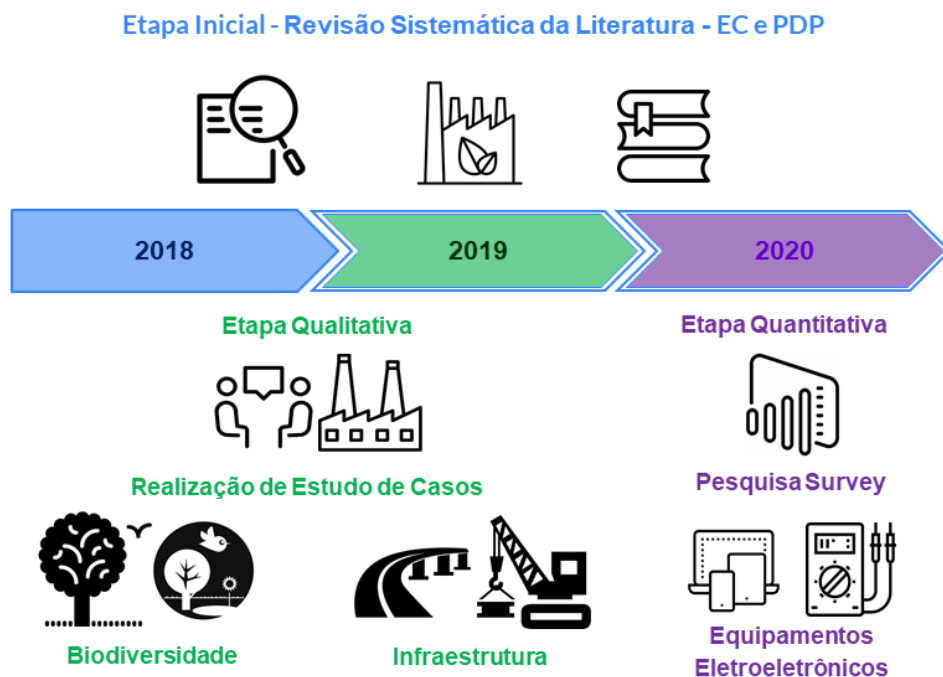
A questão dos Resíduos Sólidos da Construção e Infraestrutura também tem sido motivo de preocupação e discussão, pois é um setor com intensa geração de resíduos, respondendo por 51% a 70% dos resíduos sólidos urbanos, devido à limitações de plantas de triagem e reciclagem em grande parte dos municípios brasileiros (DA SILVA et al., 2017). Considerando os aspectos ligados à fauna e flora, o Brasil é conhecido por ter uma das maiores biodiversidades do mundo (MONGBAY, 2016), e a proteção da floresta amazônica é uma preocupação global (KHADKA, 2019), amplamente divulgada nos dias atuais.

Além disso, diversas empresas têm operado em áreas pertencentes às indústrias diretamente ligadas à biodiversidade, tais como madeireiras, agroindústria, pecuária, entre outras. A maior parte destas empresas estão envolvidas em atividades de desenvolvimento

de novos produtos e, portanto, essas indicações devem ser vistas como áreas para exploração adicional do conhecimento seja pela academia, formuladores de políticas públicas e empresas (EMF, 2017).

Dado o presente cenário, este estudo visa preencher esta lacuna, aprofundando o conhecimento em um contexto de complexidade e tendência, sobre a compreensão do DPC e as suas relações com as tecnologias da indústria 4.0, e *stakeholders* envolvidos; bem como investigar as suas influências no desempenho das firmas. Uma pesquisa multimétodo foi aplicada consistindo na combinação de uma revisão sistemática da literatura, seguida do estudo de dois casos, um em empresa de biodiversidade e outro em infraestrutura, e uma pesquisa quantitativa no setor de EEE. Assim, com o objetivo de contribuir com o *estado-da-arte* em DPC, fornecendo resultados teóricos e empíricos desta área, esta tese apresenta um panorama, baseado nas três etapas realizadas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Panorama da abordagem multimétodo e desenvolvimento desta tese.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 1, inicialmente, para a maior compreensão e familiaridade com o tema, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, iniciada em março de 2018 e atualizada regularmente durante todo o período de desenvolvimento desta tese. Posteriormente, a partir dos resultados da revisão sistemática, foram definidos os constructos e elaborados os instrumentos de pesquisa aplicados na etapa de pesquisa de campo, baseada na abordagem qualitativa e operacionalizada pelo método estudo de caso, em duas empresas dos setores apontados como mais proeminentes no cenário Brasileiro, uma no setor de biodiversidade e outra no setor de infraestrutura.

Por fim, realizou-se uma pesquisa quantitativa com alcance mais amplo, partindo de um questionário e levantamento tipo *survey*, em 142 empresas do setor de EEE, um dos mais sensíveis à adoção da EC no Brasil, além de economicamente relevante (EMF, 2017). A avaliação deste setor industrial tecnológico também se mostrou necessária considerando os resultados do estudo de casos, os quais apontaram para a relevância da adoção de tecnologias na prática das empresas, podendo atuar tanto como habilitadores, ou como barreiras à EC e ao DPC (HALSTENBERG et al., 2019; HOLTSTRÖM et al., 2019).

A aplicação integrada de abordagens de pesquisa multimétodo é defendida nas áreas de gestão de operações e gestão ambiental, pois tende a proporcionar maior riqueza de resultados, ajudando a entender e melhorar o fenômeno, ao mesmo tempo em que reforça a originalidade da pesquisa (MOLINA-AZORÍN; LÓPEZ GAMERO, 2014). Maiores informações sobre os procedimentos adotados podem ser acessados no capítulo três da tese.

1.3 Questão e Objetivos de Pesquisa

Considerando (i) a relevância do tema para as áreas de gestão de operações, sustentabilidade, inovação e PDP (JUGEND et al., 2020; SHAHBAZI et al., 2020); (ii) a

escassez de estudos empíricos na área em países em desenvolvimento (GOYAL; ESPOSITO; KAPOOR, 2016; SOUZA-ZOMER et al., 2018); e, (iii) a insuficiência de resultados que mostrem as relações de influência entre tecnologias da indústria 4.0, pressão de *stakeholders*, DPC e desempenho das empresas, a presente tese propõe a responder as seguintes questões de pesquisa:

- (i) *Como empresas têm adotado estratégias circulares na gestão do desenvolvimento de novos produtos e serviços, e quais as estratégias comumente adotadas?*
- (ii) *Quais as influências das tecnologias da indústria 4.0 e da pressão de stakeholders na adoção do DPC?*
- (iii) *Qual impacto do DPC no desempenho ambiental e de mercado das empresas?*

Em busca das respostas para as questões supracitadas, o principal objetivo desta tese é verificar e analisar as práticas de gestão aplicadas para a adoção do DPC, a relevância de tecnologias da indústria 4.0 e de *stakeholders* envolvidos neste processo, bem como os seus impactos nos desempenhos ambiental e de mercado de empresas que atuam no cenário Brasileiro.

1.3.1 Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral desta pesquisa, torna-se relevante alcançar os seguintes objetivos específicos:

- (i) Aprofundar o conceito teórico da integração da EC ao PDP, culminando no desenvolvimento do constructo de DPC;

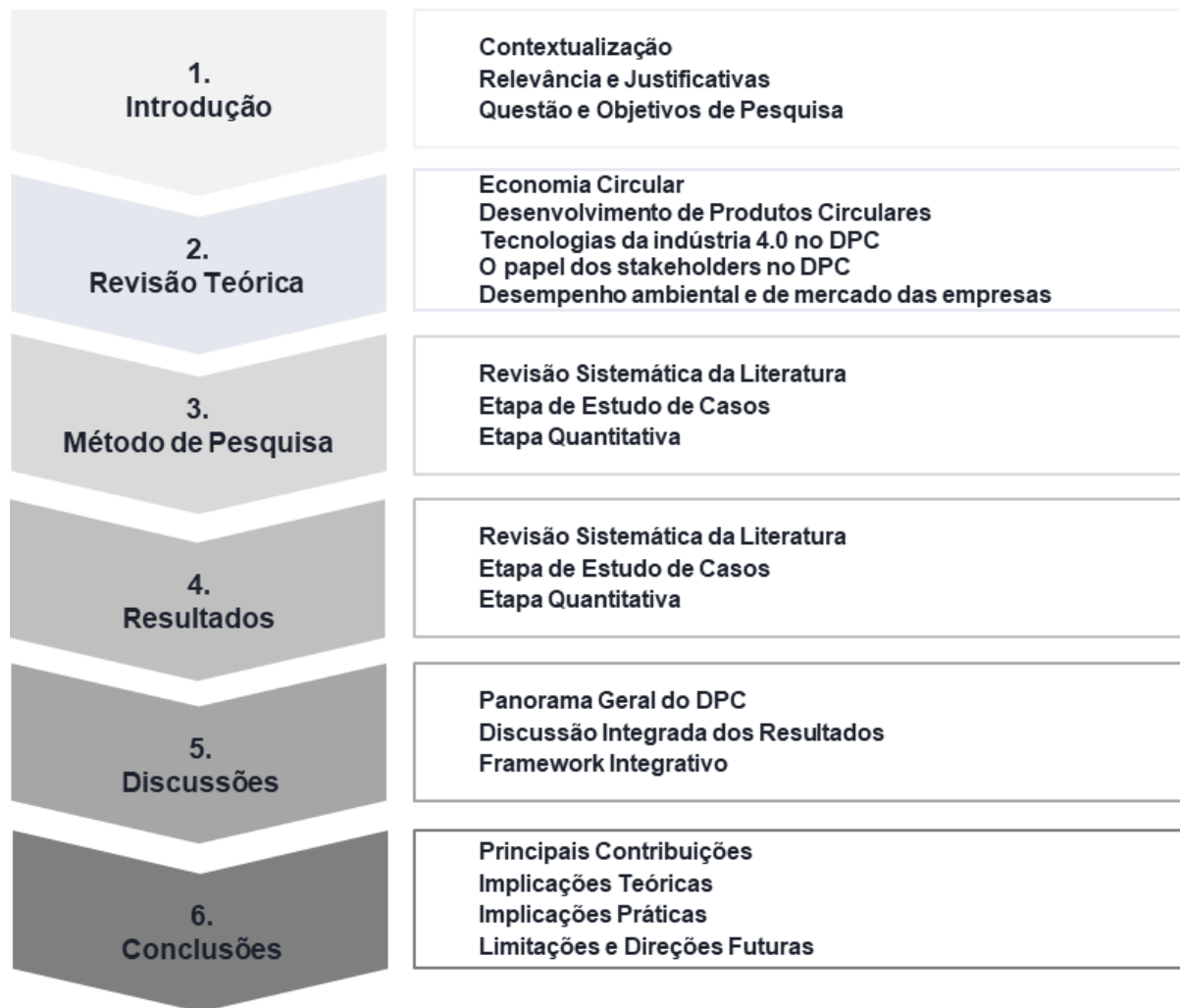
- (ii) Avaliar o cenário de adoção e atividades relevantes ao DPC em empresas de biodiversidade, infraestrutura e EEE;
- (iii) Verificar as sinergias encontradas na teoria e na prática, concatenando as relações entre o DPC, indústria 4.0, *stakeholders* e os desempenhos ambiental e mercado das empresas.

1.4 Estrutura da Tese

A figura 2 ilustra a estrutura geral desta tese. O capítulo dois apresenta a revisão da literatura, na qual os achados teóricos abordam a visão geral, o conceito, os níveis de abrangência e ações propostas para a adoção da EC e do DPC. Com o objetivo de cobrir os tópicos presentes no *framework* desta pesquisa, o capítulo ainda apresenta a Teoria dos *Stakeholders* e as tecnologias da Indústria 4.0 e as suas relações com o DPC. Assim como explora também as relações entre DPC com as dimensões de desempenho aqui investigadas.

O terceiro capítulo detalha os procedimentos de pesquisa adotados. No capítulo quatro, são apresentados os principais resultados da revisão sistemática da literatura, e da etapa empírica com a realização do estudo dos casos (etapa qualitativa) e da aplicação da *survey* (etapa quantitativa). O capítulo cinco discute os achados da etapa empírica de campo e dos resultados da pesquisa quantitativa com a literatura revisada. Finalmente, o sexto capítulo conclui esta tese, abordando as contribuições, implicações teóricas acadêmicas, práticas para empresas e formuladores de políticas públicas, ainda as limitações do estudo e direções de pesquisas futuras.

Figura 2. Estrutura da tese.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 REVISÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta a base conceitual desta tese, a partir da qual foram fundamentados o *framework* e as hipóteses da pesquisa. Os tópicos aqui abordados são:

- Economia Circular;
- Desenvolvimento de produtos circulares;
- Teoria dos *Stakeholders*;
- Tecnologias da Indústria 4.0;
- Desempenho Ambiental e de Mercado.

2.1 Economia Circular

O conceito de Economia Circular (EC) tornou-se conhecido na indústria e no meio acadêmico como uma maneira de fornecer eficiência aos recursos de empresas, por meio do uso adequado, reutilização, substituição e extensão do ciclo de vida dos produtos (GHISELLINI et al., 2018). Baseada principalmente nos fundamentos da ecologia industrial, na abordagem do berço-ao-berço (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2010), e na economia de desempenho (STAHEL, 2008), a EC também se refere à produção e consumo de bens por meio de fluxos de material em circuito fechado, os quais visam internalizar externalidades ambientais ligadas à extração de recursos virgens e à geração de resíduos, incluindo poluição (SAUVÉ; BERNARD; SLOAN, 2016).

A EC tem representado uma das tentativas mais recentes em integrar as atividades econômica e do bem-estar ambiental e social de maneira sustentável, com foco especial em resíduos urbanos e industriais, e visando alcançar um melhor equilíbrio e harmonia entre

economia, meio ambiente e sociedade (MURRAY et al., 2017). Com um modelo econômico e de produção inovador, a EC implica também em uma mudança na mentalidade e no comportamento do consumo, uma vez que o resíduo pode ser um componente projetado para reutilização e reciclagem no final do ciclo de vida do produto, apoiando assim novos ciclos de produção e consumo mais sustentável (ANDREWS, 2015).

Murray et al. (2017) sugerem que a EC refere-se a um modelo econômico em que planejamento de recursos, compras, produção e reprocessamento são projetados e gerenciados, como processo e resultado, para maximizar o funcionamento do ecossistema e do bem-estar humano, operando em três principais níveis: micro, meso e macro (LÜDEKE-FREUND et al., 2019). O nível micro acontece em uma única empresa ou pequeno grupo de empresas e está relacionado ao aumento da eficiência dos recursos. O nível meso à criação de *clusters*, *eco-parks* ou simbiose industrial, na qual o grupo de empresas compartilha fluxos de recursos e energia e, portanto, melhora coletivamente. Já o macro envolve cidades e governos (nacionais ou regionais), na qual a reciclagem e os processos interligados são promovidos por meio de incentivos econômicos e administrativos (EMF, 2015; GHISELLINI et al., 2016).

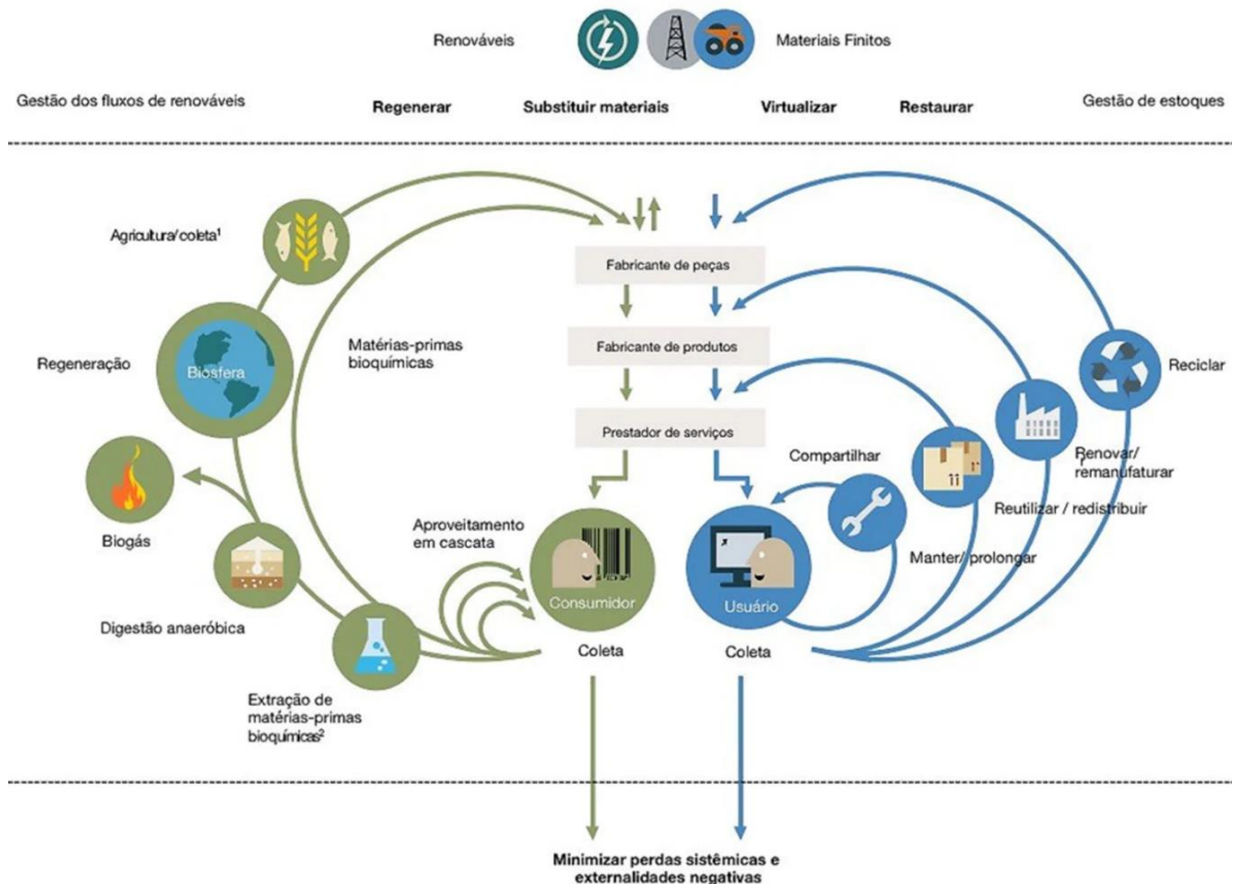
Na percepção da EC, os recursos não são mais algo obtido a um custo do meio ambiente de maneira linear na qual mais produção requer mais recursos e mais retorno de resíduos para o meio ambiente. Em vez disso, os produtos são projetados de forma circular, o que significa que os recursos podem ser obtidos do meio ambiente, todavia os resíduos se tornam novo recurso e são reciclados indefinidamente no processo econômico (EMF, 2015). Essencial para essa transição do atual modelo linear “extrair-produzir-usar-descartar” é que novos modelos de negócios orientados a circularidade tenham um valor agregado extra combinado com menor esgotamento de recursos e menos poluição ambiental (SIHVONEN; PARTANEN, 2018).

Em uma EC, o valor das matérias-primas é mantido dentro do sistema pelo maior tempo possível (BODOVA, 2017). Como consequência, estratégias de *design* pós-uso como reutilização, remanufatura e reciclagem tornam-se altamente relevantes para o processo de implementação de modelos de negócios circulares (MNC), os quais articulam a lógica de como uma organização cria, oferece e entrega valor a seus *stakeholders*, pois podem permitir o fechamento do círculo e influenciar o custo e as emissões da recuperação do valor operacional (LIEDER et al., 2017). Neste sentido, a EC procura reconstruir o capital, seja financeiro, manufaturado, humano, social ou natural, garantindo um fluxo aprimorado de bens e serviços.

Diante deste contexto teórico, esta tese baseia-se principalmente na definição de EC segundo o modelo proposto por fluxos circulares técnicos e biológicos. Conforme apresentado na Figura 3, o diagrama do sistema ilustra o fluxo contínuo de materiais por meio do círculo de valores (EMF, 2015). Também conhecido como “Diagrama borboleta” de *Ellen MacArthur Foundation* (2015), representa uma das definições de EC mais reconhecidas e aplicadas como referência em sistemas de ciclos fechados (WBCSD, 2018).

O diagrama descreve os princípios enraizados nos ciclos biológico e industriais ou técnicos, com ênfase primeiramente à gestão adequada dos fluxos dos renováveis, e também a gestão dos estoques dos materiais finitos. A aplicação de sistemas produtivos biológicos é reconhecida como a principal vertente da EC no fechamento de ciclos de materiais, por meio do uso de materiais renováveis e seu eventual retorno ao ambiente para alimentar processos biológicos (JAKHAR et al., 2019). Desta forma, após o fim de sua vida útil, os materiais seriam destinados a retornarem ao sistema, passando por todo o processo de decomposição e assimilação orgânicas que o meio natural realizaria, reingressando, dessa forma, como nutriente para um novo ciclo (EMF, 2015).

Figura 3. Diagrama borboleta de *Ellen MacArthur Foundation*.



Fonte: Adaptado de EMF (2015).

Além disso, a EC também se aplica aos ciclos técnicos, nos quais os materiais podem permanecer por mais tempo no sistema produtivo, retornando após a utilização por meio do uso compartilhado entre indivíduos, dos reparos e manutenções nos produtos e equipamentos, na reutilização de partes de produtos usados para a produção de novos equipamentos, e também pela reciclagem, que seria a transformação dos materiais descartados em novos (LÜDEKE-FREUND; GOLD; BOCKEN, 2019). Dentro do sistema, a reutilização e a regeneração são características intrínsecas relevantes e não apenas adições ou melhorias da economia linear (JAKHAR et al., 2019).

Diante desta abordagem, observa-se que a EC oferece boas perspectivas para a melhoria gradual em termos ambientais dos atuais modelos de produção e consumo, pois

apresenta-se com um campo multidisciplinar que reúne diferentes práticas, métodos e ferramentas com o objetivo de promover uma mudança para uma sociedade mais sustentável (GHISELLINI et al., 2016).

Uma das principais propostas de ações genéricas voltadas à EC, aplicadas nas áreas acadêmica e de negócios é o modelo ReSOLVE (JABBOUR et al., 2020; MENDOZA et al., 2017), da *Ellen MacArthur Foundation*, que consiste na aplicação de seis ações sustentáveis em busca da circularidade em produtos e modelos de negócios: Regenerar, Compartilhar (*Share*), Otimizar, Ciclar (*Loop*), Virtualizar e Substituir (*Exchange*) (EMF, 2015). Uma breve explicação de cada ação e exemplos são fornecidos no Quadro 1.

Quadro 1. Proposta de ações para a economia circular.

AÇÕES	DEFINIÇÕES	EXEMPLOS
<i>Regenerar</i>	Ações que mantenham e aprimorem a biocapacidade da Terra, incluindo a transição de combustíveis fósseis finitos para energia renovável.	Devolver os recursos biológicos recuperados à biosfera. Uso de elementos biológicos na arquitetura.
<i>Compartilhar</i>	Manter a velocidade do ciclo do produto baixa, e maximizar a utilização dos produtos compartilhando entre os usuários.	Partilhar espaços / escritórios, ou carros. O mercado de segunda mão e o reparo reduzem de forma semelhante a "velocidade de ciclo".
<i>Otimizar</i>	Aumentar o desempenho ou a eficiência de um produto, removendo os desperdícios de energia e materiais na fabricação de bens e no uso deles.	Otimização do uso de energia por automação, sensoramento remoto e direção.
<i>Ciclar</i>	Manter os componentes e os materiais em ciclo fechado e priorizar os ciclos internos.	Reciclagem ou remanufatura. Os recursos são processados, circulados e devolvidos à economia, e não “perdidos” em aterros sanitários.
<i>Virtualizar</i>	Entregar utilidade virtualmente.	Compras <i>online</i> . Uso de aplicativos no lugar de mapas, despertadores, etc. Tele trabalho, em vez de espaço para escritórios.
<i>Substituir</i>	Aplicar novas tecnologias, atualizar ou substituir maneiras mais antigas de fazer as coisas.	Substituir materiais antigos por avançados e não renováveis por fontes renováveis.

Fonte: Adaptado de *Ellen MacArthur Foundation* (2015).

De maneira semelhante, as ações apontadas no Quadro 1 aumentam o uso de ativos físicos, prolongam sua vida útil e mudam o uso de recursos de fontes finitas para fontes renováveis. Cada ação representa uma oportunidade que poderia reforçar e acelerar o desempenho dos negócios, fornecendo uma ferramenta para gerar estratégias circulares e iniciativas de crescimento (EMF, 2015). As ações ReSOLVE também podem ser adotadas por organizações diversas como uma lista de verificação orientadora para inovações ecológicas, ajudando a definir o que é EC e fornecendo exemplos de soluções de modelos de negócios circulares (EMF, 2015).

2.2 Desenvolvimento de Produtos Circulares

Sabe-se que para a adoção da EC é importante o desenvolvimento de produtos e serviços projetados para circularidade (BOCKEN; SCHUIT; KRAAIJENHAGEN, 2018; SHAHBAZI; JÖNBRINK, 2020; STÅL; CORVELLEC, 2018). Por exemplo, projetos de produtos para serem mais facilmente desmontados e segregados em diferentes componentes e materiais, facilitando a troca de componentes defeituosos, ou aumentando a vida útil dos produtos tendem a impulsionar a EC (SHAHBAZI; JÖNBRINK, 2020). Diante disso, empresas preocupadas com a sustentabilidade ambiental têm buscado adotar estratégias circulares como parte do PDP (SUBRAMANIAN et. Al., 2018).

Considerando a estratégia das empresas que visem sustentabilidade em suas diferentes dimensões, o desenvolvimento de produtos pode ser conceituado a partir de um processo capaz de atender a necessidades específicas de clientes e considerando as restrições tecnológicas (ROZENFELD et al., 2006; SHAHBAZI et al., 2020). As decisões tomadas durante as etapas iniciais de projeto, como escolha de materiais, tecnologias, funcionalidades, e vida útil esperada para o produto, influenciarão a qualidade, o custo, a estética e a

sustentabilidade do produto desde a extração de matéria-prima, uso até o descarte ou reuso, por exemplo (BRONES et al., 2014; RODRIGUES; PIGOSSO; MCALOONE, 2016). Desta forma, enquanto muitas as empresas estão focadas em sustentabilidade e se esforçando para atender e exceder os requisitos do consumidor com seus produtos, elas também podem levar em consideração as questões relacionadas à EC, considerando os efeitos ao meio ambiente e ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos (BOCKEN et al., 2016).

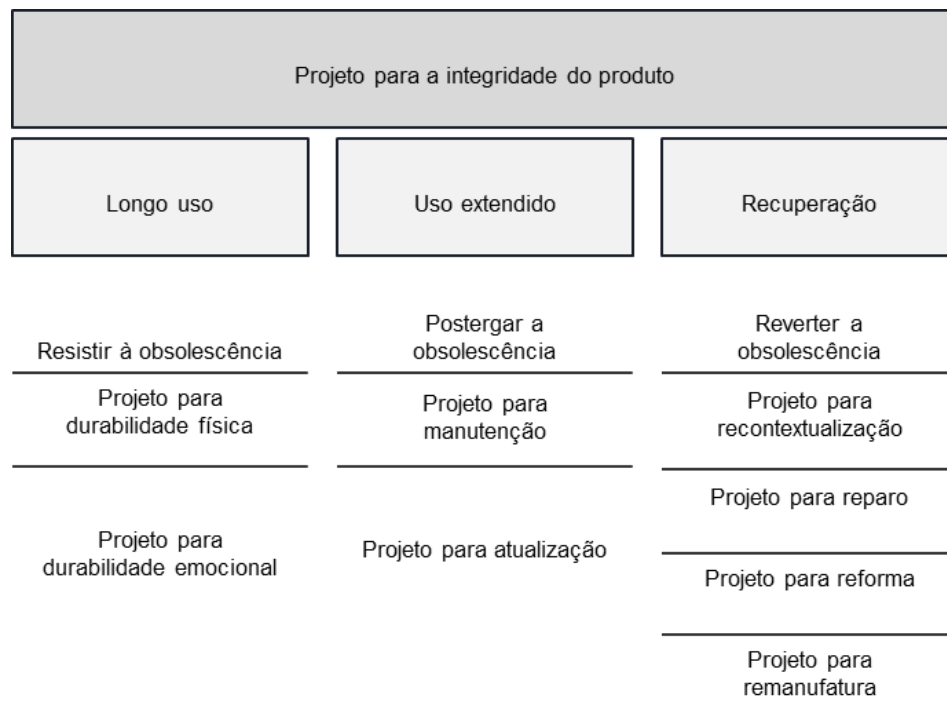
Para responder aos requisitos e restrições legais, muitas empresas também têm direcionado esforços que variam de operações a atividades de *marketing* sustentáveis, das quais o PDP com considerações de EC tem se apresentado como uma das áreas mais relevantes (SUBRAMANIAN et al., 2018). Neste sentido, o DPC pode representar uma oportunidade de atender às necessidades emergentes dos consumidores e responder a mudanças tecnológicas e sociais dinâmicas, as quais têm exigido em tempos recentes soluções mais sustentáveis (SUBRAMANIAN et al., 2018).

O DPC tem como objetivo dissociar a criação de valor do consumo de recursos finitos, de modo a permitir múltiplos ciclos de vida em que produtos e componentes tenham sua vida útil prolongada (SHAHBAZI et al., 2020). Como resultado, não apenas o uso de recursos naturais é otimizado economicamente, mas o valor de produtos, componentes e materiais também é retido e os recursos naturais são restaurados. A natureza do DPC compreende o foco em falhas e incertezas iniciais em projetos (ANDRAE; VAIJA; HALGAND, 2020), pois estima-se que aproximadamente 80% do desempenho de sustentabilidade de um produto ao longo de seu ciclo de vida seja definido nos estágios iniciais dos projetos dos produtos (BRONES et al., 2014; PINHEIRO et al., 2018).

Durante os estágios iniciais do PDP, decisões sobre aspectos ambientais e de circularidade, considerando atividades tais como recuperação, reciclagem, remanufatura, reutilização, reparo e recondicionamento podem ser avaliados (BOCKEN et al., 2016; DEN

HOLLANDER et al., 2017; SINGH; ORDONEZ 2016). Caso contrário, uma vez estabelecido o conceito do projeto, melhorar o desempenho circular significará esforços mais demorados e, sobretudo, sensivelmente mais custosos (SHAHBAZI et al., 2020). A Figura 4 apresenta a proposta de Den Hollander et al. (2017), na qual uma vertente do DPC aborda projeto para a integridade do produto, a partir do foco em aumento extensão do uso ao longo do ciclo de vida e da recuperação de produtos.

Figura 4. Tipologia de abordagens de projeto para integridade de produto.



Fonte: Adaptado de Den Hollander et al., 2017.

Como uns dos objetivos do DPC é tornar produtos em um ciclo fechado na cultura de eficiência e mentalidade de reutilização (SUBRAMANIAN et al., 2018), alguns autores têm abordado a maneira de manter o valor do produto o máximo viável, concentrando-se em estratégias de *design* que resultam na extensão da sua vida útil, utilizando práticas como fácil manutenção ou garantia de confiabilidade e durabilidade (por exemplo, CHOUINARD et al., 2019; DEN HOLLANDER et al., 2017; MESTRE; COOPER, 2017; BOCKEN et al., 2016).

No escopo do DPC, é importante destacar que projetos de produtos que permitam a personalização ou atualização de aspectos como integração de *softwares*, trocas ou aprimoramentos de componentes e módulos ao longo do uso, ou com a aparência de que os clientes desejam usá-los por longos períodos também fazem parte da estratégia para circularidade (DEN HOLLANDER et al., 2017). Estas características podem contribuir com a extensão do ciclo de vida durante a etapa de uso dos produtos. Ainda, estudos como Sinclair et al. (2018), Selvefors et al. (2019) e Sumter et al. (2020) observaram que o objetivo do DPC não é apenas manter a integridade física, mas também emocional dos produtos, a fim de garantir que esses produtos, materiais e componentes possam ser utilizados e reutilizados.

Preservar a integridade do produto baseia-se também no fato de que uma proporção de todos os materiais já extraídos está no ambiente construído de hoje (SANCHEZ; HAAS, 2018). Para isso, a abordagem DPC proposta por Bocken et al. (2016), baseada nos conceitos de ecologia industrial e berço-ao-berço, prevê três estratégias necessárias de fechamento de ciclos (BOCKEN et al., 2016), que são:

- Diminuição (*Slowing*): Prevê projetos de produtos de longa vida e extensão do ciclo de vida do produto (ou seja, ciclos de serviço para estender a vida de um produto, por exemplo, por meio de reparo, remanufatura). O período de utilização dos produtos é estendido e / ou intensificado, resultando em uma desaceleração do fluxo de recursos;
- Fechamento (*Closing*): Operacionalizada por meio da reciclagem, o ciclo entre o pós-uso e a produção é fechado, resultando em um fluxo circular de recursos;
- Desaceleração (*Narrowing*): Focada em eficiência de recursos, visando o uso de menos recursos por produto, seja na extração, produção ou distribuição.

Os produtos projetados e desenvolvidos para locação e aluguel, como o PSS, também são propostos na abordagem da EC, afinal são projetados a partir do conceito de uso e não da necessidade de possuir produtos da maneira que tradicionalmente é feita. Neste caso, devem ser mais robustos e duráveis, pois serão usados com mais frequência e intensidade por um longo período de tempo e por diferentes usuários em vários ciclos (PIALOT; MILLET; BISIAUX, 2017; TUKKER, 2015).

Apesar do DPC desempenhar um papel relevante para a EC, a literatura tem mostrado alguns desafios e barreiras para a sua adoção. Entre as principais barreiras, destacam-se as limitações tecnológicas de produtos e processos (HOLTSTRÖM et al., 2019; URBINATI et al., 2019), e os altos custos e investimentos necessários para a adoção de um novo modelo de negócio (URBINATI et al. al., 2019; KADDOURA et al., 2019). Nesse sentido, Bech et al. (2015) apontaram que o custo de entrada no mercado pode ser uma barreira, pois em algumas indústrias os produtos desenvolvidos a partir de estratégias circulares podem ser até 30% mais caros. Cong et al. (2019) observaram a viabilidade econômica da reciclagem também como uma barreira a ser superada, uma vez que o baixo retorno econômico da recuperação de valor afeta as decisões, determinadas durante o projeto do produto.

Ainda, implementar novas tecnologias ao DPC significa superar desafios com as tecnologias emergentes relacionadas à Indústria 4.0 (HALSTENBERG et al. 2019; JENSEN et al., 2019; SAUERWEIN et al., 2019; SINCLAIR et al., 2018). A imaturidade ou falta de acesso às essas tecnologias também pode representar ameaça às empresas que visam adotar projetos alinhados ao DPC (RITZÉN; SANDSTRÖM, 2017). Um outro aspecto relevante pode ser o alinhamento da cadeia de suprimentos (DE LOS RIOS; CHARNLEY, 2017; KANE et al., 2018), pois demanda aspectos circulares desde os primeiros níveis a montante da cadeia, até as preferências dos consumidores, os quais também foram vistos por Holtström et al. (2019) como pontos chave a serem considerados.

O papel do mercado consumidor é um dos pontos sensíveis ao DPC. Neste caso, clientes podem não estar prontos para a ideia de comprar produtos apoiando logística reversa, ou alguns consumidores podem ter uma crença comum de que peças remanufaturadas e materiais reciclados possuem menor qualidade (KANE et al., 2018). Neste contexto, além de estarem atentas ao comportamento de consumo de seus clientes, as empresas necessitam tomar uma posição de mudança cultural e quebra de paradigmas sócias relacionados ao consumo. Podem atuar como disseminadoras de um novo estilo de aquisição de bens, a fim de mostrar o valor adicional de seus produtos em um cenário de recursos limitados e finitos.

Ao longo do desenvolvimento da revisão sistemática, aplicada como parte inicial do método de desenvolvimento desta pesquisa, foram identificadas as estratégias de *design* (DfX) presentes na literatura, as tecnologias da indústria 4.0 e os *stakeholders* relevantes para a adoção do DPC. Além disso, não ficou claro o quanto a adoção do DPC pode efetivamente representar melhoria aos desempenhos ambiental e de mercado das empresas. Assim, os próximos tópicos desta revisão apresentam a fundamentação e relacionamento entre estes constructos, bem como o modelo de pesquisa elaborado e testado na etapa quantitativa desta tese. O conteúdo extraído sistematicamente, bem como as análises realizadas sobre as estratégias DfX, as tecnologias da indústria 4.0 e os *stakeholders* podem ser encontrados na primeira parte do capítulo de resultados (4) desta tese.

2.3 Tecnologias da indústria 4.0 no DPC

A relação entre as tecnologias digitais (por exemplo: *big data*, computação em nuvem, inteligência artificial, *internet* das coisas, impressora 3D, etc.) e a EC tem sido muito debatida recentemente, e a literatura apresenta sobreposições entre os tópicos, como a ‘*Circular I4.0*’ e a ‘*Digital CE*’ (por exemplo: BAG et al., 2020; ROSA et al., 2020). Alguns

estudos reconheceram a rápida evolução das tecnologias digitais como um fator facilitador para a adoção da EC (BRESSANELLI et al., 2018; DE SOUZA JABBOUR et al., 2018), uma vez que a adoção destas tecnologias da indústria 4.0 pode ser apontada como forma de redução dos impactos negativos das organizações e da sociedade ao meio ambiente (JABBOUR et al., 2020).

As tecnologias da Indústria 4.0 podem, por exemplo, permitir o rastreamento dos produtos após o consumo para recuperar componentes (JABBOUR et al., 2018), ou otimizar as soluções para reduzir as emissões de CO₂ e o uso de recursos para os sistemas industriais (TSENG et al., 2018). Neste contexto dos avanços das estratégias circulares, há pesquisas crescentes sobre suas aplicações nas etapas de projeto dos produtos (GHISELLINI et al., 2016), sendo que a incorporação de tecnologias requer ajustes com relação ao desenvolvimento de novos produtos (FRANK et al., 2019).

Quando os produtos se tornam mais inteligentes, as empresas podem atualizar seus componentes por meios digitais; portanto, a capacidade de atualização do produto (*updating*) também passa a ser aprimorada, o que tende a favorecer a transição para a EC, uma vez que contrasta a obsolescência do produto e os desperdícios de materiais (RYMASZEWSKA, et al., 2017). Estas tecnologias emergentes podem ainda facilitar o compartilhamento de produtos, bem como a circularidade de materiais e componentes por meio da servitização e PSS (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018).

A rápida evolução tecnológica e a transformação digital tem introduzido às empresas capacidades que ajudam a processar informações digitais, como também à computação em nuvem (ÁVILA-GUTIÉRREZ et al., 2019). Além disso, tecnologias de automação, como inteligência artificial (AI), *Internet* das Coisas (IoT) e a impressão 3D podem aprimorar a eficiência operacional de processos (DESPEISSE et al., 2017), ao mesmo tempo em que

diminuem o uso de materiais ao longo de todo o ciclo de vida do produtos (GHOREISHI; HAPPONEN, 2019), o que é alinhado aos princípios da EC.

Por meio da IoT ou sistemas ciber-físicos, os quais tem modificado a comunicação entre os equipamentos por meio da *internet* (MATANA et al., 2020), a aplicação de projetos de realidade aumentada e virtual, simulação e virtualização da produção, entre outros tende a ser potencializada (ÁVILA-GUTIÉRREZ et al., 2019; BOLOGA et al., 2017). A tecnologia IoT também pode permitir às empresas coletar uma grande quantidade de dados, geralmente chamados *big data* (NOBRE; TAVARES, 2019; ROSA et al., 2020). Assim, o *big data* combinado com análises apropriadas (*Analytics*) pode alimentar os processos de tomada de decisão orientados à sustentabilidade ambiental e circularidade, uma vez que também demandam menor quantidade de recursos materiais de produto e processo (JABBOUR et al., 2019).

O desenvolvimento e a aplicação de inteligência artificial e sistemas inteligentes que fazem uso de sensores e atuadores robóticos, também são exemplos de tecnologias da Indústria 4.0 (BOLOGA et al., 2017; MAYR et al., 2018), e devido às estas características, a aplicação da AI pode contribuir com o DPC, oferecendo melhorias substanciais em três áreas principais das empresas: projeto do produto, operações e otimização da infraestrutura, uma vez que pode construir mecanismos e dispositivos que simulem a capacidade de solucionar problemas de maneira mais inteligente (EMF, 2019).

A manufatura aditiva também é apontada como uma tecnologia capaz de impulsionar a EC (JABBOUR et al., 2018), uma vez que é baseada na fabricação de peças por meio de *design* digital, que possibilita tanto um *lead time* enxuto na produção quanto a conectividade entre projetistas, engenheiros e área comercial, por exemplo. As impressoras 3D são os principais recursos associados à esta vertente tecnologia, relacionada também com o menor

consumo e desperdício de materiais, ou seja, otimização no processo produtivo (JABBOUR et al., 2018).

Apesar de sua relevância, os estudos relacionados à Indústria 4.0 e ao DPC ainda estão em fases iniciais (KIEL et al., 2017; MÜLLER et al., 2018; JABBOUR et al., 2020). Embora alcançar a EC possa ser facilitado pela adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (RAJPUT; SINGH, 2019), o estudo de oportunidades e desafios para sua implementação alinhada ao DPC ainda estão em fases incipientes (MÜLLER et al., 2018; JABBOUR et al., 2020).

Neste contexto, considerando que as tecnologias da indústria 4.0 podem impulsionar o DPC, a primeira hipótese desta pesquisa é proposta:

H1: A adoção de tecnologias da indústria 4.0 tem um efeito positivo no DPC.

2.4 O papel dos stakeholders no DPC

Nas últimas décadas, um número crescente de acadêmicos e profissionais tem usado conceitos e teorias que visam permitir o entendimento das complexidades nos negócios contemporâneos, dentre estas há o destaque para a teoria dos *stakeholders* (ISKANDAR; ARIFFIN, 2019; SARKIS; ZHU; LAI, 2011). Do ponto de vista da teoria dos *stakeholders*, um negócio pode ser visto como um conjunto de relacionamentos entre grupos que têm interesse nas atividades que o compõem (FREEMAN, 1984). Esta teoria se concentra basicamente em como clientes, fornecedores, funcionários, financiadores, comunidades e gestores interagem com uma firma para criar e comercializar valor em conjunto (JAKHAR et al., 2019).

A teoria dos *stakeholders* tem sido aplicada em uma variedade de disciplinas, fornecendo uma perspectiva fundamentada de como as empresas devem gerenciar seus relacionamentos para facilitar o desenvolvimento de recursos competitivos e a ideia mais ampla de sucesso sustentável (PARMAR et al., 2010). Uma perspectiva de relacionamento entre *stakeholders* também já tem sido investigada considerando as relações entre desenvolvimento de produtos ambientalmente sustentáveis e desempenho da empresa (JABBOUR et al., 2015; SARKIS; ZHU; LAI, 2011).

Neste sentido, Governos, cidades, empresas e instituições acadêmicas já começaram a explorar oportunidades envolvidas na colaboração e inovação para uma EC (HAN et al., 2017; SIHVONEN; PARTANEN, 2016; TECCHIO et al., 2017). Por exemplo, a capacidade de projetar produtos para aumentar a reutilização ou reciclagem poderia ser aprimorada caso houvesse mais cooperação com recicladores (PINHEIRO et al., 2019). Sihvonon e Partanen (2016) também relataram reuniões práticas regulares entre projetistas e recicladores de produtos, como meio para compartilhar visões para melhores oportunidades de desmontagem como uma prática eficiente. Portanto, as modificações nas fases iniciais do projeto estão relacionadas ao interesse e aos esforços estabelecidos por projetistas, fabricante ou empresa, no entanto, os clientes devem estar cientes das implicações durante o uso dos produtos (MESA et al., 2018).

No contexto de mercados emergentes, o interesse dos *stakeholders* na EC também tem aumentado recentemente (GUPTA et al., 2019; LI et al., 2019; SUBRAMANIAN et. al., 2018). Alguns estudos também consideraram o efeito da pressão de *stakeholders* no desempenho das empresas em mercados emergentes, tais como China e Brasil (por exemplo, JABBOUR et al., 2015; Li et al., 2019); sendo que alguns deles no contexto da EC (AGYEMANG et al., 2019; JABBOUR et al., 2020). Nesta transição de um sistema de consumo linear para um modelo circular, é relevante considerar a pressão de *stakeholders*,

uma vez que a EC busca criar valor para a empresa e seus clientes, fornecedores e parceiros de negócios (GUPTA et al., 2019).

Ainda, o relacionamento entre indústria e meio ambiente também é tema recorrente no que se refere as suas relações com desempenho de empresas e sua importância tem sido ampliada devido às preocupações de *stakeholders* (LIEDER; RASHID, 2016). Além disso, devido à maior conscientização e conhecimento sobre questões de sustentabilidade pelos consumidores, as indústrias tem sido pressionadas para reconciliar todo o ciclo de vida do produto, incluindo fornecimento, fabricação, uso, descarte e recuperação do valor do produto após seu fim de vida (JAKHAR et al., 2019). Neste sentido, o DPC também pode exigir mudanças na produção e no consumo; portanto, os *stakeholders* envolvidos nesse processo têm papéis importantes a desempenhar (BALDASSARRE et al., 2017). Diante destes argumentos apresentados, a segunda hipótese desta pesquisa é:

H2: A pressão de stakeholders tem um efeito positivo na adoção do DPC.

2.5 Desempenho ambiental e de mercado das empresas

Diversas empresas tem reconhecido a necessidade de responder adequadamente ao desafio do desenvolvimento sustentável, adaptando suas atividades em função da circularidade (GOYAL; ESPOSITO; KAPOOR, 2016; SHAHBAZI et al., 2020). Sabe-se, por outro lado, que o bom desempenho da EC depende do desenvolvimento de produtos alinhados a esta abordagem (PINHEIRO et al., 2019; SHAHBAZI et al., 2020). Desta maneira, o DPC pode desempenhar papel relevante no cumprimento dos objetivos ambientais e econômicos das empresas (BOCKEN et al., 2016; JABBOUR et al., 2017).

Como resultado da tendência de empresas que visam adotar a EC, alguns estudos têm proposto a adoção de medidas de desempenho adequadas para investigar esta questão (HORBACH; RAMMER, 2019; SAIDANI et al., 2019). Segundo Lo-Iacono-Ferreira, Capuz-Rizo e Torregrosa-López (2018), medidas de desempenho normalmente ajudam as empresas a avaliarem os fatores relacionados a uma meta definida, desta forma com o objetivo de monitorar a transição da abordagem linear para a circular, são necessários indicadores que se concentrem nas questões de sustentabilidade e circularidade (HUYSMAN et al., 2017; SAIDANI et al., 2019).

O desempenho ambiental, por exemplo, é considerado um dos principais componentes do compromisso das empresas quando se aborda o desenvolvimento sustentável (JABBOUR et al., 2020) e, ao mesmo tempo, um dos principais objetivos da EC (GHISELLINI et al., 2018; LI et al., 2019). Todavia, os possíveis benefícios derivados do projeto para o meio ambiente são destacados na literatura e vão além da dimensão ambiental (RODRIGUES; PIGOSSO; MCALOONE, 2016). O bom desempenho ambiental também pode ajudar as empresas a estabelecerem uma boa imagem social e obterem melhor reputação; além de ser uma fonte de legitimidade, pois sua imagem “verde” pode contribuir para conquistar a confiança e a lealdade de clientes (LI et al., 2019).

Sob a perspectiva da EC, de acordo com Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018), o foco principal nos benefícios em termos de desempenho ambiental é reduzir o sistema de produção-consumo de matéria-prima, insumos energéticos, resíduos e emissões por meio da aplicação de ciclos e cascatas renováveis. Isso se relaciona com a capacidade das empresas em reduzirem emissões, resíduos de efluentes e resíduos sólidos e a capacidade em diminuir o consumo de materiais nocivos ou tóxicos e na frequência de acidentes ambientais, por exemplo (LI et al., 2019; RAUT et al., 2019).

A abordagem ambiental de uma empresa também pode fornecer uma imagem de marca positiva, o que também pode representar um aumento na participação de mercado e consequente lucratividade (DANGELICO et al., 2017). Algumas empresas têm se mostrado motivadas a implementarem estratégias circulares, uma vez que isso pode gerar vantagens competitivas por meio do desempenho econômico, além do ambiental. Neste contexto, o desempenho de mercado representa a capacidade das empresas de conquistarem o mercado devido aos resultados de seus rivais em relação à satisfação do cliente, aquisição e fidelização de novos clientes (RAJAPATHIRANA; HUI, 2018).

A reputação, a imagem e o atendimento à necessidade do mercado consumidor são medidas comuns de avaliação para o desempenho de mercado (GONZÁLEZ-BENITO; GONZÁLEZ BENITO, 2006; ISKANDAR; ARIFFIN, 2019). Ainda, estudos anteriores já apresentaram a relação entre os desempenhos ambiental e de mercado (por exemplo, DANGELICO et al., 2017; JABBOUR et al., 2015), sendo que há uma discussão sobre as potenciais de melhoria de desempenho de mercado em função da adoção de práticas verdes na cadeia de suprimentos e no processo produtivo (JABBOUR et al., 2018), e de *ecodesign* no PDP (BOKS, 2006; COSTA et al., 2017).

Se por um lado, o posicionamento e adoção das estratégias de circularidade em uma organização pode aumentar a receita e a participação de mercado (ISKANDAR; ARIFFIN, 2019; RAUT et al., 2019), por outro existem desafios de mercado devido ao custo de matérias-primas que, geralmente, são mais baratas que os materiais reciclados ou remanufaturados. Além disso consumidores também podem apresentar dificuldade em aceitar produtos que são compartilhados, remanufaturados ou reutilizados (KIRCHHERR et al. 2018). Neste contexto, ainda não está clara a influência que o DPC pode apresentar no desempenho das empresas.

Chega-se, portanto, às três últimas hipóteses deste trabalho:

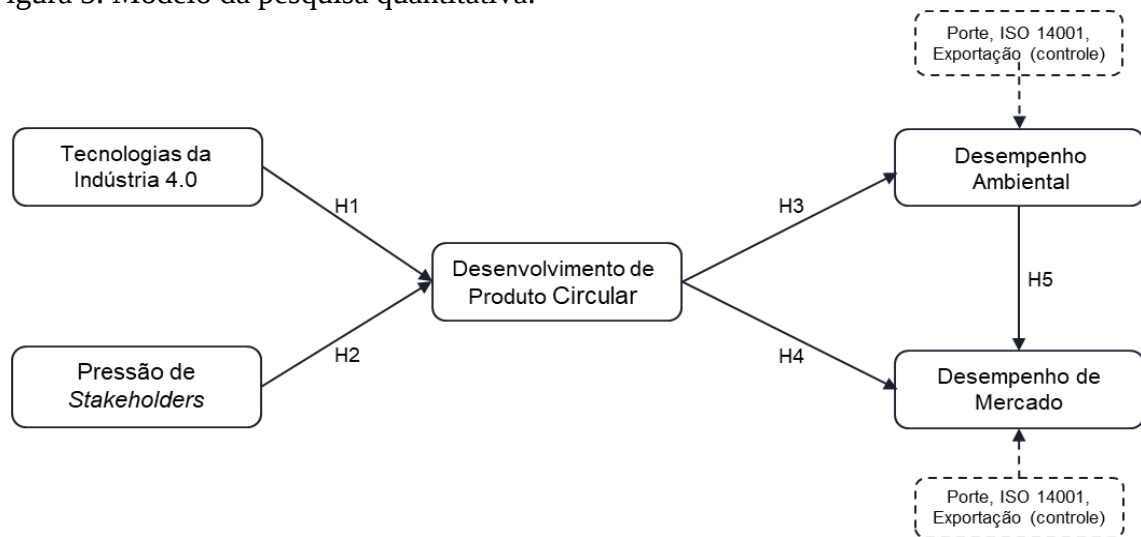
H3: O DPC tem um efeito positivo no desempenho ambiental das empresas.

H4: O DPC tem um efeito positivo no desempenho de mercado das empresas.

H5: O desempenho ambiental tem um efeito positivo no desempenho de mercado das empresas.

A partir das hipóteses propostas, a Figura 5 apresenta o modelo de pesquisa testado na etapa quantitativa desta tese.

Figura 5. Modelo da pesquisa quantitativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos constructos identificados e elaborados por meio da revisão da literatura, para as variáveis de controle foram considerados o “porte da empresa” (JABBOUR et al., 2015), a presença da certificação “ISO 14001” (SELES et al., 2019), e o perfil de “exportação” (caso a empresa tenha atividades de exportação de seus produtos) (HORBACH; RAMMER, 2019). Estas variáveis podem ser consideradas relevantes, sendo que foram aplicadas anteriormente em pesquisas do tipo *survey* na área de gestão ambiental e com interface em gestão de operações (JABBOUR et al., 2015; SELES et al., 2019).

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo aborda os procedimentos metodológicos empregados nesta tese. Inicialmente é apresentada e explicada a etapa de revisão sistemática e de conteúdo da literatura, a qual foi realizada com o objetivo de refinar o *estado da arte* e embasar as demais etapas desta pesquisa de doutorado, a partir da definição dos constructos e variáveis da pesquisa. Posteriormente, representando a fase empírica, realizou-se estudo de dois casos e, então, uma pesquisa quantitativa do tipo *survey*. A abordagem multimétodo, com aplicações qualitativa e quantitativa foi escolhida porque em áreas como gestão de operações e gestão ambiental pode proporcionar maior riqueza de resultados, além de ajudar a compreender e aprimorar o fenômeno estudado, bem como contribuir com a originalidade da pesquisa (MOLINA-AZORÍN; LÓPEZ GAMERO, 2014).

3.1 Revisão Sistemática da Literatura

Como meio para atender aos objetivos desta pesquisa, a primeira etapa adotou uma revisão sistemática da literatura, isso porquê conforme Eisenhardt e Graebner (2007) sugerem, pesquisas empíricas devem começar com um sólido embasamento na literatura relacionada. O conceito de revisão sistemática tem se espalhado com múltiplas aplicações metodológicas em diversos campos de conhecimento, além disso, a aplicação deste método tem recebido crescente interesse científico na área de gestão de operações (GAUR; KUMAR, 2018; SINGHAL; SINGLAL, 2012).

A revisão sistemática da literatura também se caracteriza pela utilização de um procedimento explícito, transparente e reproduzível, a fim de melhorar os resultados do processo (LAGE JR.; GODINHO FILHO, 2010). Geralmente, este processo de revisão

consiste em três fases, iniciando com a coleta de dados, seguindo pela análise dos achados e finalizando com a síntese das informações geradas (CROSSAN; APAYDIN, 2010). Assim, o desenvolvimento desta tese compreendeu um estudo teórico inicial, o qual objetivou identificar e analisar o conteúdo sobre a adoção do DPC, disponível na literatura.

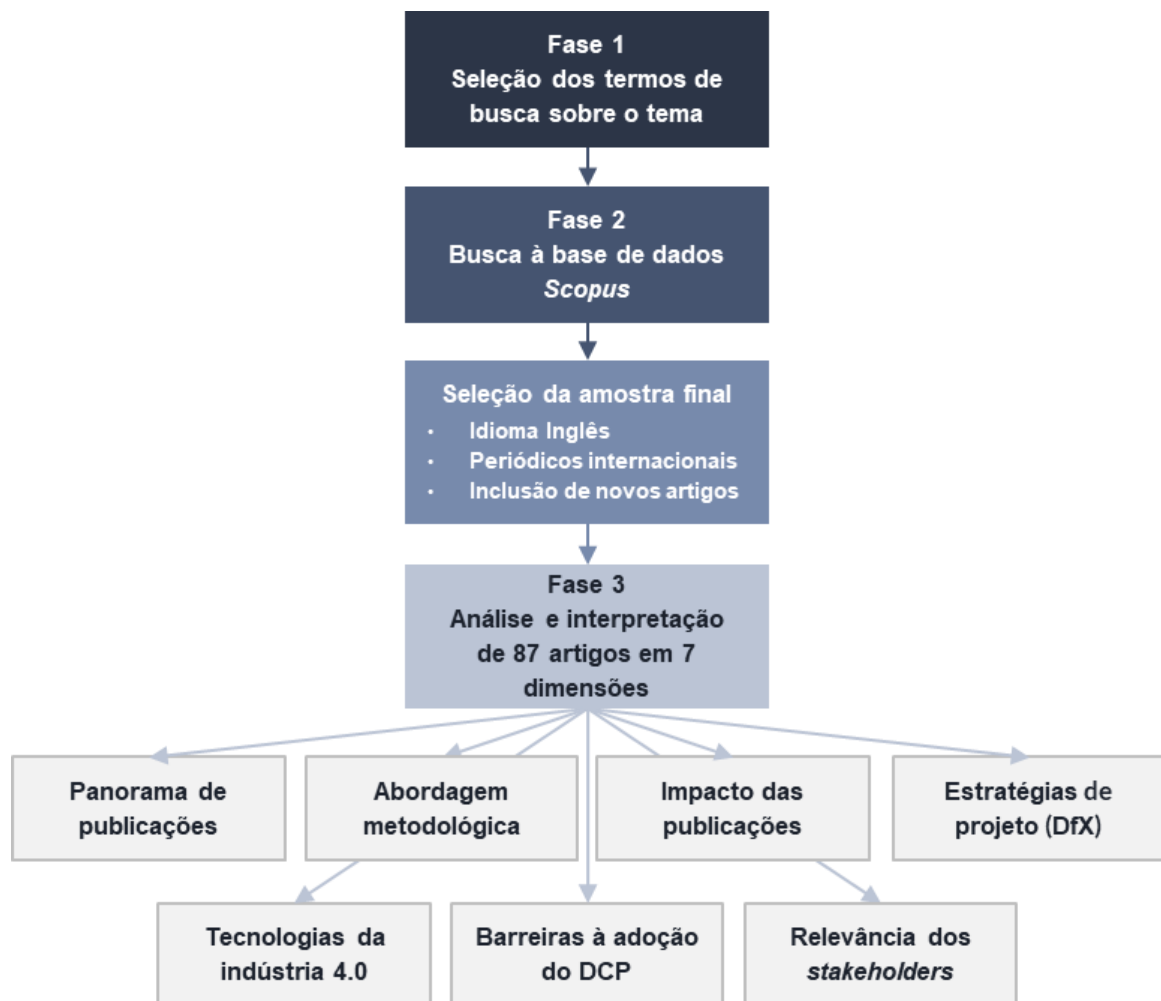
A base de dados internacional *Scopus* foi adotada como principal fonte de artigos por ser considerada uma das maiores plataformas nas áreas de ciência, tecnologia, medicina, artes e humanidades (RANDHAWA et al., 2016; FAHIMNIA et al., 2015). Além disso, a base *Scopus* indexa cerca de 70% mais fontes do que a *Web of Science* (BRZEZINSKI, 2015), e fornecendo assim, uma cobertura abrangente da literatura mais recente (HARZING; ALAKANGAS, 2016).

Nesta fase da revisão teórica, o primeiro passo foi identificar conceitos relevantes para a integração da área temática por meio da leitura de artigos previamente publicados sobre os temas. No período de início das buscas o termo “*Circular Product Design*” (CPD) apresentava baixo número de artigos disponíveis para acesso, desta forma, a pesquisa também incluiu os seguintes termos no idioma inglês, relacionados ao desenvolvimento de produtos sustentáveis, os quais foram extraídos principalmente dos artigos disponíveis na plataforma *Scopus*: ‘*design for X*’, ‘*ecodesign*’, ‘*sustainable design*’, ‘*circular design*’, ‘*product service system*’, ‘*new product development*’, ‘*product portfolio*’, e ‘*product development*’.

O objetivo de começar com um espectro mais amplo de conceitos foi garantir que artigos que não estivessem explicitamente centrados em DPC, mas também na integração entre EC e PDP, fossem incluídos neste estudo. O início das buscas sistemáticas para a finalidade deste trabalho deu-se no mês de maio de 2018 e foram concluídas em julho de 2020, combinando o termo de busca ‘*circular economy*’ com todos os outros termos relacionados, apresentados no parágrafo anterior. Foi considerado todo o histórico de

publicações, contendo as respectivas palavras-chave nos itens da temática (título, resumo e/ou palavras-chave). A Figura 6 ilustra as fases e atividades realizadas para a seleção de artigos e condução da revisão.

Figura 6. Etapas aplicadas para busca e seleção da amostra dos artigos revisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram encontrados inicialmente 116 documentos, dos quais 64 eram artigos de periódicos, 44 de conferências, 6 capítulos de livros e 2 livros. As seleções para inclusão neste estudo consistiram em artigos que foram publicados em periódicos acadêmicos internacionais no idioma inglês, por se tratarem de documentos que passaram por rigorosos

critérios de avaliação por pares, antes da publicação, sendo excluídos capítulos de livros e artigos de congresso. Todos os artigos selecionados foram revisados na íntegra e apenas os artigos que abordaram aspectos da relação entre o tema central desta tese foram selecionados para as análises e sínteses do achados.

Durante o desenvolvimento do doutorado, buscas à plataforma *Scopus* continuaram sendo realizadas e os novos artigos encontrados, relacionados aos temas da pesquisa, foram constantemente adicionados à base de análises, sendo sistematizados na íntegra. Este acompanhamento permitiu inclusive a identificação de conceitos que se mostraram relevantes durante o avanço da pesquisa, como por exemplo a proeminência do papel das tecnologias da indústria 4.0 no cenário de sustentabilidade ambiental, bem como a própria determinação do conceito internacional CPD (DPC) como termo principal para este campo de integração entre EC e PDP.

Neste processo de adição e validação de artigos, uma amostra final de 87 documentos focais foi considerada. O apêndice A apresenta os 87 artigos selecionados e revisados. Esta etapa da pesquisa foi encerrada no mês de julho de 2020, na qual os resultados foram sistematizados e seus conteúdos foram codificados de acordo com as seguintes dimensões:

- **Panorama de publicações:** Apresenta a evolução cronológica das publicações, os principais periódicos que publicam sobre o tema, e as principais regiões continentais nos quais o tema tem sido estudado;
- **Abordagem metodológica:** Identifica a distribuição e características dos métodos de pesquisa adotados nas publicações;

- **Impacto das publicações:** Considera os artigos com maior número de citações na base de dados *Scopus*¹;
- **Estratégias de projeto:** Apresenta as principais práticas e estratégias de *design* voltadas para circularidade nos projetos de desenvolvimento de novos produtos;
- **Tecnologias da Indústria 4.0:** Aborda as principais tecnologias presentes em projetos de novos produtos e serviços;
- **Barreiras ao DPC:** Concentra-se nos desafios encontrados na literatura, associados à adoção do DPC;
- **Relevância dos stakeholders:** Apresenta os principais atores a serem considerados pelas empresas no processo DPC.

O conteúdo completo da revisão sistemática, com detalhamento das informações e ilustrações pode ser encontrado no capítulo 4 desta tese, na seção de Resultados. A seguir, os procedimentos adotados nas etapas qualitativa (estudo de casos) e na pesquisa quantitativa (tipo *survey*) são explicados.

3.2 Etapa de Estudo de Casos

Inicialmente, na etapa empírica foi realizada uma pesquisa de campo composta pelo estudo de dois casos, o qual visou obter uma percepção mais aprofundada do contexto de adoção do DPC em empresas que operam em ambientes de negócios distintos. O estudo de caso como estratégia de pesquisa compreende um método que considera um processo desde a lógica do planejamento, as técnicas de coleta, até a análise de todos os dados (YIN, 2003).

¹ Considerando o mês de julho de 2020 (momento desta análise).

É considerado um procedimento de pesquisa útil quando se deseja aprofundar o conhecimento existente sobre o determinado tema pesquisado. Investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu cenário prático, especialmente quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidas (YIN, 2003), tal como o fenômeno pesquisado nesta tese: DPC.

Para a realização do estudo de casos, seguindo os procedimentos de Yin (2003), Miguel (2007), e Gibbert e Ruigrok (2010), foram aplicadas quatro técnicas de coleta de dados: (1) aplicação de instrumento para coleta por meio de entrevistas semiestruturadas; (2) entrevistas semiestruturadas presenciais e em grupo; (3) leitura de documentos escritos ou por meios digitais; e, (4) observação da prática em reuniões ou nas atividades dos projetos em andamento.

3.2.1 *Elaboração do questionário de pesquisa*

Para a compreensão do cenário da adoção do DPC, foi desenvolvido o instrumento de pesquisa, o qual foi embasado na literatura presente em revisão e, baseado principalmente na pesquisa de Brones et al. (2014), a qual a partir de estudo de caso, buscou identificar como a dimensão ambiental e o *ecodesign* podem ser integrados às práticas de gestão de projetos de desenvolvimento de novos produtos. As adaptações ao instrumento consideraram o escopo direcionado ao DPC.

Ainda, com a evolução da literatura sobre o contexto desta pesquisa, considerando a atualização bibliográfica, para a realização dos casos, questões sobre a adoção de tecnologias da indústria 4.0 e sobre os *stakeholders* mais relevantes ao processo foram incluídas ao instrumento da pesquisa. Desta forma, os roteiros foram construídos com questões

predominantemente abertas, as quais tinham a intenção principal de esclarecer como o DPC é adotado nas empresas.

Durante o processo de elaboração e definição do questionário de pesquisa houve avaliação da primeira versão estruturada por dois especialistas das áreas de desenvolvimento de novos produtos e de gestão ambiental de empresas dos setores de transporte e aviação, e também, o instrumento foi apresentado e discutido com três professores e pesquisadores da área de gestão de operações. Posteriormente aos comentários recebidos, as melhorias sugeridas foram implementadas e o questionário tomou a sua forma definitiva. A versão final do documento aplicado no estudo de casos está disponível no Apêndice B desta tese.

3.2.2 *Processo de seleção das empresas*

Tendo em vista a definição de um roteiro para desenvolvimento do estudo de casos, fez-se necessária a delimitação e justificativa de sua escolha. Dentre o processo de seleção das empresas, foram avaliados os seguintes critérios: porte, mercados atendidos, e segmento industrial com foco em empresa de biodiversidade e de infraestrutura, como já detalhado na introdução desta tese, setores escolhidos por apresentarem-se como dois dos mais promissores para o avanço da EC no cenário brasileiro (EMF, 2017). O setor de EEE, também apontado como relevante segundo a consultoria *Ellen MacArthur Foundation* (EMF, 2017), foi considerado para a execução da etapa quantitativa desta pesquisa.

Primeiramente, foram realizadas buscas na *internet* com o objetivo de encontrar empresas no perfil delineado e convites por *e-mail* foram enviados a gestores da área de projetos e novos produtos de cinco empresas que atendiam aos requisitos da delimitação, sendo que três delas responderam o contato aceitando receber o questionário da pesquisa. Assim o questionário foi enviado a estas três empresas, e duas delas demonstraram maior

interesse em participar do estudo, respondendo o material por *e-mail* e disponibilizando agenda para uma primeira reunião com o intuito de detalhar as respostas do questionário. Por motivos de confidencialidade as empresas serão tratadas como A e B.

Após o recebimento das respostas, foram agendadas as reuniões presenciais nas sedes das empresas. As entrevistas foram a principal forma de coleta e análise dos dados, tendo as observações e a análise de documentação como fontes complementares de informação. Foram assim realizadas as reuniões '*in loco*' com as empresas A e B, sendo que durante as reuniões, as respostas dos questionários foram acessadas e discutidas, a fim de obter-se maior detalhamento das informações fornecidas.

Pela empresa A, o diretor executivo e a engenheira florestal foram entrevistados durante a visita. Representando a empresa B, o executivo de novos negócios, o gerente de meio ambiente, o engenheiro de projetos e um analista ambiental participaram da entrevista. Após as reuniões, visitas a outros departamentos foram realizadas e conversas informais ocorreram, por exemplo, com departamentos de produção da empresa A, e com os departamentos de operações e de *marketing* na empresa B. Ainda, informações complementares foram obtidas por meio do acesso ao *site* das empresas, nos quais certificações e prêmios de qualidade relacionados à gestão de operações foram observados.

3.3 Etapa Quantitativa

A terceira fase da pesquisa compreendeu um levantamento quantitativo do tipo *survey*, o qual é recomendado por Forza (2002) e Miguel e Ho (2010) como o método mais adequado quando se deseja obter um panorama descritivo de um determinado fenômeno. Além disso, conforme apontado por Miguel e Ho (2010) e Nakano (2010) é um dos mais adequados quando se faz pesquisas na área de gestão de operações.

No contexto desta tese, conforme já argumentado nos capítulos um e dois, a investigação abrangeu a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 e a influência de *stakeholders*, e no que diz respeito ao DPC. Neste mesmo sentido, o desempenho ambiental e de mercado das empresas também fez parte do modelo de pesquisa sob a forma de variáveis dependentes.

3.3.1 Natureza das variáveis e medidas adotadas

A fim de garantir a confiabilidade da medida e a validade do instrumento de pesquisa, o desenvolvimento do questionário utilizado nesta etapa constou de duas fases. Primeiramente, foi elaborado um documento com base nas variáveis e indicadores encontrados nos artigos analisados na etapa de revisão sistemática da literatura, e em periódicos internacionais, possuidores de *JCR*, tais como *Journal of Cleaner Production*, *Journal of Industrial and Production Engineering*, e *Management Decision*, abordados na revisão teórica desta tese, a qual apoiou o desenvolvimento do modelo aplicado. A escala *Likert* de 5 pontos foi utilizada para determinar o grau de concordância dos respondentes com as questões assertivas que variavam de “1- Discordo totalmente” a “5-Concordo totalmente”.

Em relação à pressão de *stakeholders*, os constructos foram baseadas em Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019). O constructo 'Indústria 4.0' foi baseado, principalmente, em De Sousa Jabbour et al. (2018), Rajput e Singh (2019) e Pham et al. (2019). O constructo 'DPC' foi desenvolvido, principalmente, com base em Bocken et al. (2016), den Hollander et al. (2017), Sinclair et al. (2018), Halstenberg et al. (2019), Selvefors et al. (2019), e Urbinati et al. (2019). As variáveis que compõem os constructos '*stakeholders*', 'indústria 4.0' e 'DPC', adotadas no modelo de pesquisa, são apresentadas no Quadros 2, 3, e 4.

Quadro 2. Constructo pressão de *stakeholders*.

Código	Variáveis e Referências	
ST1	Mercado Consumidor	<i>Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019)</i>
ST2	Governo Federal	<i>Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019)</i>
ST3	Regulamentações Regionais	<i>Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019)</i>
ST4	Empregados	<i>Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019)</i>
ST5	Alta administração/Investidores	<i>Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019)</i>
ST6	Cadeia de Suprimentos/Fornecedores	<i>Sarkis et al. (2010) e Jakhar et al. (2019)</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 3. Constructo indústria 4.0.

Código	Variáveis e Referências	
IN1	Internet das Coisas (IoT)	<i>Lin, Shyu e Ding (2017); de Sousa Jabbour et al. (2018); Rajput e Singh (2019); Rymaszewska, Helo e Gunasekaran (2017); Pham et al. (2019).</i>
IN2	Computação em Nuvem	<i>Ávila-Gutiérrez et al. (2019); Bologa et al. (2017); de Sousa Jabbour et al. (2018); Rajput e Singh (2019).</i>
IN3	Big data	<i>Ávila-Gutiérrez et al. (2019); Bologa et al. (2017); Nobre e Tavares (2019); Queiroz e Telles (2018).</i>
IN4	Impressora 3D/Manufatura Aditiva	<i>Despeisse et al. (2017); Sousa Jabbour et al. (2018); Rajput e Singh (2019).</i>
IN5	Simulação/Realidade Aumentada	<i>Ávila-Gutiérrez et al. (2019); Despeisse et al. (2017); Lin, Shyu e Ding (2017); Rajput e Singh (2019).</i>
IN6	Inteligência artificial (AI)	<i>Ellen MacArthur Foundation (2019); Ghoreishi (2019); Ghoreishi e Happonen (2019); Mayr et al. (2018); Pham et al. (2019).</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4. Constructo desenvolvimento de produto circular.

Código	Variáveis e Referências	
CD1	Reciclagem	<i>Bocken et al. (2016), den Hollander et al. (2017), e Urbinati et al. (2019).</i>
CD2	Reutilização de componentes	<i>Bocken et al. (2016), Bovea & Pérez-Belis (2018), Holtström et al. (2019), e Urbinati et al. (2019).</i>
CD3	Remanufatura	<i>Bocken et al. (2016), den Hollander et al. (2017), e Urbinati et al. (2019).</i>
CD4	Fácil manutenção	<i>Bocken et al. (2016) den Hollander et al. (2017), Mesa et al. (2018), e Holtström et al. (2019).</i>
CD5	Fácil desmontagem	<i>Bocken et al. (2016), Bovea & Pérez-Belis (2018), Mesa et al. (2018), Vanegas et al. (2018), e Urbinati et al. (2019).</i>
CD6	Fácil recondicionamento	<i>Mestre & Cooper (2017), e den Hollander et al. (2017).</i>
CD7	Design emocional e atrativo	<i>Haines-Gadd et al. (2018); Mestre & Cooper (2017), e den Hollander et al. (2017).</i>
CD8	Atualização (softwares, componentes e módulos)	<i>Bocken et al. (2016); den Hollander et al. (2017); Mesa et al. (2018).</i>
CD9	Produtos atrelados a sistemas de serviços (PSS)	<i>Sinclair et al. (2018), Bech et al. (2019); Halstenberg et al. (2019); Holtström et al. (2019); Kaddoura et al. (2019); Kjaer, et al. (2019)</i>
CD10	Múltiplos ciclos/ Recontextualização	<i>Sinclair et al., (2018); Selvefors et al. (2019).</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, nesta pesquisa, é assumido que um fato ou fenômeno é um fator causal para outro fenômeno (RAUEN, 2012). Neste contexto, o constructo dependente desempenho ambiental, foi baseado principalmente em Paulraj (2011), e Jabbour et al. (2015); e o constructo desempenho de mercado, baseado em González-Benito & González-Benito (2006); Ingenbleek et al. (2013) e Jabbour et al. (2015). As variáveis que compõem os constructos desempenho ambiental, e de mercado, são apresentadas no Quadros 5 e 6.

Quadro 5. Constructo desempenho ambiental.

Código	Variáveis e Referências	
EP1	Emissões atmosféricas (gases poluentes)	<i>Jabbour et al. (2015); Paulraj (2011).</i>
EP2	Consumo de água e energia	<i>Jabbour et al. (2017); Mesa et al. (2018); Paulraj (2011).</i>
EP3	Geração de resíduos sólidos	<i>Jabbour et al. (2015); Paulraj (2011); Rodrigues et al. (2016).</i>
EP4	Consumo de materiais perigoso (nocivos/tóxicos)	<i>Jabbour et al. (2015); Mesa et al. (2018); Paulraj (2011); Raut et al. (2019).</i>
EP5	Situação ambiental (acidentes e/ou passivo ambiental)	<i>Jabbour et al. (2015); Paulraj (2011).</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 6. Constructo desempenho de mercado.

Código	Variáveis e Referências	
MP1	Participação no mercado (<i>Market Share</i>)	<i>Agyemang et al. (2019); Ingenbleek et al. (2013); Jabbour et al. (2015); Raut et al. (2019).</i>
MP2	Lançamento em novos mercados	<i>González-Benito e González-Benito (2006); Ingenbleek et al. (2013); Jabbour et al. (2015).</i>

MP3	Imagem e reputação	<i>González-Benito e González-Benito, 2006; Iskandar e Ariffin (2019); Jabbour et al. (2015).</i>
MP4	Lucratividade	<i>Agyemang et al. (2019); Ingenbleek et al. (2013); Jabbour et al. (2015); Raut et al. (2019).</i>
MP5	Competitividade	<i>Ingenbleek et al. (2013) e Jabbour et al. (2015).</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de controle nesta etapa consideraram o porte das empresas (JABBOUR et al., 2015), a presença de certificação ambiental ISO 14001 (SELES et al., 2019), e os nível de exportação para mercados externos (HORBACH; RAMMER, 2019). Estudos indicam que o porte (por exemplo, GONZÁLEZ-BENITO; GONZÁLEZ BENITO, 2006; JABBOUR et al., 2015; DANGELICO et al., 2017), a orientação para mercados externos e a adoção de certificação ambiental podem influenciar o desempenho das empresas (CHANDRAN GOVINDARAJU; KRISHNAN VIJAYARAGHA VAN; PANDIYAN, 2013), uma vez que ao competir no mercado global precisam ser eficientes e inovadoras, além de serem propensas a atenderem aos requisitos ambientais (TSAI; LIAO, 2017).

3.3.2 Descrição da amostra e coleta de dados

A população enquadrada nesta etapa da pesquisa foi composta por empresas que desenvolvem produtos pertencentes ao setor de EEE. A classificação setorial é um aspecto importante no enquadramento da população em pesquisas do tipo *survey* (FORZA, 2002). Neste sentido, considerou-se para o processo de coleta de dados toda a população das empresas que atuam no Brasil, cadastradas na Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) e na Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

(ABIMAQ). A rede social profissional *LinkedIn* foi a principal fonte de contato com os profissionais das empresas associadas.

Primeiramente, uma carta-convite para participação na pesquisa foi enviada à funcionários de médio a alto nível das empresas (por exemplo, analistas, engenheiros, gerentes e diretores), focada em atrair atenção pessoal, a fim de obter maiores taxas de retorno, conforme indicado por Hodinott e Bass (1986). Profissionais destes cargos foram escolhidos pois são profissionais integrados com as atividades de desenvolvimento de produtos. Além disso, por atuarem no setor de EEE também estão envolvidos com as tecnologias da indústria 4.0. Àqueles que demonstraram interesse em colaborar, o *link* de acesso ao site *Survey Monkey* foi enviado, o qual hospedou a gestão do questionário enviado aos respondentes das empresas participantes. A carta-convite, bem como o questionário enviado às empresas podem ser encontrados no Apêndice C desta tese.

Ao clicar no *link*, o respondente era direcionado ao questionário no ambiente virtual do site *Survey Monkey*. A carta-convite com *link* de acesso atingiu um total de 952 empresas entre de 6 de dezembro de 2019 a 1º de março de 2020. O número total de questionários respondidos obtidos foi de 185, entretanto, algumas empresas não foram consideradas nas análises, pois responderam que não realizavam atividades de desenvolvimento de produtos, e portanto, não atendiam ao critério básico desta pesquisa (por exemplo, empresas que apenas distribuem produtos foram desconsideradas nesta fase da pesquisa). Após a exclusão de empresas respondentes fora do padrão (*outliers*), a amostra final foi composta por 142 empresas. Vale notar também que em termos absolutos, o número total de questionários obtidos é superior a outras pesquisas na área de operações sustentáveis (por exemplo: JABBOUR et al., 2015; SARKIS; GONZALEZ-TORRE; ADENSO-DIAZ, 2010; SELES et al., 2019).

Por fim, um dos problemas mais recorrentes em pesquisas do tipo *survey* é o viés de não-resposta, que ocorre quando há uma diferença significativa entre aqueles que responderam à pesquisa e aqueles que não responderam (GANJOU EI; HAMID; SUKATI, 2018). De modo a garantir a representatividade da amostra, e que não houvessem diferenças entre os respondentes-alvo que não participaram da pesquisa com a amostra obtida, foi realizado um teste-t para comparar a diferença média das duas “ondas” de resposta, entre os respondentes precoces e tardios (FULTON, 2018). A Tabela 1 apresenta os valores significativos obtidos (> 0.05), indicando que o viés de não-resposta não é uma preocupação para esta pesquisa, uma vez que a amostra pode ser generalizada para a população tanto no teste de *Levene* quanto na igualdade de médias para as variáveis do modelo.

Tabela 1. Avaliação do viés de não resposta.

Constructo	Significância do teste	Significância teste-t para
	de Levene	igualdade de médias
<i>Indústria 4.0 (IND)</i>	0.822	0.683
<i>Pressão de Stakeholders (STP)</i>	0.961	0.663
<i>Desenvolvimento de produtos circulares (CPD)</i>	0.533	0.507
<i>Desempenho Ambiental (EPR)</i>	0.901	0.750
<i>Desempenho de Mercado (MPR)</i>	0.862	0.666

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Análise dos dados

A técnica *Partial Least Squares* (PLS) da Modelagem de Equações Estruturais (SEM) foi adotada para a análise dos dados coletados. Esta abordagem é considerada adequada em situações que envolvem modelos complexos com tamanhos de amostra médios, como obtido

nesta etapa da pesquisa. Este tipo de modelagem pode ser entendida como uma extensão da regressão múltipla, pois na aplicação da regressão se prevê uma única variável dependente e na SEM existe mais de uma variável dependente. Assim, a adoção da PLS-SEM consiste pela necessidade em se estabelecer um modelo conceitual que especifique a teoria de ordem causal e as relações entre um conjunto de variáveis.

O *software SmartPLS 3* foi aplicado para analisar os dados coletados (RINGLE, WENDE, BECKER, 2015). Como a amostra final obtida nessa pesquisa foi de 142 respostas, pode-se considerá-la satisfatória, uma vez que, a adequação estatística da amostra obtida foi verificada por meio do *software G*Power 3.1* (FAUL et al., 2007), e resultado apontou que o número mínimo adequado era de 76 respostas.

Os resultados são detalhados no próximo capítulo, o qual apresenta os modelos de medição por meio de análise composta confirmatória (CCA) (por exemplo, cargas fatorial, variância média extraída e confiabilidade composta). Ainda, os resultados do modelo estrutural são apresentados por meio do estimador de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) ou *Ordinary Least Squares* (OLS) no idioma inglês (por exemplo, r-quadrado, tamanho do efeito e valor *p*).

As hipóteses foram testadas por meio de uma abordagem de *bootstrapping* com um intervalo de confiança (CI) de 95%. Os resultados das verificações de robustez foram realizados para fortalecer as principais conclusões desta pesquisa. Em termos de *bootstrapping*, 5.000 sub amostras foram utilizadas para obter estabilidade das estimativas do modelo por meio de métodos de intervalo de confiança, ou seja, *bootstrap Biased-Corrected Accelerated* (BCa). Além disso, o nível de significância foi definido para rejeitar a hipótese nula unilateral em 5%. No próximo capítulo são apresentados os resultados encontrados nas três etapas realizadas nesta pesquisa, de acordo com cada método aplicado.

4 RESULTADOS

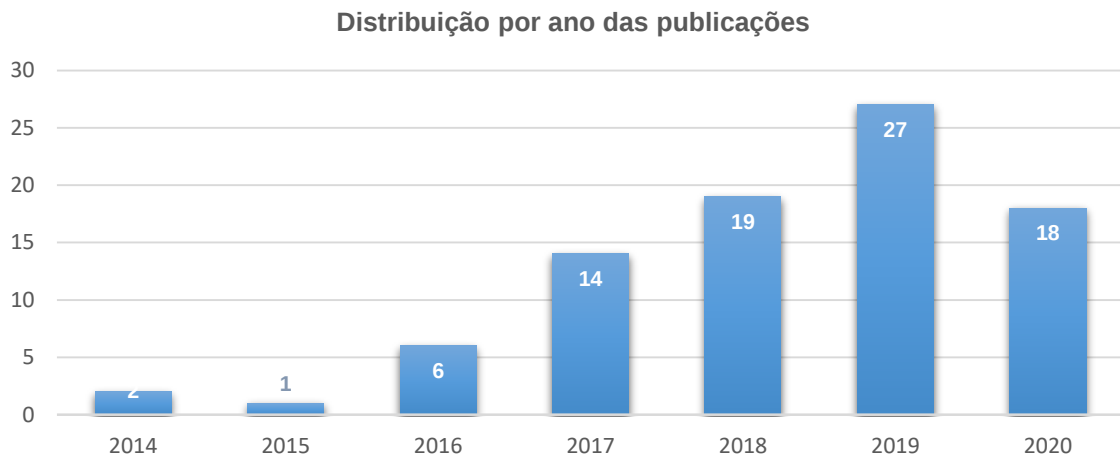
4.1 Revisão Sistemática da Literatura

A primeira etapa da pesquisa, revelou uma série de características relevantes que permeiam o contexto da adoção do DPC. Os achados que compõem a parte teórica desta pesquisa estão relacionados a: (i) panorama de publicações; (ii) abordagens metodológicas aplicadas; (iii) impacto das publicações; (iv) estratégias de *design* comumente adotadas; (v) tecnologias da Indústria 4.0 presentes no DPC; (vi) barreiras para o DPC; e (vii) relevância dos *stakeholders*.

4.1.1 Panorama da literatura em DPC

De acordo com a análise de publicações por ano, pode-se compreender que o campo de estudo que integra o DPC é relativamente novo e tem sido investigado principalmente a partir de 2016, sendo que apenas 3 artigos compuseram os anos de 2014 e 2015. Como o recorte da pesquisa considerou as publicações realizadas até o primeiro semestre de 2020, o maior número publicações é encontrado em 2019 (27 artigos); no entanto, é possível projetar que o número de pesquisas sobre o tema continuará crescendo em 2020, superando 2019. O Gráfico 1 apresenta a quantidade de artigos publicados ao longo dos anos, considerando todo o histórico de publicações.

Gráfico 1. Evolução das publicações ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os primeiros artigos presentes na base de dados *Scopus*, em ordem cronológica foram de Bakker et al. (2014), no qual os autores exploram a extensão do ciclo de vida do produto por meio de estratégias de design, e o de Whalen e Peck (2014), o qual propõe uma abordagem sobre o tópico de materiais críticos em EC, por meio de um jogo denominado ‘In the Loop: The Critical Raw Materials Game.’ Vale ressaltar que o trabalho de Bakker et al. (2014), é um dos mais relevantes em termo de impacto e citações, assunto abordado no item 4.1.3 deste capítulo.

Em relação aos periódicos nos quais os artigos analisados foram publicados, foram identificados 28 no total. Destes, *Journal of Cleaner Production*; *Sustainability*; *Resources, Conservation & Recycling*; e o *Journal of Industrial Ecology* apresentam maior frequência que os demais, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Principais periódicos em quantidade de artigos publicados.

Periódicos	Nº de publicações	Frequência (%)
<i>Journal of Cleaner Production</i>	27	31
<i>Sustainability</i>	17	20
<i>Resources, Conservation & Recycling</i>	9	10
<i>Journal of Industrial Ecology</i>	6	7
<i>Demais periódicos</i>	28	32
Total	87	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

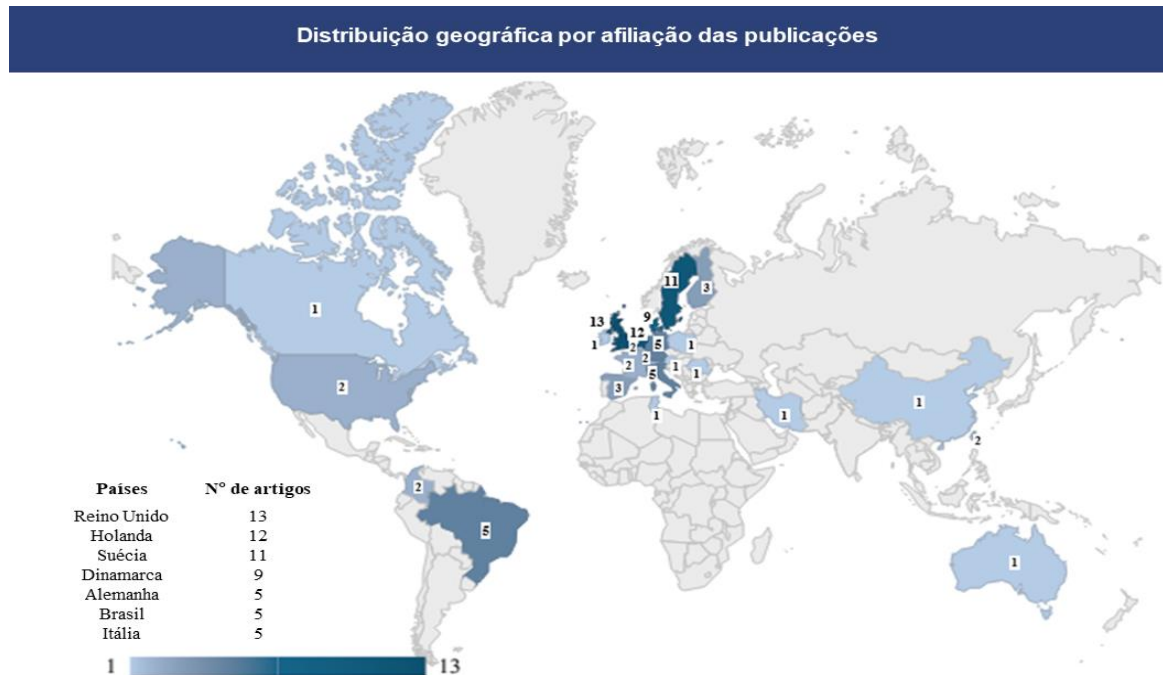
A origem das publicações foi também identificada por meio da análise das afiliações dos primeiros autores, indicando o número de documentos publicados por país. Os estudos focaram principalmente os países desenvolvidos da Europa, representando 82% da amostra (Tabela 3). A Figura 7 apresenta a localização geográfica das publicações identificadas. A variação da cor do azul indica o nível de contribuição de cada país no tema.

Tabela 3. Principais continentes em quantidade de artigos publicados no tema DPC.

Continentes	Total	Frequência (%)
<i>Europa</i>	71	82
<i>América do Sul</i>	7	8
<i>Ásia</i>	4	5
<i>América do Norte</i>	3	3
<i>África</i>	1	1
<i>Oceania</i>	1	1
Total	87	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7. Ilustração da distribuição geográfica das publicações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

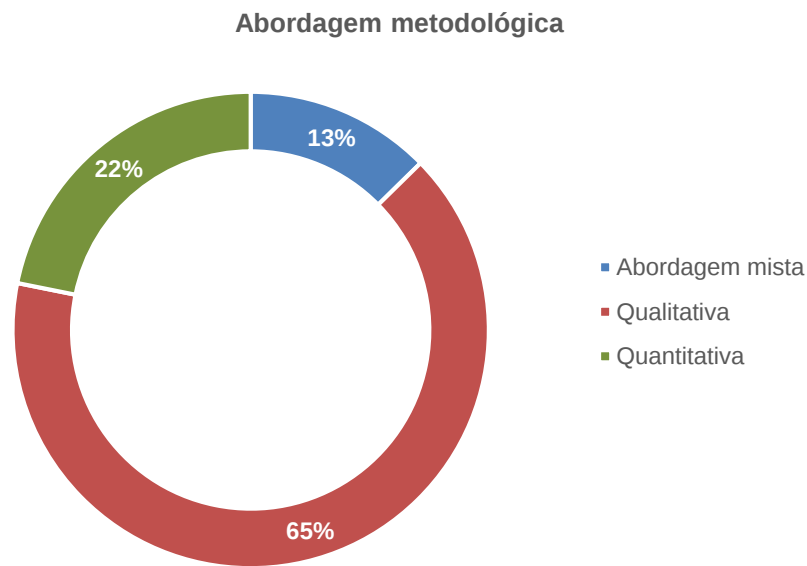
A Figura 7 mostra grande dispersão de publicações na Europa. Observa-se que as principais contribuições são do Reino Unido (13), Holanda (12), Suécia (11), e Dinamarca (9). O único país com certa expressividade que não integra o continente europeu é o Brasil, com 5 publicações no total. Apenas 4 artigos afiliados à Ásia, 3 à América do Norte, e somente uma contribuição para a África e Oceania.

4.1.2 Abordagem metodológica e características da literatura

A abordagem metodológica adotada com maior frequência pelos autores dos artigos analisados foi a qualitativa. Dentre os 87 artigos, 65% utilizaram esta abordagem, 22% utilizaram a abordagem quantitativa e apenas 13% utilizaram abordagem com método misto. No grupo de abordagem qualitativa, parte dos artigos publicados apresenta foco em estudos conceituais e propostas de ferramentas ou *frameworks*, em alguns casos com a realização de *workshops* de avaliação das propostas. Ainda com características qualitativas, revisões da

literatura e estudos de caso compõem os métodos mais comumente aplicados. O Gráfico 2 ilustra a distribuição percentual das abordagens aplicadas.

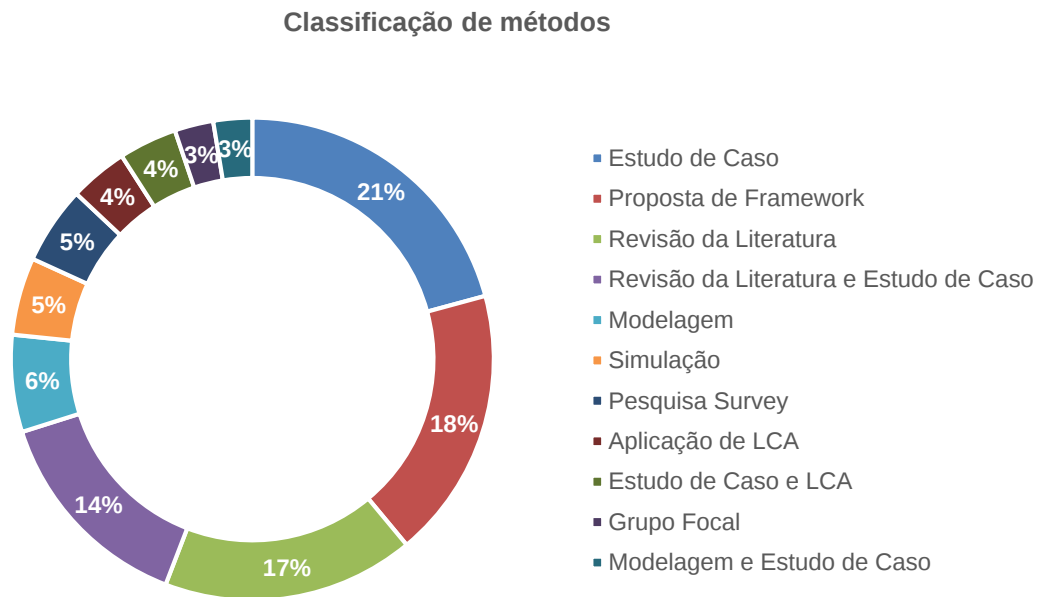
Gráfico 2. Abordagem metodológica das publicações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicações de modelagem e simulação são exemplos de aplicações de critério quantitativo. Neste contexto de pesquisa, apenas 4 artigos com levantamento tipo *survey* foram encontrados. Ainda, aplicações com estudo de caso e LCA, ou o emprego da modelagem com estudo de caso são poucos exemplos de abordagens mista identificadas. O Gráfico 3 ilustra a distribuição percentual da classificação metodológica, sendo que métodos encontrados em apenas 1 artigo foram desconsiderados na contagem.

Gráfico 3. Distribuição de métodos aplicados nas publicações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Impacto da pesquisa

Considerando o recente histórico de publicações sobre o tema, o artigo de Bocken et al. (2016) destaca-se entre todos os documentos revisados com o maior número de citações na base *Scopus*, apresentando quase o dobro do segundo artigo com maior impacto, de Bakker et al. (2014). Em seu artigo, Bocken e colegas desenvolveram um *framework* de estratégias para orientar projetistas e estrategistas de negócios no avanço de uma economia linear para uma circular, com base nas terminologias de ciclos de recursos: *slowing, closing, and narrowing*.

Nesse sentido, os autores apresentam uma lista de estratégias de *design* de produto, estratégias de modelo de negócios e exemplos para os principais tomadores de decisões em empresas (Bocken et al., 2016). No Quadro 7 os cinco artigos mais citados da amostra analisada na base de dados *Scopus* podem ser identificados.

Quadro 7. Principais artigos em quantidade de citações no tema DPC.

Autores	Títulos	Revistas	Citações
<i>Bocken et al. (2016)</i>	Product design and business model strategies for a circular economy	Journal of Industrial and Production Engineering	382
<i>Bakker et al. (2014)</i>	Products that go round: exploring product life extension through design	Journal of Cleaner Production	195
<i>Singh e Ordoñez (2016)</i>	Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy	Journal of Cleaner Production	105
<i>Moreno et al. (2016)</i>	A Conceptual Framework for Circular Design	Sustainability	101
<i>Den Hollander et al. (2017)</i>	Product Design in a Circular Economy	Journal of Industrial Ecology	96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que em relação ao impacto de autoria por artigos mais citados, o Professor Bakker, do Departamento de Engenharia de Projetos da *Delft University of Technology*, é autor ou coautor de três dos cinco documentos. Os artigos publicados por Bakker também contribuem para o posicionamento relevante da Holanda entre os principais países europeus, devido à afiliação na instituição holandesa.

4.1.4 Estratégias de design (DfX)

Com relação à adoção do DPC, a literatura oferece uma série de estratégias de *design* focadas na circularidade, as quais podem ser aplicadas nas etapas iniciais do processo desenvolvimento de produtos (DEN HOLLANDER et al., 2017; MENDOZA et al., 2017). Por meio da revisão sistemática, 38 estratégias de *design* foram identificadas, geralmente

apresentadas na literatura como *design for X* (DfX). O Quadro 8 lista as estratégias presentes nos artigos, os quais referenciam cada uma delas.

Quadro 8. Principais estratégias de *design* (DfX).

Estratégias DfX	Artigos que abordam a estratégia referida
<i>Adaptabilidade</i>	Sassanelli et al. (2020)
<i>Apego e confiança</i>	Bocken et al. (2016); Mesa et al. (2018)
<i>Montagem e remontagem</i>	Moreno et al., (2016); Mesa et al. (2020)
<i>Biomimética</i>	Moreno et al. (2016); Mendoza et al. (2017); Sauerwein et al. (2019)
<i>Biodegradabilidade</i>	Bocken et al. (2016); Singh e Ordoñez (2016); Moreno et al. (2016); Mendoza et al. (2017); Mesa et al. (2018)
<i>Cascata</i>	Moreno et al. (2016); Shahbazi e Jönbrink (2020)
<i>Desmontagem</i>	Bocken et al. (2016); Moreno et al. (2016); Almeida et al. (2017); De los Rios e Charnley (2017); Talens Peiró et al. (2017); Mendoza et al. (2017); Bovea e Pérez-Belis (2018); Mandolini et al. (2018); Mesa et al. (2018); Vanegas et al. (2018); Franco (2019); Halstenberg et al. (2019); Urbinati et al. (2019); Belhadj et al. (2019); Sousa Jabbour et al. (2019); Koszewska e Bielecki (2020); Sassanelli et al. (2020)
<i>Durabilidade e Longevidade</i>	Bocken et al. (2016); Moreno et al. (2016); Mestre e Cooper (2017); Bovea e Pérez-Belis (2018); Bovea et al. (2018b); Haines-Gadd et al. (2018); Mesa et al. (2018); Sumter et al. (2018); Sousa-Zomer et al. (2018); Selvefors et al. (2019); Singh et al. (2019); Mesa et al. (2020); Sassanelli et al. (2020); Stegmann et al. (2020); Stamminger et al. (2020)
<i>Fácil Manutenção e Reparo</i>	Bocken et al. (2016); Moreno et al. (2016); Singh e Ordoñez (2016); den Hollander et al. (2017); Mestre e Cooper (2017); Talens Peiró et al. (2017); Ackermann (2018); Bovea et al. (2018a); Haines-Gadd et al. (2018); Mesa et al. (2018); Sousa-Zomer et al. (2018); Stewart e Niero (2018); Sumter et al. (2018); Franco (2019); Sousa Jabbour et al. (2019); Halstenberg et al. (2019); Holtström et al. (2019); Arcos et al. (2020); Parajuly et al. (2020); Sassanelli et al. (2020); Shahbazi e Jönbrink (2020)
<i>Ecodesign</i>	Urbinati et al. (2019); Sihvonen e Partanen (2016); De los Rios e Charnley (2017)
<i>Eficiência Energética</i>	Mestre e Cooper (2017); Mendoza et al. (2017); Sassanelli et al. (2020)

Modularidade	Talens Peiró et al. (2017); Mendoza et al. (2017); Halstenberg et al. (2019); Chen (2020); Sassanelli et al. (2020)
Confiabilidade	Bocken et al. (2016); De los Rios e Charnley (2017); Mesa et al. (2018); Sousa-Zomer et al. (2018); Sassanelli et al. (2020)
Sistema Produto-Serviço	Moreno et al. (2016); Mendoza et al. (2017); Ackermann (2018); Sinclair et al. (2018); Bech et al. (2019); Franco (2019); Halstenberg et al. (2019); Holtström et al. (2019); Sousa Jabbour et al. (2019); Kaddoura et al. (2019); Kjaer et al. (2019); Kristensen e Remmen (2019); Tunn et al. (2019); Chen (2020); Fernandes et al. (2020); Jabbour et al. (2020); Jugend et al. (2020); Sassanelli et al. (2020); Stegmann et al. (2020); van der Laan e Aurisicchio (2020)
Reciclagem	Bakker et al. (2014); Bocken et al. (2016); Moreno et al. (2016); Singh e Ordoñez (2016); Atlason et al. (2017); De los Rios e Charnley (2017); Mestre e Cooper (2017); Hildebrandt et al. (2017); Mendoza et al. (2017); Bovea e Pérez-Belis (2018); Bovea et al. (2018a); Hannula et al. (2018); Miliós et al. (2018); Ragaert et al. (2018); Stewart e Niero (2018); Subramanian et al. (2018); Eriksen e Astrup (2019); Holtström et al. (2019); Franco (2019); Leissner e Ryan-Fogarty (2019); Ford e Fischer (2019); Sousa Jabbour et al. (2019); Urbinati et al. (2019); Cooper et al. (2020); Flood et al. (2020); Jugend et al. (2020); Koszewska e Bielecki (2020); Parajuly et al. (2020); Sassanelli et al. (2020); Shahbazi e Jönbrink (2020)
Reutilização	Bocken et al. (2016); Singh e Ordoñez (2016); Almeida et al. (2017); Atlason et al. (2017); De los Rios e Charnley (2017); Mendoza et al. (2017); Talens Peiró et al. (2017); Bovea e Pérez-Belis (2018); Bovea et al. (2018a); Subramanian et al. (2018); Stewart e Niero (2018); Holtström et al. (2019); Franco (2019); Urbinati et al. (2019); Koszewska e Bielecki (2020); Parajuly et al. (2020); Shahbazi e Jönbrink (2020)
Cadeia de Valor	Moreno et al. (2016); Mestre e Cooper (2017); Sassanelli et al. (2020)
Diagnóstico de Falhas	Arcos et al. (2020)
Durabilidade Emocional	Moreno et al. (2016); den Hollander et al. (2017); Haines-Gadd et al. (2018)
Fim do Ciclo de Vida	Moreno et al. (2016); Sabaghi et al. (2016); Mestre e Cooper (2017); Parajuly e Wenzel (2017); Sassanelli et al. (2020);
Substituição	Selvefors et al. (2019)
Múltiplos Ciclos	Sinclair et al. (2018); Selvefors et al. (2019); Sassanelli et al. (2020); Sumter et al. (2020)
Pré-uso e Pós-uso	Selvefors et al. (2019)
Qualidade de Produção	Moreno et al. (2016); Mestre e Cooper (2017); De los Rios e Charnley (2017)

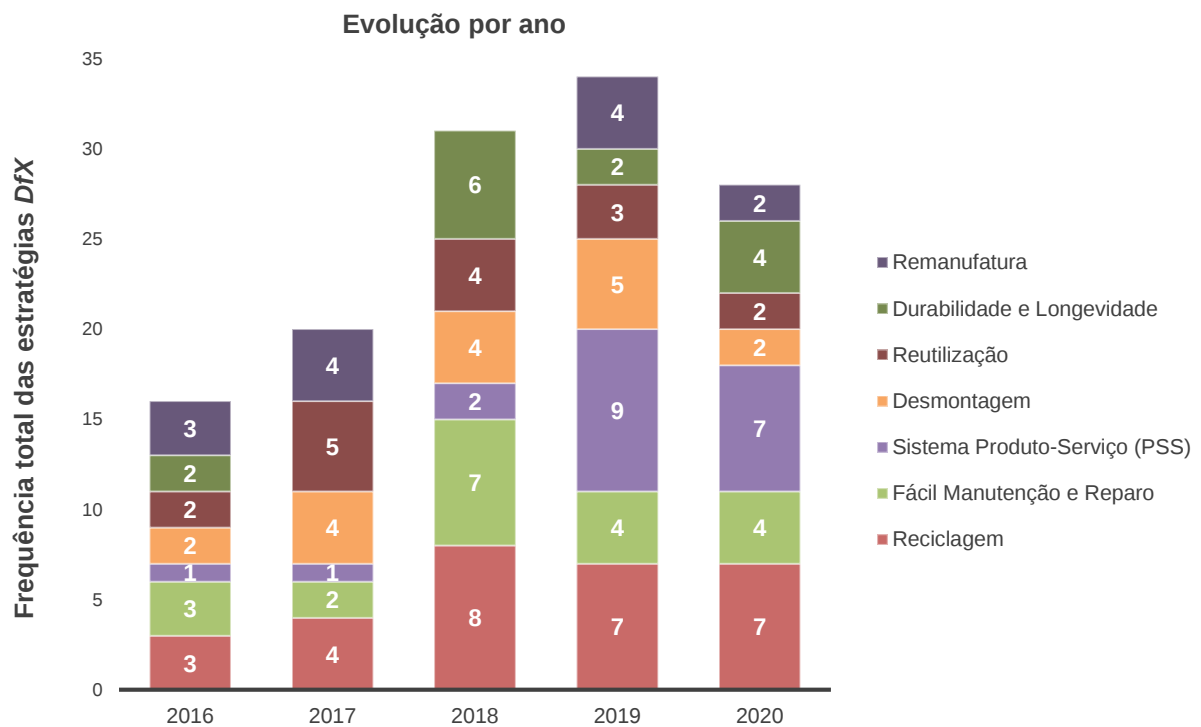
Redução	Moreno et al. (2016), Mestre e Cooper (2017); Stewart e Niero (2018); Subramanian et al. (2018); Koszewska e Bielecki (2020)
Recontextualização	den Hollander et al. (2017)
Recuperação	Stewart e Niero (2018); Sumter et al. (2020); Sassanelli et al. (2020), Shahbazi e Jönbrink (2020)
Reforma ou remodelagem	Moreno et al. (2016); den Hollander et al. (2017); Shahbazi e Jönbrink (2020)
Reconstrução	Sassanelli et al. (2020)
Remanufatura	Bocken et al. (2016); Moreno et al. (2016); Singh e Ordoñez (2016); Atlason et al. (2017); den Hollander et al. (2017); De los Rios e Charnley (2017); Mendoza et al. (2017); Haziri e Sundin (2019); Sousa Jabbour et al. (2019); Niu et al. (2019); Urbinati et al. (2019); Sassanelli et al. (2020) Shahbazi e Jönbrink (2020)
Reaproveitamento	Shahbazi e Jönbrink (2020)
Desaceleração do Ciclo de Vida	Sassanelli et al. (2020)
Padronização e Compatibilidade	Bocken et al. (2016); Mendoza et al. (2017); Mesa et al. (2018); Sassanelli et al. (2020)
Sustentabilidade	Sassanelli et al. (2020)
Atualização	Bocken et al. (2016); Moreno et al. (2016); den Hollander et al. (2017); De los Rios e Charnley (2017); Mestre e Cooper (2017); Haines-Gadd et al. (2018); Mesa et al. (2018); Shahbazi e Jönbrink (2020)
Demanda ou Disponibilidade	Moreno et al. (2016)
Miniaturização	Moreno et al. (2016); Stewart e Niero (2018)
Menor Impacto no Uso	Mestre e Cooper (2017); Haziri et al. (2019); Kjaer et al. (2019); Selvefors et al. (2019)

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar que apesar do grande número de estratégias DfX disponível, a literatura tem se concentrado principalmente em projetos para reciclagem, reutilização, desmontagem, durabilidade, facilidade de manutenção e reparo, remanufatura, e, finalmente,

no sistema produto-serviço ou PSS. O Gráfico 4 ilustra a distribuição das principais abordagens das estratégias DfX ao longo dos últimos 5 anos.

Gráfico 4. Distribuição das estratégias de *design*.



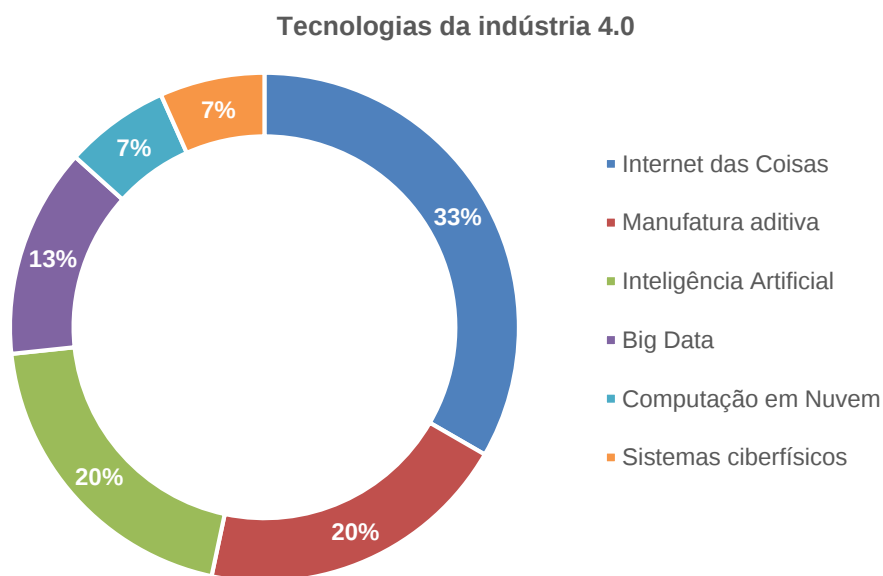
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a frequência total de presença nos artigos apresentada no gráfico 4, pode-se notar que *design* para reciclagem se destaca com menção em 30 artigos, representando a estratégia mais abordada na literatura. *Design* para Fácil Manutenção e Reparo, e Sistema Produto-Serviço (PSS) foram identificados em 20 artigos, *design* para desmontagem obteve uma frequência total de 17 menções, e *design* para reutilização foi identificado em 16 documentos. Por fim, com frequência superior a dez menções em artigos, *design* para durabilidade e longevidade, e *design* para remanufatura foram destacados em respectivamente 14 e 13 pesquisas. As estratégias DfX com frequência inferior a 10 menções foram desconsideradas no gráfico.

4.1.5 Tecnologias da indústria 4.0 relacionadas à adoção do DPC

No contexto dos avanços das estratégias circulares em empresas, parte das pesquisas tem abordado a relevância da transformação digital em projetos de desenvolvimento de novos produtos e serviços (ROSA et al., 2020). Em busca de compreender quais tecnologias tem se destacado neste contexto, esta revisão identificou, nos artigos revisados, as principais tecnologias emergentes relacionadas à adoção do DPC. O conteúdo está disponível no Gráfico 5.

Gráfico 5. Distribuição de tecnologias da indústria 4.0 relacionadas à adoção do DPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados desta dimensão de análise, a principal tecnologia relacionada à adoção do DPC é a *Internet das Coisas* (IoT), representando 33% da amostra. Manufatura Aditiva, também abordada como Impressão 3D, em conjunto com inteligência artificial (AI) aparecem com alta representativa nos artigos revisados, ambas com 20% e *Big*

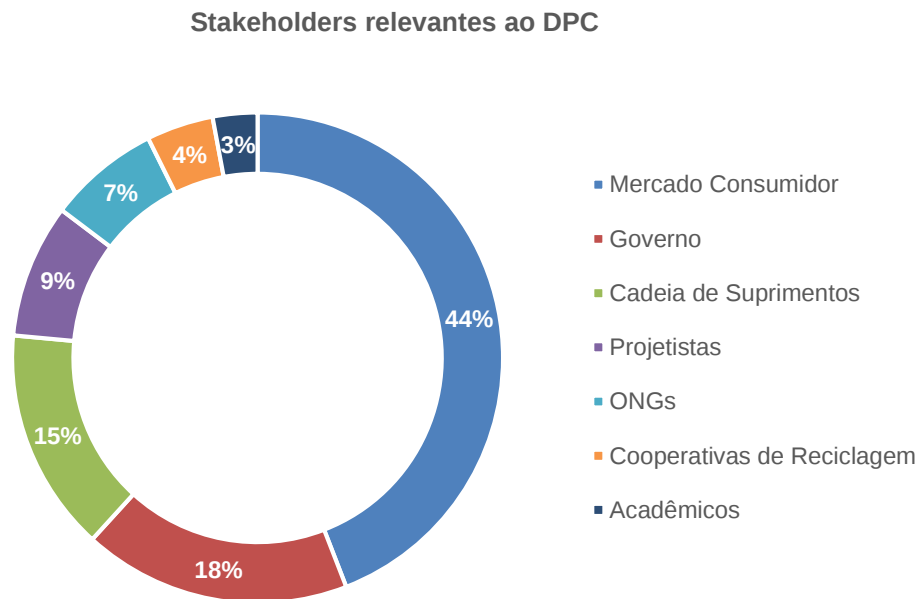
Data em seguida com 13%. Ainda, foram identificadas as menções de computação em nuvem e sistemas ciberfísicos como tecnologias associadas à Indústria 4.0.

4.1.6 Principais stakeholders inerentes ao DPC

Como já apresentado na seção 2.3.1 do capítulo de revisão teórica desta tese, o DPC permeia um cenário de pressão de diversos *stakeholders* (JABBOUR et al., 2015), sendo que questões como a conscientização sobre aspectos de sustentabilidade, relacionadas ao ciclo de vida do produtos tem se apresentado cada vez mais relevantes em cenários de mercados emergentes (JABBOUR et al., 2020). A literatura revisada, apresentou o mercado consumidor como a parte expressivamente mais relevante a ser considerar na adoção do DPC (44%). O Gráfico 7 apresenta os *stakeholders* mais frequentemente mencionados na literatura revisada, como atores relevantes ao DPC.

Além do mercado consumidor, aspectos de regulamentação e governamentais (TALENS PEIRÓ et al., 2017) obtiveram 18% da distribuição, compondo os principais atores que podem exercer maior pressão e influência ao DPC, conforme a literatura. A cadeia de suprimentos e os fornecedores (HEYES et al., 2018), também se destacam como os principais *stakeholders*, com 15% da amostra. Além disso, projetistas, organizações não governamentais (ONGs), cooperativas de reciclagem, e corpo acadêmico também foram identificados como partes em destaque diante do contexto analisado.

Gráfico 6. Distribuição dos *stakeholders* abordados pelos artigos revisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

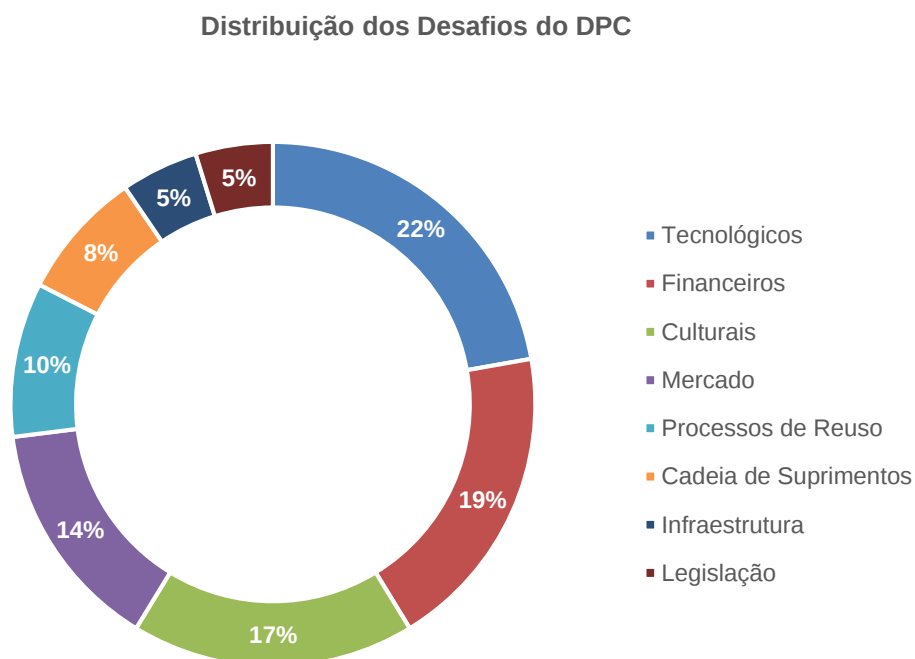
4.1.7 Desafios e barreiras relacionadas ao DPC

A adoção de um novo conceito em empresas, como por exemplo estratégias de eco inovação e EC, podem enfrentar uma série de desafios organizacionais (JESUS; MENDONÇA, 2018). Em busca de aprofundar o conhecimento do contexto dos desafios associados ao DCP, esta revisão identificou a dimensão das barreiras apontadas na literatura inerentes à sua adoção, por meio dos artigos sistematicamente analisados. De acordo com a literatura, as principais barreiras podem estar relacionadas a aspectos tecnológicos, financeiros, culturais da empresa e de preferência do mercado consumidor. Os temas frequentemente abordados pela literatura, vistos como desafios a serem superados por gestores de empresas são apresentados na Gráfico 6.

A partir dos resultados apresentados no Gráfico 6, a principal barreira ao DPC pode estar relacionada às limitações tecnológicas (HOLTSTRÖM et al., 2019; URBINATI et al.,

2019), representando 22% da amostra. Neste caso, a falta de tecnologia adequada para adoção de estratégias de *design* associadas ao DPC pode ser desafio relevante a ser superado. As barreiras econômicas e financeiras representam 19% dos apontamentos da literatura, envolvendo questões como o lucro econômico incerto, os altos custos e investimentos necessários para adoção do DPC (GHISELLINI et al., 2018; SOUSA-ZOMER et al., 2017).

Gráfico 7. Distribuição dos desafios e barreiras associadas ao DPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda em destaque, compondo uma das três principais barreiras, aspectos culturais representam 17% da amostra, seguido do mercado consumidor com 14%, aplicação de processos de reuso de matérias com 10% e a capacidade da cadeia de suprimentos em relação à circularidade com 8%. Por fim, foram identificados que infraestrutura disponível e legislação podem representar desafios ao DCP, ambos com uma amostra de 5%.

4.2 Etapa de Estudo de Casos

Nesta etapa, a realização do estudo em uma empresa de biodiversidade e outra de infraestrutura concentrou-se, principalmente, no contexto prático da adoção do DPC. Ainda, buscou-se entender a interface das aplicações de tecnologias da indústria 4.0 e o papel dos principais *stakeholders* no cenário de portfólio de projetos de novos produtos e serviços em ambas empresas.

4.2.1 *Caracterização das empresas*

A empresa A desenvolve novos produtos de interface direta com a biodiversidade, e devido à natureza de suas principais fontes de recursos tem adotado estratégias de circularidade em seu processo produtivo. A empresa atua na indústria madeireira há 30 anos, com suas plantas de produção e o escritório principal localizados na região sudoeste do interior do estado de São Paulo. Possui aproximadamente 100 funcionários, com duas lojas de atendimento ao cliente e comercialização de seus produtos. Atende principalmente ao mercado interno, possui portfólio de produtos derivados da madeira de reflorestamento, focado em equipamentos diversos para casa, construção e lazer.

A segunda empresa investigada, B, faz parte de um grupo de infraestrutura de mobilidade e transportes do Brasil. Devido a sua área de atuação, desenvolve continuamente portfólio de novos projetos de produtos e serviços com abordagem em sustentabilidade ambiental, aplicando tecnologias como forma de otimização de seus processos. Atuando no cenário brasileiro há 11 anos, é considerada uma empresa grande porte com aproximadamente 2.400 funcionários diretos e indiretos. Utiliza ferramentas para a gestão da responsabilidade socioambiental, como: Relatório de Sustentabilidade – formato GRI e Relatório do Pacto Global.

4.2.2 *Resultados do caso A*

O primeiro caso teve como objetivo reduzir a lacuna na compreensão prática da adoção do DPC, em empresa do setor que desenvolve produtos baseados na biodiversidade. A empresa atua com produtos ambientalmente sustentáveis e prioriza o DPC para atingir novos modelos de negócios circulares, com atuação da alta administração da companhia durante todo o processo de desenvolvimento de novos produtos. Como parte deste processo, as etapas iniciais dos projetos foram apontadas como estratégicas, pois permitem avaliar o grau de sinergia de cada projeto com a missão, visão e valores da empresa.

Todas as decisões sobre qual projeto será selecionado são tomadas com vistas aos aspectos ambientais no que diz respeito à preservação da mata nativa. Segundo os entrevistados, a extração de madeira nativa prejudica significativamente a biodiversidade e optar por trabalhar com insumos oriundos de fontes renováveis preserva a fauna e flora brasileira, uma vez que visa manter as áreas de proteção ambiental e preservação permanente protegidas. Além disso, a empresa evita desenvolver qualquer produto ou subproduto que utilizem materiais que possam gerar resíduos nocivos ou poluir o meio ambiente. Assim, a decisão sobre quais produtos desenvolver ocorre baseada principalmente na possibilidade de utilização de madeira de reflorestamento.

4.2.2.1 *Práticas para adoção do DPC*

A utilização da madeira se mostrou como a principal forma para a aplicação de estratégias de circularidade desenvolvimentos dos produtos da empresa A, uma vez que permite, por exemplo, que todos os resíduos gerados sejam considerados no desenvolvimento de novos projetos. Dentre as estratégias mais comumente adotadas, e aplicadas para direcionar os projetos com ênfase ao reaproveitamento e processos de reuso, destacaram-se

as decisões relacionadas a ‘*design* para biodegradabilidade’, ‘*design* para reutilização’, e ‘*design* para reaproveitamento’. A decisão estratégica de aplicação e consumo apenas de madeira como insumo é refletida principalmente pela abordagem da biodegradabilidade, sendo que o impacto e degradação do meio ambiente são mínimos.

Durante o processo produtivo, os resíduos são recolhidos e realocados para reutilização como insumo em novos produtos, os quais foram concebidos para este efeito. Neste sentido, as estratégias de reutilização e de reaproveitamento são aplicadas continuamente. Alguns exemplos desses novos produtos identificados como oportunidades de DPC na empresa A foram: materiais para paisagismo, estacas para suporte de cercas, e o próprio cascalho de madeira. Além da reutilização dos resíduos, o benefício da decomposição da madeira é aplicado para geração de uma substância orgânica natural, que também é comercializada como um novo produto de linha da empresa A.

Foi comentado ainda pelo diretor de executivo da empresa, que uma prática para o atendimento a possíveis demandas de mercado e geração de ideias no processo de desenvolvimento de produtos está relacionada à análises de dados de mídias sociais. Neste caso, a empresa adota testes de mercado para identificar quais projetos de produtos tendem a ser mais bem aceitos pelos consumidores. Em relação ao processo produtivo, a empresa busca sempre obter maquinário de alta tecnologia com o objetivo de otimizar recursos e processos, neste sentido, a substituição por novos equipamentos tecnológicos foi observada em visita a planta de produção, o que apresenta relação direta com ação ‘Substituir’ do *framework* ReSOLVE de *Ellen MacArthur Foundation*.

4.2.2.2 Contexto do desenvolvimento de produtos de biodiversidade

A pressão dos *stakeholders* internos e externos se destacaram na empresa A com maior relevância no contexto do DPC. O posicionamento da diretoria e alta administração no desdobramentos dos alinhamentos e objetivos estratégicos foi apontado como fator positivo, sendo que influencia a cultura organizacional e em todos os níveis de gestão, além dos operacionais. Foi comentado pela engenheira florestal que em empresas nas quais a direção não esteja comprometida com o DPC de maneira prática, além do posicionamento institucional, ações oriundas da operação poderiam não ser avaliadas nem adotadas, desestimulando simples atividades como o processo de reciclagem de resíduos administrativos, por exemplo.

A pressão regulatória também foi identificada como positiva para as decisões de desenvolvimento de produtos. O cumprimento da legislação ocorre também devido a empresa seguir as normas relacionadas ao desenvolvimento e à fabricação de produtos derivados da madeira. Estes fatores foram apontados como aspectos relevantes e responsáveis pela opção em atuar com o DPC, uma vez que grande parte de seus clientes optam por adquirir produtos de empresas reconhecidas por não agredir a biodiversidade florestal.

Aspectos financeiros relacionados ao custo de produção e operações também foram destacados pelos entrevistados. Segundo o diretor de operações, existem produtos semelhantes no mercado, todavia produzidos com outros tipos de insumo, por exemplo concreto, polietileno, etc. Estes produtos, além de apresentarem maior dano ao meio ambiente, geralmente tem preço de mercado superior aos produzidos com a madeira de reflorestamento.

O posicionamento no mercado foi apontado como um fator importante para a alta administração da empresa A. Os estímulos referem-se à imagem da empresa, cuja visão é ser reconhecida pelo mercado como “amiga” da biodiversidade, todavia os entrevistados disseram haver oportunidades no setor, principalmente relacionadas a percepção de qualidade dos produtos, representando estes alguns dos desafios a serem superados. Segundo o diretor executivo, alguns clientes ainda entendem que produtos produzidos a partir de outro tipo de insumo podem oferecer maior qualidade. Com o objetivo de sintetizar os tópicos mais relevantes identificados no estudo de caso da empresa A, o Quadro 9 apresenta os comentários dos entrevistados sobre as variáveis discutidas considerando o contexto de gestão do DPC.

Quadro 9. Principais variáveis comentadas pelos entrevistados da empresa A.

<i>Destaques</i>	<i>Comentários/Citações</i>
Custo de produção pode impulsionar a adoção do DPC	<i>“Principalmente pelo custo total de produção e pelos benefícios de todo o ciclo de vida de nossos produtos, em relação às opções de mercado para produtos similares, onde parte deles é composto por materiais de fontes não renováveis, como polietileno, concreto, etc.”</i> <i>“Um produto acabado e tratado de eucalipto custa em média 50% menos do que um produto similar, produzido com matéria-prima inútil.”</i>
A integração com stakeholders influencia positivamente o DPC	<i>“Ações como divulgação dos objetivos dentro da empresa, posicionamento da marca, além de estarmos atentos à demanda de mercado e aos requisitos regulatórios são positivas para as decisões de projetos.”</i>
Estratégia de reutilização preserva a biodiversidade	<i>“Quando a estratégia é usar madeira reflorestada, a área de floresta já está devastada há muitos anos, então é uma forma de preservar a mata nativa, evitando mais desmatamentos.”</i> <i>“Além disso, não há desperdício em nosso processo, além de valor agregado pelas técnicas de reaproveitamento, e mesmo após o uso, a decomposição não afeta o meio ambiente.”</i>

Falta de tecnologia impacta negativamente o DCP	<i>“A tecnologia disponível está estagnada quando comparada a outros setores semelhantes da economia. Por exemplo, na agricultura: equipamentos de extração, transporte, armazenamento e rastreabilidade são mais comumente aplicados e parecem estar em estágios mais avançados do que na indústria madeireira.”</i>
Demanda de mercado apresenta certa controvérsia	<i>“Parte do mercado acha que os produtos da empresa têm baixa qualidade devido à matéria-prima.”</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Quadro 9, a empresa A tem enfrentado certos desafios relacionados à adoção de tecnologias para a gestão do DPC. Uma barreira substancial destacada refere-se às restrições tecnológicas disponíveis no setor. Segundo os entrevistados, como o setor madeireiro não é muito dinâmico, existem poucas soluções digitais disponíveis para agregar em seu portfólio de produtos. Ainda, na visão do diretor executivo, o cenário tende a ser diferente em setores considerados mais inovadores, como por exemplo a indústria de eletroeletrônicos, ou agroindústria.

Segundo a engenheira florestal, aspectos relacionados a cadeia de suprimentos também podem influenciar o crescimento e melhoria do DPC na empresa. Atualmente há falta de acordos comerciais e entraves burocráticos e estruturantes no setor, principalmente relacionados a logística. Neste caso foi sugerido que há necessidade de uma maior coalização entre os atores do setor, desde a extração até o consumo do produto final.

4.2.3 Resultados do caso B

Os resultados primários obtidos com o caso A visaram aprofundar o conhecimento empírico de práticas do DPC, o qual adicionado à literatura revisada, direcionou a execução do segundo estudo de caso. De acordo com a relevância do acesso ou restrições tecnológicas

neste contexto do DPC, considerou-se avaliar com maior profundidade a interface das aplicações do DPC e de tecnologias da indústria 4.0 em projetos de novos produtos e serviços desenvolvidos em uma empresa de grande porte no setor de infraestrutura.

No que diz respeito ao portfólio de desenvolvimento de novos produtos e serviços na empresa B, foi identificado que o direcionamento parte de uma área de gestão de projetos composta por um coordenador e um analista ambos certificados como *Project Management Professional* (PMP). Ainda, de um departamento de gestão ambiental, o qual desenvolve e acompanha integralmente os projetos da empresa, composto por um gerente, um engenheiro florestal, e um analista ambiental.

Com abordagem para as questões socioambientais, conforme apresentado pelos entrevistados, os projetos desenvolvidos na empresa B são compostos por: produção de placas de comunicação viária; construções de edificações estruturais na área de transportes e mobilidade; e o desenvolvimento de produtos com foco na otimização operacional dos serviços oferecidos pela empresa, como por exemplo, o sistemas de gestão de rodovias (SGR), desenvolvido a partir da integração da área de tecnologia da informação com demais áreas de gestão, como planejamento, operações, e administrativo.

4.2.3.1 Práticas para adoção do DPC

Durante a reuniões realizada na empresa B, os entrevistados apresentaram o portfólio de desenvolvimento de novos produtos e serviços, o qual vem sendo gerenciado com aplicação de tecnologias digitais da Indústria 4.0 associada a princípios de sustentabilidade ambiental. As premissas da preocupação sustentável estão ligadas à missão da empresa, que coloca as questões de segurança e meio ambiente em primeiro plano e o escritório de projetos

(PMO) é responsável pela verificação do atendimento às exigências para adoção das práticas de preservação ambiental desde o início do desenvolvimento de seus produtos.

Durante as discussões sobre as características dos produtos, foi identificado que devido às necessidades da empresa em relação a seus *stakeholders*, como por exemplo o Governo Estadual, a seleção para desenvolvimentos parte principalmente de estratégias de ‘*design* para eficiência energética’, ‘*design* para durabilidade e longevidade’, ‘*design* para redução’, e ‘*design* para sistema produto-serviço’. Os projetos com a aplicação das estratégias de *design* identificadas, também tem favorecido o atingimento dos objetivos de operação sustentável da empresa B, os quais preveem o otimização de processos por meio de soluções mais tecnológicas.

Neste sentido, a implantação de um sistema de geração de energia solar foi apontado como um dos projetos mais relevantes, em desenvolvimento desde o início das atividades da companhia. Percebeu-se, também, que grande parte dos projetos apresenta características alinhadas às propostas de substituição por novas tecnologias e, especialmente, virtualização, a fim de otimizar recursos durante o uso, características relacionadas a estratégias de ‘*design* para redução’ e adequadas às ações ‘Substituir’ e ‘Virtualizar’ da EC, como apresentado no Quadro 1 desta tese.

A virtualização foi pontuada como um dos meios mais relevantes para atingir os objetivos de otimização dos novos produtos da empresa. Para isso, *big data* e computação em nuvem foram apresentados como as tecnologias mais relevantes e comumente aplicadas nos sistema de gestão operacional da empresa. Outra tecnologia destacada em grande parte dos projetos é a inteligência artificial, presente por exemplo, na aplicação de novos produtos capazes de reconhecer caracteres de placas de veículos (*OCR*), a partir de um arquivo de imagem ou mapa de *bits*, ou na automação das transações de pagamentos com tecnologia de identificação por rádio frequência (*RFID*). Em relação ao PSS, os entrevistados mencionaram

a implantação de oferta de serviços associados a acesso à *internet Wi-Fi* gratuito, além da oferta de aplicações digitais a fim de adicionar valor ao consumo dos produtos e serviços pelo usuários e clientes da empresa.

4.2.3.2 Contexto do desenvolvimento de produtos de infraestrutura

Durante a avaliação das características da empresa B, operante no setor de infraestrutura, notou-se que os principais estímulos para as questões de circularidade são derivados da necessidade de se atender a normas e legislações. Isso dá-se, principalmente, devido ao foco da empresa em questões de responsabilidade socioambiental, além da presença de certificações como por exemplo a ISO 14001. A empresa também é signatária do Pacto Global, iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU) com objetivo da adoção de valores internacionalmente aceitos nas áreas de direitos humanos, relações de trabalho, meio ambiente e combate à corrupção, o que corrobora com o posicionamento da empresa.

Os entrevistados afirmaram que sempre buscam conhecer e aplicar as principais práticas de circularidade adotadas no setor. Neste sentido, a análise da adoção das estratégias DfX é considerada um importante validador do processo de tomada de decisão para aprovações de novos projetos. O gerente ambiental destacou que os indicadores ambientais são uns dos mais relevantes na gestão do desenvolvimento, sendo que as decisões voltadas às normas de qualidade, ambientais e de segurança do trabalho podem até mesmo impactar no prazo de conclusão dos projetos.

Um outro aspecto relevante apontado na entrevista foi o papel dos fornecedores, principalmente no que se refere a capacidade de cumprir as premissas exigidas pela empresa, uma vez que a consideração das práticas de EC e de sustentabilidade em geral são exigidas

em diversos níveis da cadeia de suprimentos. O posicionamento e a qualidade dos atores envolvidos nos projetos da empresa B são necessárias para os processos de auditoria que a empresa participa, assim, este fator é considerado como boa prática ao desempenho ambiental da empresa, sendo um critério de substituição ou exclusão de fornecedores.

Além dos benefícios ambientais inerentes a adoção das práticas observadas, foram apresentados ganhos econômicos relacionados a implantação de novos produtos, por exemplo, o desenvolvimento de um novo sistema de gestão de regulação e vazão nas torneiras da sede administrativa representou uma redução de 75% do consumo de água. Um outro projeto destacado, considerando a substituição para iluminação por energia solar, representou para a empresa uma economia de 64% no consumo de energia. Neste caso a adoção de novas tecnologias impacta positivamente tanto os indicadores de eficiência de processo, quanto os financeiros relacionados aos custos operacionais. Os entrevistados ainda relataram que, em algumas situações quando não há tecnologia interna suficiente, a empresa B busca a cooperação de fornecedores capacitados ou de empresas *startups* no desenvolvimento de projetos mais inovadores.

Com o objetivo de sintetizar os tópicos mais relevantes identificados no estudo de caso da empresa B, o quadro 10 apresenta os comentários dos entrevistados sobre as variáveis discutidas considerando o DPC na empresa.

Quadro 10. Principais variáveis comentadas pelos entrevistados da empresa B.

<i>Destaques</i>	<i>Comentários/Citações</i>
DPC impacta positivamente os desempenho econômico e financeiro da empresa	<i>“Adoção das práticas circulares traz benefícios financeiros perante a prática da política dos 3Rs, como por exemplo nos projetos de substituição das lâmpadas de iluminação e no projeto das placas de energia solar.”</i>

Especialistas e aplicação de ferramentas ambientais no desenvolvimento de projetos	<i>“A presença de especialistas com viés ambiental e a aplicação de estratégias circulares mostram se necessárias ao bom desempenho dos projetos.”</i>
Posicionamento e preocupação ambiental fazem parte da cultura da empresa	<i>“Houve uma situação inusitada que virou um case na empresa. Uma ave fez um ninho bem no meio de um canteiro de obras, e a equipe não removeu o ninho, isolou o local e continuou trabalhando nas proximidades, aguardando cerca de 3 semanas até os filhotes nascerem para seguir com os trabalhos.”</i>
Aspectos regulatórios direcionam a seleção de projetos	<i>“Em nossos processos de certificação, como por exemplo a ISO 14001, devemos garantir que todos os processos internos estejam alinhados com as premissas da organização, inclusive nossos fornecedores passam por análises para garantir a qualidade em toda a cadeia de suprimentos”</i>
Falta de tecnologia impacta no avanço de alguns projetos	<i>“Em algumas situações projetos foram congelados justamente pela falta de tecnologia acessível, inviabilizando a execução até que alguma tecnologia mais barata possa ser acessada.”</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Quadro 10, apesar da busca constante por aplicação da transformação digital, até mesmo em forma de cooperação, os entrevistados destacaram que, em algumas situações certos projetos foram congelados por falta de tecnologia acessível. Como exemplo, um destes casos estava relacionado a inovação na implantação do serviço de atendimento e suporte ao cliente de forma virtual *on line* por meio de cobertura de *internet* via tecnologia *Wi-Fi* e inteligência artificial, ao longo de um trecho superior a 350 km de extensão. A tecnologia disponível no momento, para o suporte e para manutenção do acesso por todo o trecho, inviabilizou o desenvolvimento devido ao custo, assim, a solução temporária adotou a implantação do serviço em espaços físicos específicos, e ainda com a consideração de atendimento pessoal.

4.3 Etapa Quantitativa

Após as análises dos dados coletados durante a realização do estudo de casos, houve uma avaliação mais ampla dos conceitos relevantes ao contexto do DPC em empresas, como a aplicação de tecnologias da indústria 4.0 e a pressão de *stakeholders* e, além do próprio desempenho das firmas em relação à adoção de estratégias circulares no desenvolvimento da produtos. Nesta etapa da pesquisa, também foram testados os constructos elaborados de I4.0 e DPC, os quais foram aplicados em 142 empresas do setor de EEE. Os resultados desta *survey* são detalhados a seguir.

4.3.1 Perfil das empresas respondentes

Quanto ao perfil das empresas, 81,7% dos respondentes as identificaram como de equipamentos eletrônicos e maquinário, 16,2% identificaram como bens de consumo, ou seja, empresas que fabricam e vendem produtos para uso direto dos compradores (no mercado *business-to-consumer*, b2c), e 2,1% responderam como outros tipos de empresas (Tabela 4).

Tabela 4. Perfil das empresas e entrevistados.

Características dos respondentes	Frequência (%)
Nº. de empregados	
< 100	48 (33.8)
Entre 100 e 500	42 (29.6)
> 500	52 (36.6)
Posição/Cargo	
Gerentes (<i>marketing</i> , vendas, produto, qualidade, outros)	44 (31.0)
Diretores e CEOs	34 (23.9)
Analistas e Assistentes (<i>marketing</i> , qualidade, outros)	25 (17.6)

Engenheiros (projetos, produtos, outros)	21 (14.8)
Coordenadores e Supervisores (P&D, qualidade, ambiental, projetos, produtos, etc.)	18 (12.7)

Setores

Equipamentos eletrônicos e maquinário	116 (81.7)
Bens de consumo	23 (16.2)
Outros	3 (2.1)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A maior parte dos respondentes foi de empresas consideradas de grande porte, acima de 500 colaboradores, 36,6% da amostra. Micro e pequenas empresas compõem 33,8% e médias empresas 29,6%. Dentre as posições dos respondentes, gerentes, diretores e CEOs representaram 54,9%, e os demais cargos, como analistas, engenheiros e coordenadores 45,1% da amostra.

4.3.2 Avaliação do modelo de medição

Durante as análises, não foram encontradas correlações maiores do que 0,70 para todos os pares de relações entre as variáveis, o que segundo Bedeian (2014) é positivo, pois representa que os dados estavam livres de colinearidade, minimizando o risco de erros. A colinearidade é normalmente associada a uma redundância (sobreposição) na informação contida em variáveis independentes (BEDEIAN, 2014).

Ainda, para apoiar essa conclusão, o fator de inflação de variância (VIF) foi calculado para cada preditor no modelo e foram encontrados valores de $VIF < 3$, os quais atendem ao limite da regra prática (consultar a Tabela 8). Cabe ressaltar que todos os itens considerados no modelo da pesquisa apresentaram níveis satisfatórios de qualidade estatística.

Para avaliar o modelo de medição no que se refere às cargas fatoriais, foi calculado a variância média extraída (AVE), *Alpha de Cronbach* (α) e a confiabilidade composta (ρ_c). A avaliação da validade convergente visou garantir que os indicadores usados identificassem a

variância do constructo, sendo avaliada por meio da carga fatorial (FL) dos indicadores (deve ser maior que 0.6) e da variância média extraída (AVE) (deve ser maior que 0.5) (RAYKOV; MARCOULIDES, 2011; BANDALOS, 2018). As Tabela 5 apresenta as estatísticas descritivas dos constructos de indústria 4.0 e *stakeholders*.

Tabela 5. Avaliação do modelo de medição para indústria 4.0 e pressão dos *stakeholders*.

<i>Indicador/Constructo</i>	<i>Código</i>	<i>Média</i>	<i>SD</i>	<i>FL</i>	<i>AVE</i>	<i>α</i>	<i>ρ_c</i>
<i>Indústria 4.0 (IND)</i>					0.596	0.861	0.897
<i>Internet das Coisas (IoT)</i>	IN1	3.908	1.363	0.844			
<i>Computação em Nuvem</i>	IN2	4.204	1.172	0.683			
<i>Big Data</i>	IN3	3.620	1.378	0.848			
<i>Impressora 3D/Manufatura Aditiva</i>	IN4	2.901	1.580	0.609			
<i>Simulação/Realidade aumentada</i>	IN5	3.021	1.465	0.754			
<i>Inteligência Artificial (AI)</i>	IN6	3.085	1.540	0.858			
<i>Pressão dos Stakeholders (STP)</i>					0.593	0.864	0.897
<i>Mercado Consumidor</i>	ST1	3.486	1.167	0.728			
<i>Governo Federal</i>	ST2	3.930	1.179	0.778			
<i>Regulamentações Regionais</i>	ST3	3.880	1.154	0.741			
<i>Empregados</i>	ST4	3.824	1.134	0.790			
<i>Alta Administração/Investidores</i>	ST5	4.056	1.040	0.717			
<i>Cadeia de Suprimentos/Fornecedores</i>	ST6	3.739	1.092	0.858			

FL: carga fatorial; SD: desvio padrão; AVE = variância média extraída; *α*: *alpha de cronbach's*;

ρ_c: Confiabilidade composta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação da confiabilidade dos constructos teve como intuito analisar a homogeneidade dos indicadores e foi verificada por meio dos valores de *Alpha de Cronbach* (devem ser maiores que 0.7) (VAZQUEZ-BRUST; LISTON-HEYES, 2010; HENSELER et al., 2017; LATAN; NOONAN, 2017). A Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas dos constructos DPC, desempenho ambiental e desempenho de mercado.

Tabela 6. Avaliação do modelo para DPC, desempenhos ambiental e de mercado.

<i>Indicador/Constructo</i>	<i>Código</i>	<i>Média</i>	<i>SD</i>	<i>FL</i>	<i>AVE</i>	<i>α</i>	<i>ρ_c</i>
<i>Desenvolvimento de Produto Circular (CPD)</i>					0.500	0.880	0.902
<i>Design para reciclagem</i>	CD1	4.099	0.922	0.700			
<i>Design para reutilização de componentes</i>	CD2	4.169	0.847	0.659			
<i>Design para remanufatura</i>	CD3	4.042	0.978	0.703			
<i>Design para fácil manutenção</i>	CD4	4.218	0.965	0.663			
<i>Design para fácil desmontagem</i>	CD5	4.155	0.842	0.674			
<i>Design para fácil recondicionamento</i>	CD6	3.845	0.898	0.757			
<i>Design emocional e atrativo</i>	CD7	4.106	0.998	0.710			
<i>Design para atualização</i>	CD8	4.225	0.937	0.676			
<i>Design para Sistema Produto-Serviço (PSS)</i>	CD9	4.310	1.022	0.715			
<i>Design para múltiplos ciclos</i>	CD10	4.113	1.042	0.653			
<i>Desempenho Ambiental (EPR)</i>					0.615	0.847	0.888
<i>Redução de emissões atmosféricas</i>	EP1	3.944	1.053	0.815			
<i>Consumo reduzido de água e energia</i>	EP2	4.352	0.743	0.836			
<i>Redução de geração de resíduos sólidos</i>	EP3	4.218	0.840	0.839			
<i>Consumo reduzido de materiais perigosos</i>	EP4	4.261	0.845	0.753			
<i>Melhora geral da situação ambiental</i>	EP5	4.408	0.789	0.663			
<i>Desempenho de Mercado (MPR)</i>					0.613	0.841	0.887
<i>Aumento na participação de mercado</i>	MP1	4.197	0.833	0.783			
<i>Abertura de novos mercados</i>	MP2	4.444	0.666	0.685			
<i>Melhoria da imagem e reputação</i>	MP3	4.479	0.647	0.809			
<i>Aumento da lucratividade</i>	MP4	4.141	0.924	0.777			
<i>Aumento da competitividade</i>	MP5	4.303	0.814	0.850			

FL: carga fatorial; SD: desvio padrão; AVE = variância média extraída; α : *alpha de cronbach's*;

ρ_c : Confiabilidade composta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de cargas fatoriais obtidos foram respectivamente > 0.7 para cada indicador e $AVE > 0.5$, em linha com o limite recomendado para manutenção da validade convergente (GARSON, 2016; HAIR et al. 2017; RAMLI et al. 2018). Embora alguns indicadores tenham produzido valores ligeiramente menores, ainda é aceitável para fortalecer a validade de conteúdo (BANDALOS, 2018). Ainda, os valores de α e ρ_c foram ambos superiores a 0.70, atendendo aos requisitos de confiabilidade da consistência interna (HAIR et al. 2017; LATAN et al. 2020; NUNNALLY; BERNSTEIN, 1994). Finalmente, para o

índice de qualidade de ajuste (GoF) do modelo CCA, os seguintes valores foram obtidos: raiz quadrada média residual padronizada (SRMR) = 0,077 > 0,08 e índice de ajuste normatizado (NFI) = 0,923 > 0,90, o que indica que o modelo CCA aplicado foi adequado (SCHUBERTH et al., 2018).

Além da validade convergente, a validade discriminante foi avaliada por meio do critério de *Fornell-Lacker*, comparando a raiz quadrada do AVE com a correlação entre as variáveis latentes, e a relação *Hetero-Trait-Mono-Trait* (HTMT). A aplicação destas duas abordagens ocorreu a fim de garantir que não houvesse correlação entre os indicadores dos constructos. A regra para avaliar a validade discriminante é que a raiz quadrada da AVE deve ser maior que a correlação entre os constructos e a relação HTMT deve ser < 0.90 para todos os constructos no modelo (VOORHEES et al., 2016; HENSELER et al., 2017). Os resultados destas análises podem ser encontrados na Tabela 7.

Tabela 7. Avaliação da validade discriminante e correlações.

<i>Constructo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>CPD</i>	(0.692)	0.310**	0.564**	0.304**	0.333**
<i>EPR</i>	0.350 [0.475;223]	(0.784)	0.219**	0.368**	0.538**
<i>IND</i>	0.647 [0.745;535]	0.261 [0.350;106]	(0.772)	0.265**	0.220**
<i>MPR</i>	0.359 [0.497;221]	0.436 [0.549;309]	0.336 [0.456;208]	(0.783)	0.300**
<i>STP</i>	0.379 [0.501;250]	0.621 [0.720;510]	0.257 [0.374;144]	0.364 [0.499;225]	(0.770)

Os colchetes mostram os limites superiores e inferiores dos intervalos de confiança de 95% BCa. Os elementos diagonais e em negrito são as raízes quadradas do AVE (variância média extraída). Abaixo da diagonal estão os valores HTMT. Acima da diagonal estão as correlações entre o constructo.

** A correlação é significativa no nível 0,01 (bicaudal).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 apresenta a correlação entre as variáveis, na qual os valores de HTMT gerados abaixo da linha diagonal são menores que 0.85, indicando que foi estabelecida validade discriminante. Ainda, a linha diagonal mostra a raiz quadrada do AVE maior do que

a correlação entre as variáveis, ou seja, a validade discriminante foi atendida. Em segundo lugar, a razão *Hetero-Trait-Mono-Trait* (HTMT) foi avaliada. Os valores HTMT maiores que 0.90 mostram a similaridade das medidas entre as variáveis, enquanto valores HTMT menores que 0.85 mostram o oposto (NUNNALLY; BERNSTEIN, 1994).

4.3.3 Avaliação do modelo estrutural

Algumas métricas básicas foram adotadas a fim de avaliar os modelos estruturais e parâmetros relacionados, sendo que é importante ressaltar que para o coeficiente do caminho (β) e sua significância, os valores próximos de 1 indicam um relacionamento positivo forte. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar o poder preditivo do modelo da pesquisa, nos quais valores entre 0.25 e 0.50 são considerados altos (HAIR JR et al., 2016).

O tamanho do efeito (f^2) é aplicado para analisar a relevância de um constructo na explicação de outro determinado constructo, sendo os valores de 0.02, 0.15 e 0.35 classificados, respectivamente, como categoria pequena, média e grande (HAIR JR et al., 2016). Ainda a relevância preditiva (Q^2) foi aplicada para indicar o quão bem o modelo poderia prever os valores originalmente observados, devendo ter valores > 0 (HAIR JR et al., 2016).

Nesse sentido, o coeficiente de determinação (R^2) foi aplicado em cada variável dependente e o tamanho do efeito (f^2) aplicado para cada preditor no modelo. Na Tabela 8, os valores de R^2 obtidos para as variáveis dependentes no modelo proposto foram de 0.136 a 0.417, o que de acordo com Hair et al. (2017), esses valores se enquadram nas categorias de grande porte. Em relação à magnitude da variância da contribuição, os valores de f^2 obtidos foram de 0.088 a 0.497 conforme mostrado na Tabela 8.

Com base em Garson (2016) e Hair et al. (2017), os valores de f^2 estão incluídos nas categorias de pequeno para grande porte. Por fim, os valores de relevância preditiva (Q^2) foram obtidos por meio do procedimento *blindfolding* para cada variável dependente no modelo que é maior que 0. Os resultados de Q^2 indicam que o modelo PLS foi adequado para as análises desta pesquisa (LATAN et al., 2018).

Tabela 8. Avaliação do modelo estrutural.

<i>Constructo</i>	<i>R²</i>	<i>Adj. R²</i>	<i>f²</i>	<i>Q²</i>	<i>VIF</i>
<i>Indústria 4.0 (IND)</i>	–	–	0.497	–	1.052
<i>Pressão dos Stakeholders (STP)</i>	–	–	0.089	–	1.052
<i>Desenvolvimento de Produto Circular (CPD)</i>	0.417	0.408	0.088	0.173	1.059
<i>Environmental Performance (EPR)</i>	0.136	0.110	0.118	0.068	1.157
<i>Market Performance (MPR)</i>	0.213	0.184	–	0.114	–

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Modelo conceitual e o teste de hipóteses

Após a definição do modelo conceitual, o diagrama de caminhos representa uma ilustração gráfica dos constructos e seus indicadores, bem como de suas relações. Os constructos são representados por círculos e as setas indicam as relações e hipóteses entre os mesmos. Por fim, os indicadores de cada constructo são representados por retângulos. As setas do diagrama indicam que o modelo adotado nesta pesquisa é reflexivo, pois as setas saem dos constructos em direção aos indicadores, representando assim que o constructo causa a mensuração dos indicadores e não o oposto (HAIR JR et al., 2016).

As hipóteses foram testadas por meio do estimador simultâneo OLS, a fim encontrar o melhor ajuste para o conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. Para verificar se as hipóteses levantadas foram ou não suportadas, observou-se o sinal do coeficiente de caminho (β) e o intervalo de confiança (IC) *bootstrap* de 95%, por meio dos valores de p nas relações entre variáveis. A Figura 8 ilustra o modelo de pesquisa com as informações dos testes das variáveis adotadas. No geral, todas as hipóteses sobre a relação entre as variáveis foram confirmadas, conforme apresentado na Tabela 9.

Na relação entre IND>CPD, STP>CPD e CPD>EPR foram encontrados efeitos positivos e significativos com valores de beta (β) de 0.552, 0.233 e 0.283, respectivamente e significativo em $p < 0.01$ em IC de 95%. Portanto, H1, H2 e H3 foram confirmadas. Para a relação entre CDP>MPR e EPR>MPR, encontrou-se um efeito positivo e significativo com valores de beta (β) de 0.200 e 0.328, respectivamente, e significância com $p < 0.05$ em IC de 95%. Assim, H4 e H5 também foram confirmadas. A Figura 8 apresenta as medidas do modelo estrutural e relações entre os constructos avaliadas.

Tabela 9. Testes das hipóteses.

<i>Caminho estrutural</i>	<i>Coef. (β)</i>	<i>S.D.</i>	<i>p value</i>	<i>95% BCa CI</i>	<i>Conclusão</i>
IND $\rightarrow$ CPD	0.552	0.066	0.000**	(0.645; 0.421)**	H1 confirmada
STP $\rightarrow$ CPD	0.233	0.072	0.001**	(0.341; 0.109)**	H2 confirmada
CPD $\rightarrow$ EPR	0.283	0.090	0.001**	(0.416; 0.117)**	H3 confirmada
CPD $\rightarrow$ MPR	0.200	0.086	0.010**	(0.328; 0.144)**	H4 confirmada
EPR $\rightarrow$ MPR	0.328	0.078	0.000**	(0.441; 0.181)**	H5 confirmada

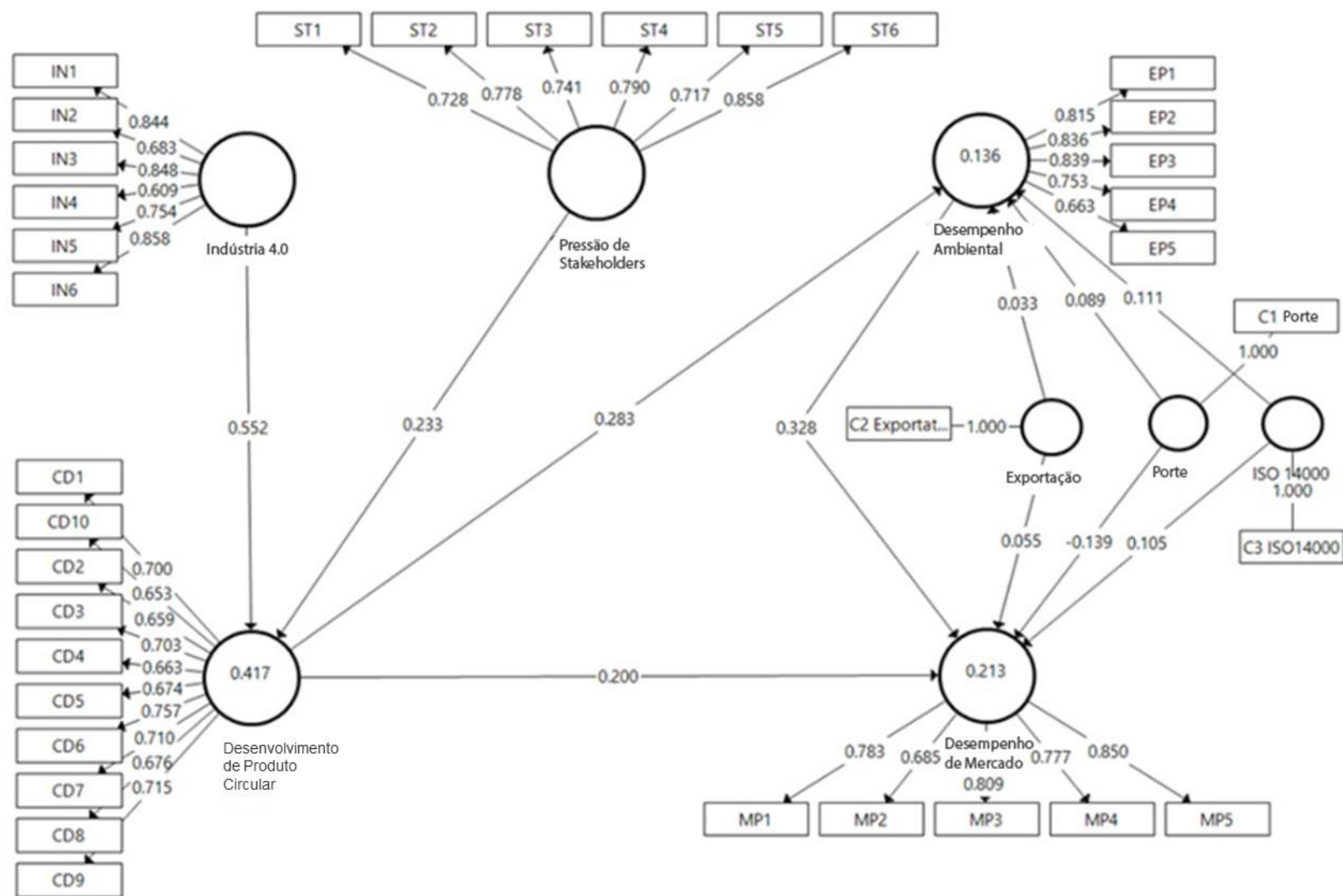
**, * estatisticamente significativo nos níveis de 1 por cento e 5 por cento, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores encontrados, de modo geral, podemos constatar que:

- O maior coeficiente de caminho encontrado entre os constructos foi para relação Indústria 4.0 (IND) > Desenvolvimento de Produto Circular (DPC), com valor de beta (β) 0.552.
- Os indicadores com maior carga fatorial, apresentando a maior relevância em cada um dos constructos, foram:
 - a. Indústria 4.0: 'IN6' – Inteligência artificial (FL=0.858)
 - b. *Stakeholders*: 'ST6' – Cadeia de Suprimentos/Fornecedores (FL=0.858)
 - c. DPC: 'CD6' – Facilidade de reconstrução/recondicionamento (FL=0.757)
 - d. Desempenho ambiental: "EP3 – Redução de resíduos sólidos (FL=0.839)
 - e. Desempenho de mercado: "MP5 – Competitividade (FL=0.850)
- Todas as relações entre os constructos foram significantes com valores entre 0.200 e 0.553, sendo esta última relação encontrada entre Indústria 4.0 e DPC.
- As variáveis de controle (Porte, Exportação e ISO14001) não apresentaram efeito significativo, com valores muito próximos de zero para o desempenho ambiental e de mercado.

Figura 8. Medidas do modelo estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.5 Verificações de robustez

A fim de garantir a robustez dos resultados, optou-se por realizar o teste de viés de endogeneidade, por meio do teste de *Heckman* com a ajuda do programa *Stata 16.0*, e verificou-se que não foram encontrados vieses de endogeneidade, incluindo causalidade inversa, viés de seleção de amostra e variáveis omitidas (PEEL, 2018). Conforme apresentado na Tabela 10, também não foram encontradas diferenças significativas nas várias combinações de cada relação no modelo após serem controladas por outras variáveis. Esses resultados confirmam que os principais achados estão livres de viés de endogeneidade.

Tabela 10. Avaliação do viés de endogeneidade por meio do teste de Heckman.

<i>Teste</i>	<i>Coef. (β)</i>	<i>S.D.</i>	<i>z</i>	<i>95% BCa CI</i>	<i>Conclusão</i>
<i>IND</i> $\rightarrow$ <i>CPD</i> (<i>Seleção DV = EPR; IV = STP</i>)	0.563	0.069	8.13**	(0.427; 0.699)**	Ausência
<i>STP</i> $\rightarrow$ <i>CPD</i> (<i>Seleção DV = MPR; IV = IND</i>)	0.417	0.099	4.20**	(0.222; 0.611)**	Ausência
<i>CPD</i> $\rightarrow$ <i>EPR</i> (<i>Seleção DV = MPR; IV = STP</i>)	0.159	0.041	3.89**	(0.079; 0.240)**	Ausência
<i>CPD</i> $\rightarrow$ <i>MPR</i> (<i>Seleção DV = EPR; IV = IND</i>)	0.142	0.037	3.80**	(0.068; 0.215)**	Ausência
<i>EPR</i> $\rightarrow$ <i>MPR</i> (<i>Seleção DV = CDP; IV = STP</i>)	0.335	0.071	4.72**	(0.196; 0.474)**	Ausência

DV são variáveis dependentes, IV são variáveis independentes **, * estatisticamente significativo nos níveis de 1 por cento e 5 por cento, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O potencial das relações de não linearidade entre as variáveis também foi avaliado. Como o PLS geralmente assume uma combinação linear entre as variáveis (GARSON, 2016), o padrão de não linearidade (por exemplo, efeito quadrático) foi considerado ausente. Para testar a existência desse padrão de não linearidade, foi aplicado o teste de erro de especificação de regressão de Ramsey (RESET) (WOOLDRIDGE, 2020). Com base no teste de *Ramsey*, a tabela Tabela 11 apresenta os valores de $p > 0,05$ encontrados para todas as

relações avaliadas. Desta forma, entende-se que o modelo foi especificado corretamente (LATAN et al., 2020; WOOLDRIDGE, 2020).

Tabela 11. Avaliação de efeitos não lineares.

<i>Caminho estrutural</i>	<i>Coef. (β)</i>	<i>S.D.</i>	<i>p value</i>	<i>f²</i>	<i>Regressão de Ramsey (RESET)</i>
<i>IND*IND → CPD</i>	0.124	0.182	0.248 ^{n.s}	0.021	
<i>STP*STP → CPD</i>	0.062	0.161	0.351 ^{n.s}	0.007	$F(1.423) = 0.157, p = 0.184$
<i>CPD*CPD → EPR</i>	0.076	0.052	0.133 ^{n.s}	0.009	$F(1.582) = 0.126, p = 0.135$
<i>CPD*CPD → MPR</i>	0.091	0.111	0.207 ^{n.s}	0.012	$F(1.026) = 0.294, p = 0.234$
<i>EPE*EPR → MPR</i>	0.114	0.106	0.141 ^{n.s}	0.021	

^{n.s} não é significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, uma estimativa de mistura finita (FIMIX) foi aplicada para testar a heterogeneidade não observada (SARSTEDT et al., 2017). Para garantir que esse viés não ocorresse neste estudo, o índice GoF foi avaliado para as comparações dos modelos. Na Tabela 12, foram obtidos o critério de informação de Akaike modificado com o fator 4 (AIC4) e o critério de informação de Akaike consistente (CAIC) caindo no mesmo número de segmentos ($k = 1$), o que indica que esse viés estava ausente.

Para reforçar este achado, o critério de Hannan Quinn (HQ), o critério de informação Bayesiano (BIC), e o comprimento mínimo de descrição com fator 5 (MDL5) foram examinados, os quais geralmente funcionam melhor para determinar o número de segmentos. Estes resultados indicam que não há diferença entre eles, o que também pode confirmar a conclusão anterior.

Tabela 12. Avaliação da heterogeneidade não observada usando o método FIMIX.

<i>Critérios</i>	<i>Number of segments</i>		
	k = 1	k = 2	k = 3
<i>Critério de informação de Akaike (AIC)</i>	1105.63	1090.07	1071.44
<i>AIC modificado com fator 3 (AIC3)</i>	1119.63	1119.07	1115.44
<i>AIC modificado com fator 4 (AIC4)</i>	1133.63	1148.07	1159.44
<i>Critérios de informação bayesiana (BIC)</i>	1147.01	1175.78	1201.50
<i>AIC consistente (CAIC)</i>	1161.01	1204.78	1245.50
<i>Critério de Hannan Quinn (HQ)</i>	1122.45	1124.90	1124.29
<i>Comprimento mínimo da descrição com fator 5 (MDL5)</i>	1424.54	1750.66	2073.72
<i>Probabilidade de log (LnL)</i>	-538.816	-516.033	-491.720
<i>Estatística de entropia (EN)</i>	n/a	0.499	0.670
<i>Índice não fuzzy (NFI)</i>	n/a	0.567	0.677
<i>Critério de entropia normalizada (NEC)</i>	n/a	71.180	46.792

n/a: não disponível; os números em negrito indicam o melhor resultado por critério de retenção de segmento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O próximo capítulo, discussões, apresentada o enfrentamento dos achados da etapa de campo e dos resultados da pesquisa quantitativa com a literatura revisada. Em seguida, no sexto capítulo serão apresentadas as conclusões desta tese, com as contribuições para a literatura, prática e propostas para futuras pesquisas.

5 DISCUSSÕES

5.1 Panorama Geral do DPC

Inicialmente, avaliando os resultados da revisão sistemática da literatura, é possível observar que o DPC representa um campo emergente de pesquisa, uma vez que os artigos têm sido publicados com maior frequência desde 2017. Este fato também poderia justificar a predominância dos estudos qualitativos sobre o tema, ou seja, seus conceitos iniciais ainda estão sendo explorados e as pesquisas aplicadas com procedimentos qualitativos buscam investigar situações nas quais as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidas (YIN, 2003).

Ainda, no panorama de publicações, pode-se notar que grande parte das pesquisas focam, principalmente, os países desenvolvidos da Europa, o que pode significar um avanço desta região geográfica em relação aos demais países, e estar associado à relevância do papel institucional com foco em EC e DPC no continente europeu (EMF, 2015; SHABAHZI et al., 2020). Todavia, é importante destacar a contribuição do Brasil, sendo o único país em desenvolvimento que tem direcionado foco a este tema (Figura 7).

Em relação aos periódicos nos quais os artigos analisados foram publicados e ao impacto da pesquisa, o *Journal of Cleaner Production* (JCP) destaca-se como fonte da maioria das publicações. Este resultado pode ser relevante a acadêmicos e práticos que desejam obter maior conteúdo sobre o tema DPC e operações sustentáveis. Embora o JCP possua mais de 30% do total das publicações, o artigo com o maior impacto medido por meio do número de citações na base de dados *Scopus* é o trabalho de Bocken et al. (2016), publicado pelo *Journal of Industrial and Production Engineering*, apresentando quase o dobro de citações do segundo artigo, de Bakker et al. (2014), este publicado pelo JCP.

A relevância dada a Bocken et al. (2016) tem relação direta com um dos pilares delineado para a revisão desta tese, no que refere-se às estratégias de *design* identificadas como uma das principais formas para a aplicação do DPC. As principais abordagens dos autores estão relacionadas às estratégias de *design* para a redução e para o fechamento dos ciclos de recursos (BOCKEN et al., 2016). Neste sentido, entendendo que a transição de modelos lineares para circulares requer, no desenvolvimento de produtos, a adoção das abordagens '*Design for X*' (SASSANELLI et al., 2020), os resultados desta etapa da tese podem contribuir com o conhecimento em EC, uma vez que apresenta quais abordagens tem sido mais frequentemente pesquisadas e possivelmente mais aplicadas ao DPC.

Com o objetivo de sintetizar os achados da dimensão 'Panorama da Literatura' avaliada na revisão teórica sistemática, o Quadro 11 apresenta os destaques e a frequência total em percentual de representatividade de cada item analisado.

Quadro 11. Destaques da revisão sistemática na dimensão panorama da literatura.

<i>Panorama da Literatura</i>	Destaques	Frequência total %
<i>Ano</i>	2019	31
<i>Periódico</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	31
<i>Continente</i>	Europa	82
<i>Abordagem metodológica</i>	Qualitativa	65
<i>Método de pesquisa</i>	Estudo de caso	21
<i>Impacto da pesquisa</i>	Bocken et al. (2016)	43 ¹

¹Comparado aos 5 artigos com maior número de citações, conforme Quadro 2.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se analisar o Quadro 11, observa-se que 31% do total das publicações ocorreram no ano de 2019, considerando que a pesquisa à base de dados *Scopus* foi finalizada no mês

de julho de 2020. O JCP contém 31% dos artigos relacionados ao tema pesquisado e o continente europeu detém o expressivo número de 82% das publicações. A pesquisa de abordagem qualitativa e o método estudo de caso são o mais aplicados, com 65% e 21% respectivamente, e o trabalho de Bocken et al. (2016) apresenta 43% das citações, comparado aos 5 artigos mais citados pela base *Scopus* no recorte de Julho de 2020.

5.2 Discussão Integrada dos Resultados

5.2.1 Estratégias de design (DfX)

Os achados desta pesquisa também revelaram que as estratégias de *design* para reciclagem, facilidade de manutenção e reparo, PSS, desmontagem, reutilização, durabilidade, e remanufatura são as mais discutidas na literatura da área. Além do destaque para estas estratégias, também pode ser observado que novas abordagens são propostas no campo do DPC, como o ‘*design* para atualização²’ (SINCLAIR et al., 2018; SELVEFORS et al., 2019; SUMTER et al., 2020), o ‘*design* atrativo e para durabilidade emocional’, o ‘*design* para múltiplos ciclos’ e o ‘*design* para eficiência energética (por exemplo, HAINES-GADD et al., 2018; MENDOZA et al., 2017; MESTRE; COOPER, 2017; SASSANELLI et al., 2020; SHAHBAZI; JÖNBRINK, 2020).

Neste sentido, as análises da etapa empírica desta tese mostram que as estratégias mais comumente adotadas na empresa A, com foco em biodiversidade, estão alinhadas à literatura da área, principalmente com foco no reaproveitamento e processos de reuso, relacionados ao ‘*design* para biodegradabilidade’ (BOCKEN et al., 2016; MESA et al., 2018), ‘*design* para reutilização’ (SINGH; ORDOÑEZ; 2016; MENDOZA et al., 2017), e

² *Design for updating* (termo original do inglês)

‘*design* para reaproveitamento’ (SHAHBAZI; JÖNBRINK, 2020), uma vez que todos os resíduos são considerados no desenvolvimento de novos projetos.

Como sugerido pelo diretor executivo da empresa, a decisão de aplicação destas estratégias é refletida pelo consumo da madeira de reflorestamento como insumo principal de seus produtos. Neste caso, não há desperdício em seu processo produtivo, e mesmo após o uso, quando em estado de decomposição, não gera impactos ao meio ambiente (BOCKEN et al., 2018). Esta prática também está alinhada com a prevenção da emissão de CO₂ e uso de biomateriais (BONVIU, 2014; BROOK; PAGNANELLI, 2014), além de ser um sistema regenerativo em que o fluxo de recursos e seus resíduos, emissões e energia são minimizados, alcançado por meio das estratégias de *design* adotadas (GEISSDOERFER et al., 2016).

No caso avaliado na empresa B, que tem atuação na área de infraestrutura, a seleção para desenvolvimentos parte principalmente de estratégias de ‘*design* para eficiência energética’ (MESTRE; COOPER, 2017), ‘*design* para durabilidade e longevidade’ (MENDOZA et al., 2017; SASSANELLI et al., 2020), ‘*design* para redução’ (SUBRAMANIAN et al., 2018; KOSZEWSKA; BIELECKI, 2020), e ‘*design* para sistema produto-serviço’ (ACKERMANN, 2018; KADDOURA et al., 2019; FERNANDES et al., 2020; JUGEND et al., 2020).

Conforme apontado pelos entrevistados da empresa, os projetos com a aplicação das estratégias de *design* identificadas, apresentadas no parágrafo anterior, tem favorecido o cumprimento dos objetivos de operação sustentável da empresa, uma vez que tanto a durabilidade física dos produtos, quanto aspectos de otimização de recursos por meio de soluções mais tecnológicas são adotados. Em concordância, a literatura tem apontado que projetos para longos ciclos de vida do produto (FRANCO, 2019), e a preocupação em prolongar o ciclo de vida de seus componentes (MENDOZA et al., 2017; SINCLAIR et al.,

2018; KADDOURA et al., 2019) são centrais no DPC e têm um direcionamento relevante associado à desaceleração dos ciclos dos recursos (MENDOZA et al., 2017).

A adoção destes princípios associados ao uso prolongado (HALSTENBERG et al., 2019), também inclui a escolha por materiais duráveis (SIHVONEN; PARTANEN, 2018), entretanto, algumas estratégias como por exemplo de durabilidade emocional dos produtos, favorecida pelo *design* atrativo (DEN HOLLANDER et al., 2017; HAINES-GADD et al., 2018; SELVEFORS et al., 2019), não apresentam sinergia devido ao setor de operação das empresas A e B, podendo estar mais relacionada à outros setores, como ambientes de produtos eletroeletrônicos, automotivos, etc.

Importante ressaltar que a estratégia com maior frequência encontrada na literatura, *design* para reciclagem, não foi destacada pelas empresas do estudo de casos. Pode-se compreender que devido às demais estratégias adotadas na empresa A, considerando principalmente a utilização da madeira como insumo principal, a previsão de reciclagem dos produtos é suplantada por fatores como biodegradabilidade, reutilização ou reaproveitamento. No caso B, devido ao contexto de desenvolvimento para própria utilização, a empresa é responsável por todo o ciclo de vida dos produtos, desta forma atua com maior foco em eficiência, durabilidade e longevidade, redução e oferta de serviços.

Considerando ainda a variedade de estratégias DfX presentes na literatura, a execução da etapa quantitativa desta pesquisa resultou em uma das principais contribuições desta tese, o teste e validação do constructo DPC. Por se tratar de um campo emergente de pesquisa, durante a revisão sistemática realizada, propostas de constructos DPC não foram encontradas na literatura, assim, baseado na seleção das principais práticas encontradas na literatura e na etapa empírica de estudo de casos, o constructo DPC para a pesquisa *survey* foi desenvolvido a partir das abordagens de '*design* para reciclagem, facilidade de manutenção e reparo, PSS,

desmontagem, reutilização, durabilidade, remanufatura, reconstrução/recondicionamento, durabilidade emocional, e *design* para múltiplos ciclos.

Em relação à amostra avaliada na indústria EEE, todas as variáveis testadas apresentaram carga fatorial positiva acima de 0.650, com destaque para reconstrução/recondicionamento (FL = 0.757), PSS (FL = 0.715), *design* para durabilidade emocional (FL = 0.710), remanufatura (FL = 0.703) e reciclagem (FL = 0.700). É importante notar que entre as estratégias de *design* avaliadas, o PSS apresenta maior sinergia com modelos de negócios circulares e servitização, conforme apontado por Halstenberg et al. (2019). Neste contexto, o caso da empresa B, também apresentou características alinhadas às propostas de substituição por novas tecnologias e virtualização adotadas a fim de otimizar recursos.

Estas práticas também são apontadas como alternativa para prolongar o uso de produtos por meio de serviços de aluguel entre outros (STEWARTA; NIERO, 2018). A servitização cresceu com a intensificação do uso da *internet*, da tecnologia da informação e da adoção de aplicativos móveis (MCALOONE; PIGOSSO, 2017). Estas alternativas que envolvem a servitização muitas vezes dependem do apoio de esforços de tecnologias da indústria 4.0, as quais já foram recomendadas por alguns estudos de DPC (LI, 2018; HALSTENBERG et al., 2019; JABBOUR et al., 2020), incluindo a aplicação de manufatura aditiva (SAUERWEIN et al., 2019), e no desenvolvimento de produtos e serviços inteligentes (HALSTENBERG et al., 2019).

Assim, com o objetivo de sintetizar os achados da dimensão DfX, considerando a integração dos resultados desta pesquisa, o Quadro 12 apresenta os destaques por etapa, bem como as estratégias comuns considerando todo o conteúdo desta pesquisa.

Quadro 12. Destaques da dimensão estratégias de *design* (DfX).

Etapa da Pesquisa		Destaques	Similaridades
Revisão Sistemática		Reciclagem, reutilização, desmontagem, durabilidade, facilidade de manutenção/reparo, remanufatura, atualizações, PSS	<i>Design</i> para PSS
Estudo de Caso Biodiversidade		Biodegradabilidade, reutilização, reaproveitamento	<i>Design</i> para reciclagem
Estudo de Caso Infraestrutura		Eficiência energética, durabilidade/longevidade, redução, PSS	<i>Design</i> para reutilização
Pesquisa Survey Eletroeletrônicos		Reconstrução/recondicionamento, PSS, <i>design</i> emocional/atraente, remanufatura, reciclagem	<i>Design</i> para remanufatura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se analisar o Quadro 12, nota-se que a estratégia para PSS é a mais comum entre achados dos três métodos aplicados nesta pesquisa, recebendo destaque tanto na revisão sistemática, quanto na etapa empírica de estudo de caso de infraestrutura (B), e na pesquisa quantitativa. *Design* para reciclagem e *design* para remanufatura apresentaram relevância na literatura revisada e na *survey*, e *design* para reutilização na literatura e no caso de biodiversidade.

5.2.2 Tecnologias da indústria 4.0

No contexto da interação das tecnologias da indústria 4.0 no DPC, esta pesquisa buscou identificar as tecnologias apontadas como relevantes nos artigos revisados. Como pode ser observado no Gráfico 5 desta tese, IoT, manufatura aditiva e AI apareceram com maior frequência na literatura de DPC. O desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de automação, como AI, IoT e a impressão 3D já haviam sido apontadas por aprimorar a

eficiência operacional nas empresas (DESPEISSE et al., 2017), o que é alinhado aos princípios da EC, uma vez que a combinação destas tecnologias pode oferecer melhorias substanciais às organizações (EMF, 2019).

Na etapa empírica desta pesquisa, especificamente AI foi destacada em grande parte dos projetos conduzidos pela empresa B, presente por exemplo, na aplicação de *'smart products'* (HALSTENBERG et al., 2019), prática suportada pela literatura e também relevante na etapa da pesquisa quantitativa. Em relação ao constructo indústria 4.0 testado na *survey*, houve confirmação da hipótese levantada (H1), sendo que a aplicação da AI apresentou-se como a tecnologia mais relevante do constructo, com carga fatorial de 0.858. Isso pode ser explicado uma vez que a AI tem sido amplamente usada para aumentar a eficiência em sistemas de produção (MAYR et al., 2018; PHAM et al., 2019).

Além de agregar novos achados à literatura de PDP, e também em gestão da inovação, este resultado está alinhado com estudos prévios voltados à EC (JABBOUR et al., 2019; NOBRE; TAVARES, 2019; ROSA et al., 2020), os quais apontaram que a adoção destas emergentes tecnologias podem contribuir para a integração de práticas de circularidade em empresas. Além disso, como a consultoria *Ellen MacArthur Foundation* recomenda, a AI pode acelerar a transição para um EC em escala, oferecendo melhorias substanciais em áreas como projeto de produto, operações e otimização de infraestrutura (EMF, 2019).

Big data e IoT também se mostraram como aspectos relevantes na *survey* aplicada ao setor EEE, corroborando com a literatura que frequentemente aponta a sinergia de IoT combinada com a geração de uma grande quantidade de dados (ROSA et al., 2020). A literatura também sugere a presença de *big data* como tecnologia que apresenta relação direta com DPC, sendo que associada à AI, pode encontrar padrões de comportamento e a partir dos processos de tomada de decisão otimizados, orientar em direção à sustentabilidade ambiental e circularidade (NOBRE; TAVARES, 2019; ROSA et al., 2020), uma vez que

pode automatizar tomadas de decisões baseadas na diminuição do uso e consumo de materiais, aumento de eficiência, melhora da rastreabilidade (DE SOUSA JABBOUR et al, 2018).

As tecnologias de *big data* e computação em nuvem foram identificadas na avaliação dos casos A e B, pois fazem parte da utilização de análises de tendências de mercado para a seleção de portfólio e atuam na aplicação dos sistemas de gestão operacional dos produtos e serviços oferecidos, respectivamente. Em relação à literatura, a computação em nuvem e sistemas ciberfísicos também foram apontados nos artigos revisados (ÁVILA-GUTIÉRREZ et al., 2019; HALSTENBERG et al., 2019; JABBOUR et al., 2019).

Um achado interessante deste pilar da revisão, é que não foram encontrados trabalhos direcionados a projetos de realidade aumentada e virtual, simulação ou virtualização da produção, entre outros, tampouco estas tecnologias foram destacadas nas empresas as quais participaram do estudo de casos. Estas tecnologias são apontadas como relevantes para a literatura relacionada à área de indústria 4.0 (ÁVILA-GUTIÉRREZ et al., 2019; BOLOGA et al., 2017), além de propostas na ação ‘Virtualizar’ do *framework* ReSOLVE de *Ellen MacArthur Foundation* (EMF, 2015).

Nas análises dos resultados do segundo caso estudado (infraestrutura), nota-se ainda que a virtualização destaca-se como uma das estratégias mais relevantes no atingimento dos objetivos de sustentabilidade da empresa, por exemplo para o desenvolvimento do projeto de serviço de atendimento e suporte ao cliente de forma digital. Neste contexto, os resultados da pesquisa *survey* também apontaram relação positiva para a variável simulação e realidade aumentada/virtual com carga fatorial de 0.754, superior inclusive à carga encontrada para a tecnologia da computação em nuvem (0.683).

Apesar de obter destaque na literatura de DPC, manufatura aditiva/impressora 3D parece ser a tecnologia menos aplicada entre as empresas brasileiras nos setores analisados,

visto que não foram identificadas práticas associadas no estudo de casos, e o constructo da pesquisa *survey* apresentou menor carga fatorial ($FL=0.609$). Neste caso, pode-se compreender que o acesso às tecnologias de impressoras 3D nas empresas que operam no Brasil ainda está fase incipiente. Especificamente no caso da empresa A, a adoção da manufatura aditiva poderia contribuir com o processo produtivo, uma vez que baseada na fabricação por meio de *design* digital, possibilitaria uma avaliação mais integrada e otimizada da viabilidade de projetos identificados pelas análises de mercado que ocorrem na empresa, por exemplo (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018).

A literatura de EC também tem sugerido que a dificuldade ao acesso de certas tecnologias pode limitar a adoção de práticas voltadas à circularidade (JESUS; MENDONÇA, 2018; JUGEND et al., 2020; KIRCHHERR et al., 2018), ainda, analisando-se os desafios relacionados ao DPC, os artigos revisados apontaram que a principal barreira é também relacionada às limitações tecnológicas (HOLTSTRÖM et al., 2019; URBINATI et al., 2019), e considerando o contexto avaliado nesta tese, ambos os casos confirmaram os achados teóricos.

O primeiro estudo realizado em empresa de biodiversidade revelou que a restrição tecnológica representa uma barreira à organização. Segundo os entrevistados, existem dificuldades no desenvolvimento e avanço de tecnologias para o setor madeireiro, principalmente no que se refere à geração de novos projetos de inovação no processo de desenvolvimento de novos produtos. Já na empresa de infraestrutura foi destacado que um dos projetos de desenvolvimento tecnológico foi congelado por falta de tecnologia acessível. Neste caso, mostra-se relevante que organizações tenham a capacidade de superar as barreiras com tecnologias emergentes, as quais também já foram levantadas como potenciais para a EC (por exemplo, HALSTENBERG et al. 2019; JENSEN et al., 2019; SAUERWEIN et al., 2019; SINCLAIR et al., 2018).

Com o objetivo de sintetizar os achados da dimensão ‘Tecnologias da Indústria 4.0’, considerando a integração dos resultados nas três etapas desta pesquisa, o Quadro 13 apresenta os destaques por etapa, bem como as tecnologias comuns considerando todo o conteúdo desta pesquisa.

Quadro 13. Destaques da dimensão tecnologias da indústria 4.0 na adoção do DPC.

<i>Etapa da Pesquisa</i>	<i>Destaques</i>	<i>Similaridades</i>
<i>Revisão Sistemática</i>	IoT, manufatura aditiva, AI, <i>big data</i> , computação em nuvem, sistemas ciberfísicos	<i>Big data</i> AI Computação em nuvem IoT
<i>Estudo de Caso Biodiversidade</i>	<i>Big data</i>	
<i>Estudo de Caso Infraestrutura</i>	<i>Big data</i> , computação em nuvem, AI	
<i>Pesquisa Survey Eletroeletrônicos</i>	AI, <i>big data</i> , IoT	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se examinar o Quadro 13, nota-se que a adoção de *big data* é tecnologia mais comum ao DPC, recebendo destaque tanto na revisão sistemática, quanto na etapa empírica de estudo dos casos A e B, e com segundo maior *beta* (0.848) pela avaliação do constructo indústria 4.0, conforme dados oriundos da pesquisa quantitativa. Inteligência artificial apresentou relevância na literatura revisada, no caso B, e na *survey* foi a tecnologia com maior relevância para o setor EEE (FL=0.858). Computação em nuvem e IoT também se destacaram ao menos em duas etapas desta pesquisa.

5.2.3 Pressão e relevância dos stakeholders

Conforme apresentado nos capítulos um e dois desta tese, sabe-se que no contexto da transição de um sistema de consumo linear para o modelo circular é relevante considerar a atuação dos *stakeholders* (GUPTA et al., 2019), uma vez que governos, cidades, empresas e instituições acadêmicas tem cada vez mais explorado oportunidades envolvidas na colaboração e inovação para uma EC (SIHVONEN; PARTANEN, 2016; TECCHIO et al., 2017). Considerando o cenário do DPC, percebeu-se que alguns *stakeholders* apresentam maior sinergia neste processo, como por exemplo o mercado, o governo e os atores envolvidos com a cadeia de suprimentos.

A literatura de DPC apontou para o mercado consumidor como a parte mais relevante a ser considerar na adoção das estratégias do DPC (44%). Neste caso, pode-se compreender que análises apuradas de demanda e comportamento de consumo podem ser necessárias para a tomada de decisão sobre quais estratégias de *design* devem ser estimuladas, considerando a transição do modelo linear para o circular (JABBOUR et al., 2020). Confirmando este achado na literatura, foi possível observar na prática que a empresa A realiza constantemente atividade de monitoramento de possíveis demandas de mercado, relacionada à análises de dados de mídias sociais, por meio de testes para identificar quais projetos de produtos e suas perspectivas ambientais tendem a ser mais bem aceitos pelos consumidores.

Além do mercado consumidor, aspectos de regulamentação e governamentais (TALENS PEIRÓ et al., 2017) representaram 18% da distribuição dos *stakeholders* identificados na revisão sistemática, compondo os principais atores que podem exercer maior pressão e influência ao DPC. Neste sentido, Subramanian et al. (2018) apontaram que responder às demandas de clientes sensíveis às questões ambientais e, ao mesmo tempo, requisitos e restrições legais da EC podem aumentar a complexidade de projetos de produtos,

podendo este ser um dos pontos críticos associados ao DPC (SUBRAMANIAN et al., 2018). Considerando ainda os aspectos regulatórios, os resultados obtidos com o estudo de caso B corroboram para este relevante ator, possivelmente devido a área de atuação da empresa e seu relacionamento estrito com órgãos governamentais, no setor de infraestrutura, conforme pode ser observado no Quadro 5.

Um outro aspecto observado, apontado pelos entrevistados das empresas A e B, foi o papel da cadeia de fornecimento (HEYES et al., 2018), principalmente para cumprir as premissas de qualidade e aspectos relacionados a circularidade exigidos pelas organizações. Assim, a consideração das estratégias do DPC e de sustentabilidade em geral são necessárias em diversos níveis da cadeia. Os *stakeholders* relacionados à cadeia de suprimentos também se destacam na literatura revisada como um dos principais atores, com 15% da amostra. Neste caso, a demanda por aspectos de capacidades circulares foi apontada por Holtström et al. (2019) como um dos pontos chave a serem considerados por fornecedores de insumos ou subprodutos.

Como apontado no caso A, o relacionamento com fornecedores pode influenciar o crescimento e melhoria de negócios por meio de acordos comerciais e estruturantes no setor, principalmente relacionados a logística. Além disso, a preocupação com a seleção de fornecedores devido à necessidade de qualificação nos diversos níveis é fator relevante apontado na literatura (HOLTSTRÖM et al., 2019; MARCELINO-SÁDABA; GONZÁLEZ-JAEN; PÉREZ-EZCURDIA, 2015). O posicionamento e a qualidade dos atores envolvidos nos projetos da empresa B também foram observados, devido aos processos de auditoria que a empresa participa, sendo um critério de substituição ou exclusão de fornecedores.

Ainda, a cadeia de suprimentos em uma visão geral também apresenta relação com outros *stakeholders* à jusante, identificados na revisão teórica sistemática, como por exemplo as atividades de recicladores de cooperativas, e, também, com o mercado consumidor. Neste

caso, clientes precisam estar aptos para a ideia de comprar produtos apoiando logística reversa, ou produzidos de materiais reciclados, operados geralmente pelas cooperativas e empresas especializadas na etapa de fim de vida dos produtos (KANE et al., 2018).

Os resultados da pesquisa *survey* mostraram que a pressão de *stakeholders* contribui para a adoção do DPC, confirmando a hipótese testada (H2), sendo que os ‘fornecedores’ foram considerados o *stakeholder* mais relevante no constructo avaliado (FL = 0.858) para o setor EEE. Estudos anteriores com foco em EC já haviam inclusive abordado a relevância dos avanços das cadeias de suprimentos digitais (GUPTA et al., 2019; QUEIROZ; TELLES, 2018), e os papéis e responsabilidades de cada membro da cadeia de suprimentos em relação à adoção de EC (JABBOUR et al., 2020). Além disso, a falta de informação e clareza sobre as responsabilidades de cada membro da cadeia de abastecimento pode afetar as capacidades operacionais, também aumentar o desperdício nos processos da cadeia de abastecimento (JABBOUR et al., 2020), o que poderia retroceder no propósito do DPC.

A pesquisa *survey* também revelou a relevância de empregados e colaboradores neste contexto de pressão de *stakeholders*. Este resultado encontrado na etapa empírica desta tese, sobre a expressividade da cadeia de suprimentos e dos empregados pode ser considerado um avanço para a literatura da área. Embora se esperasse que estes atores fossem importantes nas decisões organizacionais em relação ao DPC, esse achado aponta para uma relevância superior a um dos *stakeholders* mais reconhecidos na literatura de EC, o governo (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; GUPTA et al., 2019).

Ao contrário da literatura comum, inclusive representada na revisão sistemática realizada na primeira etapa desta pesquisa (Gráfico 7), os achados podem ser explicados uma vez que maior parte das políticas relacionadas à EC e ao DPC (JABBOUR et al., 2020; PINHEIRO et al., 2019) são fundamentadas na literatura seminal do continente europeu ou

asiático, e o Brasil ainda está desenvolvendo sua abordagem institucional para a EC (JABBOUR et al., 2020).

A literatura revisada também apontou que projetistas/*designers*, organizações não governamentais (ONGs), e cooperativas de reciclagem também são atores relevantes no contexto do DPC. Os *designers* estão diretamente ligados aos projetos de novos produtos (MESA et al., 2018), e a relação entre ONGs e cooperativas de reciclagens com empresas poderia ser estreitada a fim de compartilhar visões para melhores oportunidades de desmontagem e reciclagem (SIHVONEN; PARTANEN, 2016). Apesar disso, estes *stakeholders* não foram destacados durante a realização dos casos, semelhantemente ao não apontamento da estratégia *design* para reciclagem, conforme a seção 5.2.1. Pode-se compreender que este achado também esteja alinhado ao contexto do setor de operação e estratégias adotadas por ambas empresas.

Com o objetivo de sintetizar os achados da dimensão ‘*stakeholders*’, considerando a integração dos resultados nas três etapas desta pesquisa, o Quadro 14 apresenta os destaques por etapa, bem como os atores comuns considerando todo o conteúdo desta pesquisa.

Quadro 14. Destaques da dimensão *stakeholders* relacionados com o DPC.

<i>Etapas da Pesquisa</i>	Destaques	Similaridades
<i>Revisão Sistemática</i>	Mercado, governo, cadeia de suprimentos, projetistas, ONGs, cooperativas de reciclagem, acadêmicos	Governo
<i>Estudo de Caso Biodiversidade</i>	Alta administração, governo, mercado, cadeia de suprimentos	Cadeia de Suprimentos
<i>Estudo de Caso Infraestrutura</i>	Governo, cadeia de suprimentos	Mercado

<i>Pesquisa Survey Eletrônicos</i>	Cadeia de suprimentos, empregados, governo	
---	--	--

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se analisar o Quadro 14, nota-se que no contexto geral de avaliação dos resultados, tanto o governo quanto a cadeia de suprimentos são os *stakeholders* mais relevantes, recebendo destaque na revisão sistemática, na etapa empírica de estudo dos casos e na pesquisa *survey*. Ainda, o mercado consumidor apresentou grande relevância na literatura pesquisada e também no primeiro caso avaliado em empresa de biodiversidade.

5.2.4 O impacto do DPC no desempenho das firmas

A etapa quantitativa desta tese buscou compreender a relação entre a adoção do DPC e o desempenho das empresas, uma vez que, devido à falta de pesquisa empírica investigando esta dimensão, ainda não estava claro a influência do DPC no desempenho ambiental e, principalmente no desempenho de mercado de empresas. Os resultados obtidos mostram que o DPC apresenta efeito positivo tanto no desempenho ambiental, quanto no desempenho de mercado, confirmando as hipóteses H3 e H4.

A contribuição dos resultados da *survey* aponta para um papel relevante do DPC nos objetivos relacionados principalmente à redução das emissões atmosféricas, redução do consumo de água e energia e redução da geração de resíduos sólidos. Este resultado reforça estudos anteriores da área de sustentabilidade ambiental e circularidade (JABBOUR et al., 2015; RAUT et al., 2019). Dentre as variáveis que compuseram o constructo, estas foram as maiores cargas encontradas, de acordo as análises de relação entre DPC e desempenho ambiental.

Diferentemente da dimensão ambiental, a relação entre EC e desempenho de mercado tem sido um ponto controverso na literatura (LONCA et al., 2020; SUBRAMANIAN et al., 2018), e que de fato merece maiores investigações, afinal, alguns autores têm observado que o DPC pode prolongar o tempo de lançamento de um produto no mercado devido aos ajustes de *design*, onerando o custo total do projeto (JUGEND et al., 2020; SUBRAMANIAN et al., 2018). Além disso, muitos consumidores podem ter algum tipo de rejeição de compra de produtos que são compartilhados, remanufaturados ou reutilizados, por exemplo (HOLTSTRÖM et al., 2019; KIRCHHERR et al. 2018; SELVEFORS et al., 2019; HAGEJÄRD et al, 2020).

Estes foram inclusive um dos principais desafios identificados durante a etapa de revisão sistemática, relacionados às implicações econômicas e financeiras (URBINATI et al., 2019; KADDOURA et al., 2019), e, também, de comportamento do consumidor (KANE et al., 2018; HOLTSTRÖM et al., 2019). Desta forma, conforme Bech et al. (2015) e Cong et al. (2019) identificaram, o custo de entrada no mercado de produtos oriundos da adoção do DPC podem ser até 30% mais altos, sendo que a viabilidade econômica da reciclagem apresenta-se como uma barreira a ser superada também devido ao baixo retorno econômico dos produtos.

Ainda em relação ao mercado, Andrews (2015) notou que os consumidores podem ter uma crença comum de que peças remanufaturadas e materiais reciclados apresentam qualidade inferior ou podem não desejar comprar ou compartilhar produtos que já foram usados, representado também barreiras para a adoção do DPC (HOLTSTRÖM et al., 2019; SELVEFORS et al., 2019; HAGEJÄRD et al, 2020). Por outro lado, Agyemang et al. (2019) sugerem que a circularidade pode aumentar o *market share* das empresas e levar a maiores lucros por meio do aumento da competitividade e vendas globais a novos mercados.

Os resultados desta tese corroboram com este último (AGYEMANG et al., 2019), uma vez que todas as variáveis relacionadas ao desempenho de mercado apresentaram um fator positivo, sendo a melhoria da competitividade o fator mais relevante (0.850). A etapa quantitativa ainda apontou que a adoção do DPC pode melhorar o desempenho de mercado de uma empresa, gerando resultados positivos relacionados ao aumento de *market share* (FL=0.809), e melhoria da reputação e notoriedade da marca (FL=0.783).

A última hipótese testada (H5) diz respeito às relações entre o desempenho ambiental e o desempenho de mercado. Nesse sentido, Dangelico et al. (2017) e Jabbour et al. (2015) haviam destacado que um aumento no desempenho ambiental poderia fornecer uma imagem de marca positiva e aumentar a participação de mercado das empresas. No contexto do DPC, os resultados desta pesquisa reforçam o corpo teórico de conhecimento em '*green management*', apresentando evidências de que o desempenho ambiental favorece o desempenho do mercado também para empresas com foco em EC.

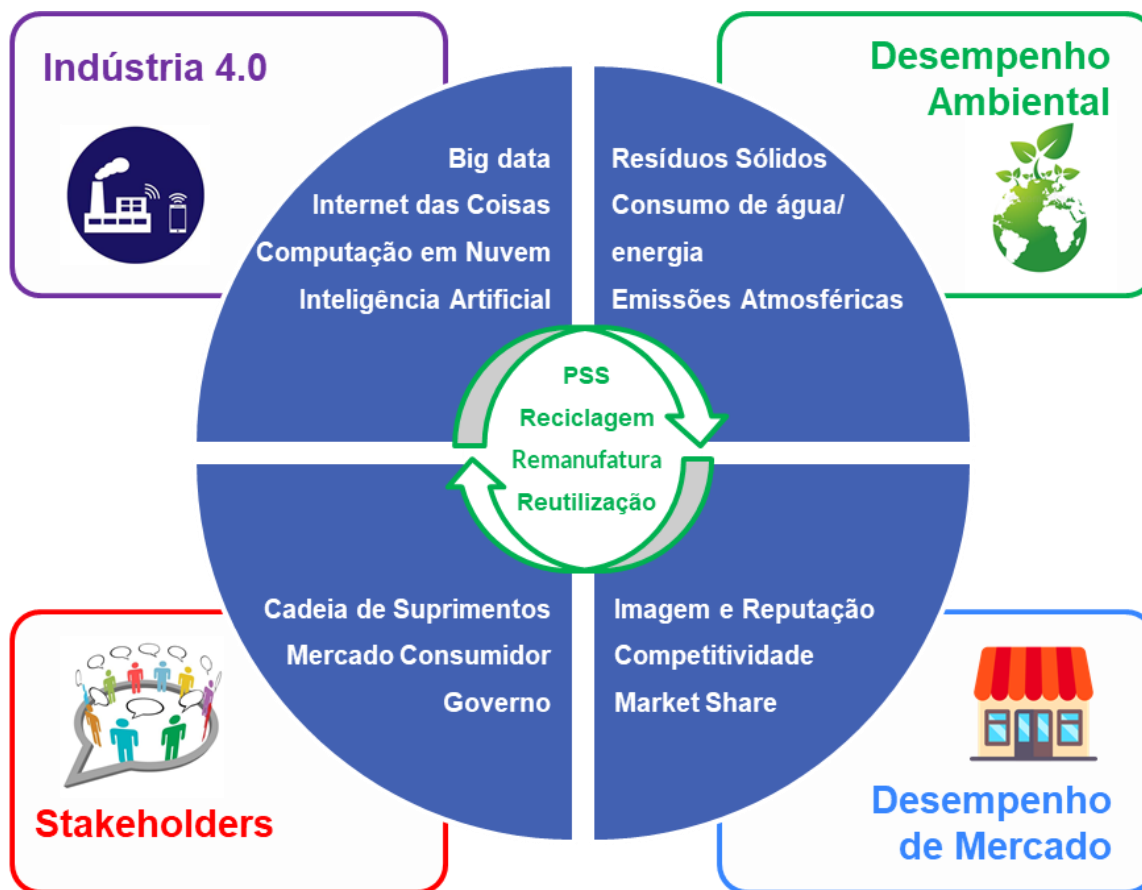
Em relação às variáveis de controle, é importante notar que o tamanho das empresas, a influência da ISO 14001 e a orientação para os mercados externos não foram significativos para a amostra aqui avaliada. Embora outros trabalhos já tenham apontado a importância da ISO 14001 e da "internacionalização da empresa" (TSAI; LIAO, 2017), o cenário de desenvolvimento de produtos brasileiro não demonstrou esta relação positiva. No entanto, no contexto de confiabilidade da pesquisa quantitativa, as variáveis de controle demonstraram-se adequadas, pois podem indicar a homogeneidade da amostra, livre de quaisquer vieses de grupo.

5.3 Framework Integrativo

Com o objetivo de sintetizar os aspectos mais relevantes identificados após as três etapas aplicadas nesta pesquisa, propõe-se um *framework* que integra os principais achados

da seção resultados, e discutidos neste capítulo. Representando o modelo de pesquisa apresentado na Figura 5, esta proposta apresenta as estratégias DfX mais frequentemente abordadas no DPC, as tecnologias emergentes que permeiam este cenário, os principais *stakeholders* a serem considerados nos projetos, ainda, os aspectos relacionados ao desempenho ambiental e de mercado que poderão sofrer maior influência devido à adoção do DPC. A Figura 9 apresenta o *framework* que integra as principais contribuições desta tese.

Figura 9. *Framework* integrativo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No centro da Figura 9, as estratégias DfX identificadas com maior representatividade foram ilustradas com uma visão de fechamento de ciclo, por meio das duas setas circulares. No quadrante superior esquerdo, podem ser observadas as principais tecnologias da indústria

4.0 identificadas nos resultados desta tese. Semelhantemente, no quadrante inferior esquerdo estão os *stakeholders* em destaque. Do lado direito da figura as medidas de desempenho avaliadas na etapa *survey*, bem como os indicadores ambientais (quadrante superior) e de mercado (quadrante inferior) estão listados.

O *framework* proposto permite uma visão geral das principais dimensões que compõem o cenário do DPC encontrado nesta pesquisa de doutorado, podendo ser útil a acadêmicos e profissionais, uma vez que:

- Sumariza os aspectos em destaque dos constructos avaliados em empresas dos setores de biodiversidade, infraestrutura e EEE, no contexto brasileiro.
- Apresenta o conjunto relevante de estratégias de *design*, tais como PSS, *design* para reciclagem, *design* para reutilização, e *design* para remanufatura.
- Destaca as principais tecnologias da indústria 4.0 que podem ser aplicadas em organização em função dos objetivos de otimizações com foco em sustentabilidade, como por exemplo *big data*, IoT, computação em nuvem e AI.
- Identifica os *stakeholders* críticos frequentemente envolvidos, a serem considerados no DPC, nomeadamente governo, mercado e fornecedores.
- Revela os principais indicadores ambientais e de mercado, sensíveis ao desenvolvimento de produtos circulares.

6 CONCLUSÕES

Ao mesmo tempo em que a EC é tida como uma das principais abordagens para se promover o desenvolvimento sustentável, sabe-se que a sua adoção depende do desenvolvimento de produtos alinhados aos seus princípios. Nesse contexto, o DPC é um conceito emergente e que tem sido altamente discutido entre pesquisadores e profissionais envolvidos nas áreas de sustentabilidade, EC e PDP. Desta forma, este estudo teve como objetivo aprofundar a compreensão do DPC, abordando suas tendências, estratégias de *design*, tecnologias da indústria 4.0, *stakeholders* envolvidos no processo, bem como suas influências no desempenho das firmas.

Para tanto, foi realizada uma pesquisa multimétodo, iniciando-se com uma revisão sistemática e qualitativa da literatura por meio de uma investigação e análise aprofundada de 87 artigos identificados de revistas internacionais na base de dados *Scopus*. Em uma segunda etapa, a relevância e implicações dos tópicos identificados na revisão teórica foram investigados no estudo de dois casos, em empresa de biodiversidade e de infraestrutura. Posteriormente, foi realizada uma pesquisa quantitativa tipo *survey* em 142 empresas de EEE. Destaca-se que estes três setores pesquisados (biodiversidade, infraestrutura e EEE) estão entre os considerados mais promissores para a adoção da EC no cenário brasileiro, conforme aponta a consultoria *Ellen MacArthur Foundation* (EMF, 2017).

6.1 Principais Contribuições

Os resultados desta tese fornecem novos *insights* sobre a literatura de gestão de operações sustentáveis, principalmente, porque este pode ser considerado o primeiro estudo que testa empiricamente, em um mesmo modelo integrado de pesquisa, as tecnologias da

Indústria 4.0 e a pressão de *stakeholders* no contexto do DPC. Além disso, foram desenvolvidos e testados dois constructos que têm sido altamente debatidos na literatura recente: Indústria 4.0 e DPC. Entende-se que o desenvolvimento desses constructos é uma das principais contribuições desta tese.

As principais conclusões revelam que o DPC é uma área de investigação recente e com tendência ascendente. Adicionalmente, a maioria dos trabalhos identificados e analisados nesta pesquisa utilizou um método qualitativo, evidenciando que a investigação em DPC se encontra atualmente em fase exploratória. Foi possível também identificar as principais estratégias de *design* relacionadas ao DPC, além de sua evolução ao longo dos anos.

Os resultados mostram que a literatura apresenta dezenas de estratégias aplicadas neste processo, entretanto, *design* para reciclagem, *design* para reutilização, e PSS foram as principais estratégias presentes na literatura e na prática de empresas brasileiras. Além das estratégias tradicionais, frequentemente adotadas, foram identificadas novas propostas de integração no campo do DPC, como o ‘*design* para durabilidade emocional’, ‘*design* para atualizações’, o ‘*design* para reaproveitamento’, e também o ‘*design* para biomimética’.

Dentre as estratégias de DPC, vale destacar também a presença do *ecodesign*, o qual vem sendo apontado na literatura como uma das principais forma de se atingir a sustentabilidade ambiental, no entanto, o DPC aborda aspectos mais amplos relacionados ao apego e confiança, durabilidade emocional, e desmaterialização, por exemplo.

Este estudo também avaliou teórico e empiricamente as tecnologias da Indústria 4.0 e a pressão de *stakeholders* no DPC e, por sua vez, seu impacto no desempenho ambiental e de mercado das empresas que operam no Brasil. Considerando os resultados da pesquisa (itens 4.1, 4.2, e 4.3), o referencial teórico mostrou-se adequado para compreender empiricamente as interações práticas nas empresas participantes.

Apesar da literatura emergente sobre Indústria 4.0, *stakeholders* e DPC, ainda havia falta de evidências empíricas abordando esses determinantes no contexto do desempenho das empresas. Portanto, esta pesquisa fornece contribuições relevantes e respondem às chamadas recentes sobre o DPC, preenchendo lacunas empíricas na literatura e adicionando evidências únicas de constructos testados em uma amostra significativa.

Inicialmente, o nível *beta* mais alto dos resultados da *survey* diz respeito à relação entre a Indústria 4.0 e o constructo DPC (H1). Essa descoberta indica que a adoção de estratégias de *design* para a circularidade pode ser favorecida pelas tecnologias da Indústria 4.0. Ampliando o escopo para os resultados da pesquisa multimétodo, nota-se que a adoção de *big data*, inteligência artificial, computação em nuvem e IoT são as tecnologias mais comumente adotadas.

Também foi possível observar que a pressão de *stakeholders* (H2) tende a contribuir para a adoção do DPC, sendo que governo, cadeia de suprimentos, e mercado são críticos e devem ser sensivelmente considerados no processo. Especificamente para a amostra quantitativa do cenário de EEE, os resultados destacam a importância do papel dos fornecedores em direção a adoção do DPC. Possivelmente, com o avanço da legislação e regulamentação em EC no Brasil, o governo passe a ter um papel ainda mais relevante no cenário nacional, como em países do continente europeu.

Confirmando o ineditismo desta tese, a aplicação desta pesquisa multimétodo mostrou-se relevante uma vez que as etapas realizadas complementaram-se para uma melhor compreensão do fenômeno estudado. Os resultados do estudo de casos nas empresas de biodiversidade e infraestrutura, e os comentários dos entrevistados sobre detalhes do contexto prático, como apresentado nos Quadros 4 e 5, reforçam como gerenciar de forma mais eficiente recursos renováveis de base biológica no nível da indústria. Por outro lado, o

resultado em escala da pesquisa *survey* subsidia tendências mais genéricas de sucesso na aplicação do conteúdo avaliado, compreendendo-se um contexto amostral superior.

Considera-se que o problema de pesquisa aqui proposto foi respondido uma vez que tanto na teoria e como na prática foi compreendido o contexto da adoção das estratégias DfX, e avaliadas as relações de tecnologias da indústria 4.0 e a pressão dos *stakeholders* no DPC, ainda, foram analisados os impactos do DPC no desempenho ambiental e de mercado das empresas, demonstrando que a adoção do DPC pode afetar positivamente o desempenho de empresas. Neste sentido, apesar de certa controvérsia na literatura sobre o desempenho de mercado relacionado a EC, esta pesquisa indicou uma relação positiva entre o DPC e esta dimensão de desempenho.

6.2 Implicações Teóricas

Para os estudiosos, este trabalho sistematiza as descobertas de uma área emergente e fornece direções de pesquisas futuras. Neste sentido, foram adicionados resultados à teoria de EC e também de PDP, apresentando e analisando o panorama atual de pesquisa do DPC, além da identificação de possíveis desafios neste cenário. A partir da literatura atual, também foi possível aprofundar o campo de pesquisa teórica com implicações e recomendações de desenvolvimento da literatura, tais como:

- O constructo de DPC foi desenvolvido e testado em uma amostragem probabilística. Neste constructo, especialmente as variáveis CD7 (*design* emocional e atrativo), CD8 (atualização de *softwares*, componentes e módulos), CD9 (produtos atrelados a sistemas de serviços), e CD10 (múltiplos ciclos e recontextualização) representam uma nova contribuição à teoria do DPC.

- Diversas abordagens de *design* propostas já são conhecidas na literatura, especialmente, relacionadas ao *design* para sustentabilidade e *ecodesign* (reutilização, desmontagem, remanufatura e manutenção, por exemplo). Portanto, é importante expandir o conhecimento de como se integrar a modelos de negócios circulares outras abordagens de *design*, como durabilidade emocional, biomimética, múltiplos ciclos de uso, reaproveitamento e capacidade de atualização.
- A literatura sobre EC e DPC indicou um tendência de aumento do uso da economia compartilhada e do PSS. Desta forma, estudos sobre DPC podem se concentrar em estratégias mais tecnológicas e organizacionais para impulsionar o modelos de economia colaborativa e o desenvolvimento de “*smart products*” desde os estágios iniciais do PDP.
- Os estudos estão começando a destacar as interfaces entre a Indústria 4.0 neste contexto. No entanto, ainda são poucas as investigações empíricas qualitativas em empresas que demonstram como estas relações ocorrem, assim como seus resultados. Estudos futuros podem se concentrar nesta questão e as principais barreiras envolvidas nesta relação.
- Apesar da consolidação da relevância da teoria dos *stakeholders* no cenário de gestão de operações sustentáveis e “*green products*”, a natureza desta pesquisa adiciona ao corpo teórico a recente atuação dos atores da cadeia de suprimentos e do comportamento de consumo como fatores determinantes na transição de um sistema linear para a EC. Este mostra-se como um campo de estudo premente para o contexto do DPC.

6.3 Implicações Práticas

Para os profissionais, foram apresentados uma série de estratégias que podem ser adotadas para o processo de DPC em empresas. O Quadro 3 e o Gráfico 4 representam contribuições potenciais desta pesquisa, mostrando as estratégias de *design* presentes na literatura, bem como sua aplicação ao longo dos anos, respectivamente. Os resultados aqui encontrados, também podem apoiar as decisões de gestão, mostrando que a adoção do DPC melhora o desempenho ambiental e de mercado, e não deve haver um desequilíbrio ou compensação entre essas duas dimensões. Além disso, em termos de implicações de projeto, os práticos da área também podem considerar certos conceitos e habilidades para garantir esforços em direção ao DPC. Dentre estas habilidades, e considerando os resultados apresentados, sugere-se:

- Análise de impacto ambiental: os *designers* devem compreender as consequências de selecionar materiais e projetar em termos de consumo de energia, emissões de gases, pegada de carbono e consumo de água, entre outros, durante todo o ciclo de vida do produto.
- Conhecimento sobre como desacelerar e fechar os conceitos de ciclo: profissionais precisam entender a dinâmica do ciclo de vida e qual estratégia pode ser aplicada a cada produto ou componente (por exemplo, reutilizar, remanufaturar, reparar e reciclar).
- Conhecimento de tecnologias que permitem a aplicação de compartilhamento de produtos e PSS: também é necessário que os *designers* avancem no conhecimento de tecnologias de Indústria 4.0 e como eles podem ser integradas ao DPC, principalmente o uso de impressoras 3D (manufatura aditiva), realidade aumentada, virtual e digitalização. Esta recomendação pode ser útil também para

gerentes, interessados em melhorar o desempenho da empresa e desenvolver produtos circulares.

- *Design* persuasivo e *design* emocional: torna-se cada vez mais relevante entender como criar ligações fortes entre usuários e produtos, a fim de reduzir a rápida substituição e obsolescência de produtos, mesmo quando novas versões de forem lançadas. Nesta linha, também é importante despertar a autoconsciência do cliente sobre os impactos ambientais e questões de sustentabilidade global. Neste caso, o *design* emocional e a ergonomia mostraram-se como relevantes para assegurar as emoções do cliente, sendo que um dos desafios pode ser como incluir uma mensagem de sustentabilidade no *design* de produto.

6.4 Limitações e Direções Futuras

Esta tese buscou responder as dúvidas de pesquisa identificadas, porém, reconhece-se que os resultados devem ser vistos com restrições metodológicas. Em relação aos métodos aqui aplicados, a seleção de palavras-chave específicas e o uso de apenas um banco de dados para o acesso aos artigos revisados são limitações reconhecidas. As amostras finais e a sistematização e análise das descobertas exigiram filtragem e leitura, o que pode ter adicionado um nível de subjetividade para as análises. Pesquisas futuras poderiam, portanto, continuar e fazer avançar a análise teórica sobre o DPC, bem como acompanhar as propostas de pesquisas complementares como proposto nesta tese.

Na tentativa de atender a uma chama da consultoria *Ellen MacArthur Foundation*, a condução do estudo de casos e da pesquisa *survey* em setores industriais distintos pode ser considerada outra limitação deste estudo, visto que cada setor apresenta suas características específicas de gerenciamento do contexto do DPC, e mesmo considerando que os casos

estudados se destacam em termos de relevância para o cenário econômico, devido à limitação do método de pesquisa empregado os resultados apresentados não pode ser generalizados. A amostra adotada e o perfil dos respondentes também são limitações, uma vez que este estudo investigou empresas em setores específicos de uma economia emergente, o Brasil. Certamente a aplicação da etapa empírica em diferentes setores ou contextos econômicos apresentaria outros resultados.

A escolha dos constructos que compuseram o modelo de pesquisa quantitativa (Figura 5) também foi uma limitação da pesquisa. Particularmente, não foi possível incorporar em um mesmo *framework* questões sobre possíveis facilitadores e barreiras relacionadas à adoção do DPC, para quem fossem avaliados em conjunto nas empresas respondentes. Nesse sentido, estudos futuros poderiam fornecer uma investigação mais aprofundada sobre esta questão, incorporando novos elementos que podem influenciar a adoção do DPC neste contexto. Um outro ponto limitante, o qual pode também ser avaliado em futuros estudos, são possíveis *trade-offs* presentes na adoção do DPC. A literatura de EC já tem avançado neste sentido, todavia, devido a característica recente da literatura de DPC, nos artigos revisados não foram encontrados estudos com este foco.

Duas descobertas relevantes desta tese podem ser adotadas para aprofundar-se uma nova avenida de pesquisa no contexto do DPC. Apesar da adoção de realidade aumentada e virtual e a aplicação da manufatura aditiva/impressora 3D serem apontadas como relevantes para a literatura relacionada à área de indústria 4.0 e EC, não foram encontrados artigos científicos investigando tecnologias de simulação e virtualização a partir das buscas realizadas nesta pesquisa. Ainda, nas avaliações empíricas aqui investigadas, não foram identificadas ações de manufatura aditiva/impressora 3D, além desta variável apresentar menor carga fatorial na *survey* aplicada. Assim, entende-se que seria relevante que novos

estudos focassem no aprofundamento e verificação destes temas tanto em teoria quanto na prática.

Além disso, estudos futuros também poderão avaliar o modelo de pesquisa aqui aplicado na etapa quantitativa da pesquisa com foco em diferentes setores da indústria, como automotivo, moveleiro e alimentício, ou mesmo ampliando a amostra para outros países. Uma outra oportunidade está relacionada a avaliação do constructo desempenho ambiental como fator moderador para o desempenho de mercado, uma vez que foi identificada uma forte relação entre estes constructos. Finalmente, como uma questão de pesquisa aberta que este estudo não pôde analisar, pesquisas futuras poderiam complementar estes resultados por uma investigação avaliando quantitativamente efeitos de tecnologias emergentes da indústria 4.0 nos desempenhos inovador e operacional das empresas.

FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado em parte com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Processo CAPES/PRINT (88887.370707/2019-00).

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, L., 2018. Design for Product Care: Enhancing Consumers' Repair and Maintenance Activities. **The Design Journal**, 21, 543-551.
- AGYEMANG, M.; KUSI-SARPONG, S.; KHAN, S. A.; MANI, V.; REHMAN, S. T.; KUSI-SARPONG, H. Drivers and barriers to circular economy implementation: an explorative study in Pakistan's automobile industry. **Management Decision**, 57(4), 971-994, 2019.
- ALMEIDA, S.T.; BORSATO, M.; UGAYA, C.M.L. Application of exergy-based approach for implementing design for reuse: The case of microwave oven. **Journal of Cleaner Production**, 168, 876-892, 2017.
- ANDRAE, A. S.; VAJJA, M. S.; HALGAND, S. Method for determining the Circularity Score of ICT goods. **International Journal of Advanced Research in Engineering & Management (IJAREM)**, 01-15, 2020.
- ANDREWS, D. The circular economy, design thinking and education for sustainability. **Local Economy**, 30(3), 305-315, 2015.
- ARCOS, B.P.; BAKKER, C.; FLIPSEN, B.; BALKENENDE, R. Practices of fault diagnosis in household appliances: Insights for design. **Journal of Cleaner Production**, 265, 121812, 2020.
- ATLASON, R. S.; GIACALONE, D.; PARAJULY, K. Product design in the circular economy: Users' perception of end-of-life scenarios for electrical and electronic appliances. **Journal of Cleaner Production**, 168, 1059-1069, 2017.
- ÁVILA-GUTIÉRREZ, M. J.; MARTÍN-GÓMEZ, A.; AGUAYO-GONZÁLEZ, F.; CÓRDOBA-ROLDÁN, A. Standardization Framework for Sustainability from Circular Economy 4.0. **Sustainability**, 11 (22), 6490, 2019.
- BAG, S., GUPTA, S., KUMAR, S. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal of Production Economics**, 107844, 2020.
- BALDASSARRE, B.; CALABRETTA, G.; BOCKEN, N. M. P.; JASKIEWICZ, T. Bridging sustainable business model innovation and user-driven innovation: A process for sustainable value proposition design. **Journal of Cleaner Production**, 147, 175-186, 2017.

BALDÉ, C.P.; FORTI V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017.

BANDALOS, D. L. **Measurement theory and applications for the social sciences**, New York: Guilford Press, 2018.

BAKKER, C.; WANG, F.; HUISMAN, J.; DEN HOLLANDER, M. Products that go round: exploring product life extension through design. **Journal of Cleaner Production**, 69, 10-16, 2014.

BARRUCHO, L. Mundo declara guerra ao canudo plástico, vilão do meio ambiente, 2018. Acesso realizado em 10/2019. <https://www.bbc.com/portuguese/geral-44419803>.

BECH, N. M.; BIRKVED, M.; CHARNLEY, F.; LAUMANN KJAER, L.; PIGOSSO, D.C.; HAUSCHILD, M. Z.; MORENO, M. Evaluating the environmental performance of a product/service-system business model for Merino Wool Next-to-Skin Garments: The case of Armadillo Merino®. **Sustainability** 11, 5854, 2019.

BEDEIAN, A. G. “More than meets the eye”: A guide to interpreting the descriptive statistics and correlation matrices reported in management research. **Academy of Management Learning & Education**, 13 (2), 121–135, 2014.

BELHADJ, I.; KHEMILI, I.; TRIGUI, M.; AIFAOU, N. Time computing technique for wear parts dismantling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 103, 3513-3527, 2019.

BOCKEN, N. M.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, 33(5), 308-320, 2016.

BOCKEN, N. M P; SCHUIT, C. S. C; KRAAIJENHAGEN, C. Experimenting with a circular business model: Lessons from eight cases. **Environmental innovation and societal transitions**, v. 28, p. 79-95, 2018.

BODOVA, E. Tools of environmental management and EU circular economy. **MM Science Journal**, 1, 1700-1706, 2017.

BOKS, C. The soft side of ecodesign. **Journal of Cleaner Production**, 14(15-16), 1346-x’1356, 2006.

BOLOGA, R.; LUPU, A. R.; BOJA, C.; GEORGESCU, T. Sustaining employability: A process for introducing cloud computing, big data, social networks, mobile programming and cybersecurity into academic curricula. **Sustainability**, 9 (12), 2235, 2017.

BONVIU, F. The European economy: From a linear to a circular economy. **Romanian J. Eur. Aff.**, 14, 78, 2014.

BOVEA, M.D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; PÉREZ-BELIS, V.; JUAN, P.; BRAULIO-GONZALO, M.; DÍAZÁVALOS, C. Incorporation of circular aspects into product design and labelling: consumer preferences. **Sustainability**, 10, 2311, 2018a.

BOVEA, M.D.; PÉREZ-BELIS, V. Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. **Journal of environmental management**, 228, 483-494, 2018.

BOVEA, M.D.; QUEMADES-BELTRÁN, P.; PÉREZ-BELIS, V.; JUAN, P., BRAULIO-GONZALO, M.; IBÁÑEZ-FORÉS, V. Options for labelling circular products: Icon design and consumer preferences. **Journal of Cleaner Production**, 202, 1253-1263, 2018b.

BRESSANELLI, G.; ADRODEGARI, F.; PERONA, M.; SACCANI, N. Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies, **Sustainability**, Vol.10 No.3, 2018.

BRONES, F.; CARVALHO, M. M.; ZANCUL, E. S. Ecodesign in project management: a missing link for integration of sustainability in product development? **Journal of Cleaner Production**, Vol.80, No.1, pp.106-118, 2014.

BROOK, J. W.; PAGNANELLI, F. Integrating sustainability into innovation project portfolio management—A strategic perspective. **Journal of Engineering and Technology Management**, 34, 46-62, 2014.

BRZEZINSKI, M. Power laws in citation distributions: evidence from Scopus, **Scientometrics**, Vol. 103 No. 1, pp. 213–228, 2015.

CEHA, A. (2017). Tackling the Circular Economy: Aiding firms in the design and implementation of circular business models. University of Twente, Netherlands.

CHANDRAN GOVINDARAJU, V. G. R.; KRISHNAN VIJAYARAGHAVAN, G.; PANDIYAN, V. Product and process innovation in Malaysian manufacturing: The role of government, organizational innovation and exports. **Innovation**, v. 15, n. 1, p. 52-68, 2013.

CHEN, C.W. Improving circular economy business models: opportunities for business and innovation: a new framework for businesses to create a truly circular economy. **Johnson Matthey Technology Review**, 64, 48-58, 2020.

CHOUINARD, U.; PIGOSSO, D. C.; MCALOONE, T. C.; BARON, L.; ACHICHE, S. Potential of circular economy implementation in the mechatronics industry: An exploratory research. **Journal of Cleaner Production**, 239, 118014, 2019.

CONG, L., ZHAO, F., SUTHERLAND, J.W. A design method to improve end-of-use product value recovery for circular economy. **Journal of Mechanical Design**, 141, 044502, 2019.

COOPER, D. R.; RYAN, N. A.; SYNDERGAARD, K.; ZHU, Y. The potential for material circularity and independence in the US steel sector. **Journal of Industrial Ecology**, 24, 748-762, 2020.

COSTA, G. J.; GOUVINHAS, R. P. Ecodesign strategies and the product development process within northeast sme brazilian companies. **Product: Management and Development**, v. 2, n. 1, p. 31-40, 2017, 2017.

CROSSAN, M. M.; APAYDIN, M. A multi-dimensional framework of organizational innovation: A systematic review of the literature. **Journal of management studies**, 47(6), 1154-1191, 2010.

DA SILVA, W. C.; SANTOS, G. O.; DE ARAÚJO, W. E. L. Resíduos Sólidos de Construção Civil: Caracterização, Alternativas de Reuso e Retorno Econômico. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 6(2), 286-301, 2017.

DANGELICO, R. M. Green product innovation: where we are and where we are going. **Business Strategy and the Environment**, 25 (8), 560-576, 2016.

DANGELICO, R. M.; PUJARI, D.; PONTRANDOLFO, P. Green product innovation in manufacturing firms: A sustainability-oriented dynamic capability perspective. **Business Strategy and the Environment**, 26(4), 490-506, 2017.

DE LOS RIOS, I.C.; CHARNLEY, F.J. Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of design. **Journal of Cleaner Production**, 160, 109- 122, 2017.

DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and

original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, 270(1-2), 273-286, 2018.

DEN HOLLANDER, M. C.; BAKKER, C. A.; HULTINK, E. J. Product design in a circular economy: Development of a typology of key concepts and terms”. **Journal of Industrial Ecology**, Vol.21 No.3, pp.517-525, 2017.

DESPEISSE, M.; BAUMERS, M.; BROWN, P.; CHARNLEY, F.; FORD, S. J.; GARMULEWICZ, A.; ROWLEY, J. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. **Technological Forecasting and Social Change**, 115, 75-84, 2017.

EARLEY, R. Circular design futures. **The Design Journal**, v. 20, n. 4, p. 421-434, 2017.

EISENHARDT, K. M.; GRAEBNER, M. E. Theory building from cases: Opportunities and challenges. **Academy of management journal**, 50(1), 25-32, 2017.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Evaluating the adoption of Circular Economy practices in industrial supply chains: an empirical analysis. **Journal of Cleaner Production**, p. 122966, 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular Economy System Diagram, 2015. Acesso realizado em 10/2017. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactive-diagram>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. A CIRCULAR ECONOMY IN BRAZIL: An initial exploration, 2017. Acesso realizado em 07/2018. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/A-Circular-Economy-in-Brazil-An-initial-exploration.pdf>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Artificial Intelligence and the Circular Economy, 2019. Acesso realizado em 05/2019. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/artificial-intelligence-and-the-circular-economy>.

ERIKSEN, M.K.; ASTRUP, T.F. Characterisation of source-separated, rigid plastic waste and evaluation of recycling initiatives: Effects of product design and source separation system. **Waste Management**, 87, 161-172, 2019.

EUROPEAN COMMISSION. ECO-INNOVATION at the heart of European policies, 2019. Acesso realizado em 01/2019. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/events/conference-announcement-and-call-papers-sustainable-innovation-2019-road-2030-sustainability_en.

EUROPEAN UNION. The European Union and the Eastern partner countries strengthen their cooperation on environment, circular economy and climate action, 2018. Acesso realizado em 01/2019 https://eeas.europa.eu/headquarters/headquarters-homepage/51959/european-union-and-eastern-partner-countries-strengthen-their-cooperation-environment-circular_en.

FAHIMNIA, B.; SARKIS, J.; DAVARZANI, H. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis, **International Journal of Production Economics**, Vol.162, pp.101-114, 2015.

FAUL, F; ERDFELDER, E.; LANG, A. G.; BUCHNER, A. A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral and biomedical sciences. **Behavior Research Methods**, v. 39, n. 2, p.175-191, 2007.

FERNANDES, S.C.; PIGOSSO, D.C.; MCALOONE, T.C.; ROZENFELD, H. Towards productservice system oriented to circular economy: A systematic review of value proposition design approaches. **Journal of Cleaner Production**, 257, 120507, 2020.

FLOOD, M.; FENNESSY, L.; LOCKREY, S.; AVENDANO, A.; GLOVER, J.; KANDARE, E.; BHAT, T. Glass Fines: A review of cleaning and up-cycling possibilities. **Journal of Cleaner Production**, 267, 121875, 2020.

FORD, P.; FISHER, J. Designing consumer electronic products for the circular economy using recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS): a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117490, 2019.

FORZA, C. Survey research in operations management: a process-based perspective. **International journal of operations & production management**, 22(2), 152-194, 2002.

FRANCO, M. A. A system dynamics approach to product design and business model strategies for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118327, 2019.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15-26, 2019.

FREEMAN, R.E. (1984). Strategic management: A stakeholder approach. Boston: Pitman Publishing Inc.

FULTON, B.R. Organizations and survey research: Implementing response enhancing strategies and conducting nonresponse analyses. **Sociological Methods & Research**, 47 (2), 240–276, 2018.

GANJOUEI, F. A.; HAMID, A. B. A.; SUKATI, I. **Supply Chain Integration in Iranian Pistachio Industry: Intrapreneurship, Information Technology and Firm Performance Perspective**. Partridge Publishing Singapore, 2018.

GARCÍA-BARRAGÁN, J. F.; EYCKMANS, J.; ROUSSEAU, S. Defining and measuring the circular economy: a mathematical approach. **Ecological Economics**, v. 157, p. 369-372, 2019.

GARSON, G.D. **Partial least squares regression & structural equation models**. Asheboro, NC: Statistical Publishing Associates, 2016.

GAUR, A.; AND KUMAR, M. A systematic approach to conducting review studies: An assessment of content analysis in 25 years of IB research, *Journal of World Business*, Vol.53 No.2, pp.280-289, 2018.

GEISSDOERFER, M.; BOCKEN, N. M.; HULTINK, E. J. Design thinking to enhance the sustainable business modelling process—A workshop based on a value mapping process. **Journal of Cleaner Production**, 135, 1218-1232, 2016.

GEISSINGER, A.; LAURELL, C.; ÖBERG, C.; SANDSTRÖM, C. How sustainable is the sharing economy? On the sustainability connotations of sharing economy platforms. **Journal of Cleaner Production**, 206, 419-429, 2019.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, 114, 11-32, 2016.

GHISELLINI, P.; RIPA, M.; ULGIATI, S. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. **Journal of Cleaner Production**, 178, 618-643, 2018.

GHOREISHI, M.; HAPPONEN, A. New Promises AI Brings into Circular Economy Accelerated Product Design: Review on Supporting Literature. **ICEPP 2019**, 12, 2019.

GIBBERT, M.; RUIGROK, W. The “what” and “how” of case study rigor: Three strategies based on published work. **Organizational research methods**, 13(4), 710-737, 2010.

GONZÁLEZ-BENITO, J.; GONZÁLEZ-BENITO, O. A review of determinant factors of environmental proactivity. **Business Strategy and the Environment**, 15(2), 87-102, 2006.

GOVINDAN, K.; HASANAGIC, M. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1-2, p. 278-311, 2018.

GOYAL, S., ESPOSITO, M., & KAPOOR, A. Circular Economy Business Models in Developing Economies: Lessons from India on Reduce, Recycle, and Reuse Paradigms. **Thunderbird International Business Review**, 2016.

GUPTA, S.; CHEN, H.; HAZEN, B.T.; KAUR, S.; GONZALEZ, E.D.S. Circular economy and big data analytics: A stakeholder perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, 144, 466-474, 2019.

HAFFMANS, S.; VAN HINTE, E.; ZIJLSTRA, Y. **Products That Flow: Circular Business Models and Design Strategies for Fast Moving Consumer Goods**. Bis B.V., Uitgeverij (BIS Publishers), 2018.

HAGEJÄRD, S.; OLLÁR, A.; FEMENÍAS, P.; RAHE, U. Designing for Circularity—Addressing Product Design, Consumption Practices and Resource Flows in Domestic Kitchens. **Sustainability**, 12, 1006, 2020.

HAINES-GADD, M.; CHAPMAN, J.; LLOYD, P.; MASON, J.; ALIAKSEYEU, D. Emotional Durability Design Nine—A Tool for Product Longevity. **Sustainability** 10, 1948, 2018.

HAIR, J.F.; HULT, G.T.M.; RINGLE, C.M.; SARSTEDT, M. **A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)** (2nd ed.). Thousand Oaks: Sage Publications, 2016.

HAIR JR, J. F.; MATTHEWS, L. M.; MATTHEWS, R. L.; SARSTEDT, M. PLS-SEM or CB-SEM: Updated guidelines on which method to use. **International Journal of Multivariate Data Analysis**, v. 1, n. 2, p. 107-123, 2017.

HALSTENBERG, F. A.; LINDOW, K.; STARK, R. Leveraging Circular Economy through a Methodology for Smart Service Systems Engineering. **Sustainability**, 11(13), 3517, 2019.

HAN, S. L.; CHAN, P. Y.; VENKATRAMAN, P.; APEAGYEI, P.; CASSIDY, T.; TYLER, D. J. Standard vs. Upcycled Fashion Design and Production, **Fashion Practice**, Vol.9 No.1, pp.69-94, 2017.

HANNULA, J.; KERN, M.; LUUKKANEN, S.; ROINE, A.; VAN DEN BOOGAART, K. G.; REUTER, M.A. Property-based modelling and simulation of mechanical separation processes using dynamic binning and neural networks. **Minerals Engineering**, 126, 52-63, 2018.

HARZING, A.W.; ALAKANGAS, S. Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison, **Scientometrics**, Springer Netherlands, Vol.106 No.2, pp. 787–804, 2016.

HAZIRI, L. L.; SUNDIN, E.; SAKAO, T. Feedback from Remanufacturing: Its Unexploited Potential to Improve Future Product Design. **Sustainability**, 11, 4037, 2019.

HENSELER, J.; HUBONA, G.; RAY, P. A. Partial least squares path modeling: Updated guidelines. In: **Partial Least Squares Path Modeling**. Springer, Cham, p. 19-39, 2017.

HEYES, G.; SHARMINA, M.; MENDOZA, J. M. F.; GALLEGO-SCHMID, A.; AZAPAGIC, A. Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies, **Journal of Cleaner Production**, Vol.177, pp.621-632, 2018.

HILDEBRANDT, J.; BEZAMA, A.; THRÄN, D. Cascade use indicators for selected biopolymers: are we aiming for the right solutions in the design for recycling of bio-based polymers? **Waste Management & Research**, 35, 367-378, 2017.

HODINOTT, S. N.; BASS, M. J. The Dillman Total Design Survey Method: A sure-fire way to get high survey return rates. **Can Fam Physician**, 32, 2366-8, 1986.

HOLTSTRÖM, J.; BJELLERUP, C.; ERIKSSON, J. Business model development for sustainable apparel consumption. **Journal of Strategy and Management**, 12, 481-504, 2019.

HORBACH, J.; RAMMER, C. Employment and performance effects of circular economy innovations. **ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper**, (19-016), 2019.

HUYSMAN, S.; DE SCHAEPMEESTER, J.; RAGAERT, K.; DEWULF, J.; DE MEESTER, S. Performance indicators for a circular economy: a case study on post-industrial plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, 120, 46-54, 2017.

INGENBLEEK, P.T.; FRAMBACH, R. T.; VERHALLEN, T.M. Best practices for new product pricing: Impact on market performance and price level under different conditions. **Journal of Product Innovation Management**, 30(3), 560-573, 2013.

ISKANDAR, M.; ARIFFIN, A. Relationship between National Automotive Policy (NAP), innovation and automotive vendors' performance in Malaysia. **Management Science Letters**, 9(8), 1181-1198, 2019.

JABBOUR, C. J. C.; JUGEND, D.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; GUNASEKARAN, A.; LATAN, H. Green product development and performance of Brazilian firms: measuring the role of human and technical aspects. **Journal of Cleaner Production**, 87, 442-451, 2015.

JABBOUR, C. J. C.; JUGEND, D.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; GOVINDAN, K., KANNAN, D.; LEAL FILHO, W. There is no carnival without samba: Revealing barriers hampering biodiversity-based R&D and eco-design in Brazil. **Journal of environmental management**, 206, 236-245, 2018.

JABBOUR, C.J.C.; SOUSA JABBOUR, A.B.L.; SARKIS, J.; GODINHO FILHO, M. Unlocking the circular economy through new business models based on large-scale data: an integrative framework and research agenda. **Technological Forecasting and Social Change**, 144, 546-552, 2019.

JABBOUR, C. J. C.; FIORINI, P. D. C.; WONG, C. W.; JUGEND, D.; JABBOUR, A. B. L. D. S.; SELES, B. M. R. P.; PINHEIRO, M. A. P.; DA SILVA, H. M. R. First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies. **Resources Policy**, 66, 101596, 2020.

JAKHAR, S. K.; MANGLA, S. K.; LUTHRA, S.; KUSI-SARPONG, S. When stakeholder pressure drives the circular economy: measuring the mediating role of innovation capabilities. **Management Decision**, 57(4), 904-920, 2019.

JENSEN, J. P.; PRENDEVILLE, S. M.; BOCKEN, N. M.; PECK, D. Creating sustainable value through remanufacturing: Three industry cases. **Journal of Cleaner Production**, 218, 304-314, 2019.

JESUS, A.; MENDONÇA, S. Lost in transition? Drivers and barriers in the ecoinnovation road to the circular economy. **Ecological Economics**, 145, 75-89, 2018.

JUGEND, D.; FIORINI, P.D.C.; PINHEIRO, M.A.P.; SILVA, H.M.R.; SELES, B.M.R.P. Building circular products in an emerging economy: an initial exploration regarding practices, drivers and barriers: case studies of new product development from medium and large Brazilian companies. **Johnson Matthey Technology Review**, 64, 59-68, 2020.

KADDOURA, M.; KAMBANOU, M. L.; TILLMAN, A.M.; SAKAO, T. Is prolonging the lifetime of passive durable products a low-hanging fruit of a circular economy? A Multiple Case Study. **Sustainability**, 11, 4819, 2019.

KANE, G. M.; BAKKER, C. A.; BALKENENDE, A. R. Towards design strategies for circular medical product. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol.135, pp.38-47, 2018.

KHADKA, N. S. Amazon fires: Forest loss challenges Paris climate ambition. Acesso realizado em 08/2019. <https://www.bbc.com/news/science-environment-49484530>, 2019.

KIEL, D.; MÜLLER, J.M.; ARNOLD, C.; VOIGT, K.I. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. **International Journal of Innovation Management**, 21 (08), 1740015, 2017.

KIRCHHERR, J.; PISCICELLI, L.; BOUR, R.; KOSTENSE-SMIT, E.; MULLER, J.; HUIBRECHTSE-TRUIJENS, A.; HEKKERT, M. Barriers to the circular economy: evidence from the European Union (EU). **Ecological Economics**, 150, 264-272, 2018.

KJAER, L.L.; PIGOSSO, D.C.; NIERO, M.; BECH, N.M.; MCALOONE, T.C. Product/service- systems for a circular economy: The route to decoupling economic growth from resource consumption? **Journal of Industrial Ecology**, 23, 22-35, 2019.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular economy: the concept and its limitations. **Ecological economics**, v. 143, p. 37-46, 2018.

KOSZEWSKA, M.; BIELECKI, M. How to make furniture industry more circular? The role of component standardisation in ready-to-assemble furniture. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, 7 1688-1707, 2020.

KRISTENSEN, H. S.; REMMEN, A. A framework for sustainable value propositions in product-service systems. **Journal of Cleaner Production**, 223, 25-35, 2019.

LAGE JUNIOR, M; GODINHO FILHO, M. Variations of the kanban system: Literature review and classification, **International Journal of Production Economics**, Vol. 125 No. 1, pp. 13–21, 2010.

LATAN, H.; NOONAN, R. (Ed.). **Partial least squares path modeling: basic concepts, methodological issues and applications**. Springer, 2017.

LATAN, H.; JABBOUR, C. J. C.; JABBOUR, A. B. L. S.; WAMBA, S. F.; SHAHBAZ, M. Effects of environmental strategy, environmental uncertainty and top management's commitment on corporate environmental performance: The role of environmental management accounting. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 297-306, 2018.

LATAN, H.; JABBOUR, C. J.C.; SOUSA JABBOUR, A. B. L.; FIORINI, P.C., FOROPON, C. Innovative efforts of ISO 9001-certified manufacturing firms: Evidence of links between determinants of innovation, continuous innovation and firm performance. **International Journal of Production Economics**, 223, 107526, 2020.

LEISSNER, S.; RYAN-FOGARTY, Y. Challenges and opportunities for reduction of single use plastics in healthcare: a case study of single use infant formula bottles in two Irish maternity hospitals. **Resources, Conservation and Recycling**, 151, 104462, 2019.

LI, Y.; DING, R.; SUN, T. The drivers and performance of environmental practices in the Chinese construction industry. **Sustainability**, 11 (3), 614, 2019.

LIEDER, M.; ASIF, F. M.; RASHID, A.; MIHELIČ, A.; KOTNIK, S. Towards circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 93(5-8), 1953-1970, 2017.

LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of cleaner production**, 115, 36-51, 2016.

LIN, K. C.; SHYU, J. Z.; DING, K. A cross-strait comparison of innovation policy under industry 4.0 and sustainability development transition. **Sustainability**, v. 9, n. 5, p. 786, 2017.

LO-IACONO-FERREIRA, V. G.; CAPUZ-RIZO, S. F.; TORREGROSA-LÓPEZ, J. I. Key Performance Indicators to optimize the environmental performance of Higher Education

Institutions with environmental management system—A case study of Universitat Politècnica de València. **Journal of Cleaner Production**, 178, 846-865, 2018.

LONCA, G.; LESAGE, P.; MAJEAU-BETTEZ, G.; BERNARD, S.; MARGNI, M. Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market. **Resources, Conservation and Recycling**, 162, 105013, 2020.

LÜDEKE-FREUND, F.; GOLD, S.; BOCKEN, N. M. A review and typology of circular economy business model patterns. **Journal of Industrial Ecology**, 23(1), 36-61, 2019.

MANDOLINI, M.; FAVI, C.; GERMANI, M.; MARCONI, M. Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 95, 409-430, 2018.

MARCELINO-SÁDABA, S.; GONZÁLEZ-JAEN, L. F.; PÉREZ-EZCURDIA, A. Using project management as a way to sustainability. From a comprehensive review to a framework definition, **Journal of Cleaner Production**, Vol.99, pp.1-16, 2015.

MATANA, G.; SIMON, A.; GODINHO FILHO, M.; HELLENO, A. Method to assess the adherence of internal logistics equipment to the concept of CPS for industry 4.0. **International Journal of Production Economics**, 228, 107845, 2020.

MAYR, A.; WEIGELT, M.; MASUCH, M.; MEINERS, M.; HÜTTEL, F.; FRANKE, J. Application Scenarios of Artificial Intelligence in Electric Drives Production. **Procedia Manufacturing**, 24, 40-47, 2018.

MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. A. From ecodesign to sustainable product/service-systems: a journey through research contributions over recent decades. In: **Sustainable Manufacturing**, Springer, Cham, 2017. p. 99-111, 2017.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: Remaking the way we make things**. North point press, 2010.

MENDOZA, J. M. F.; SHARMINA, M.; GALLEGOS-SCHMID, A.; HEYES, G.; AZAPAGIC, A. Integrating Backcasting and Eco-Design for the Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, 2017.

MESA, J.; ESPARRAGOZA, I.; MAURY, H. Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. **Journal of Cleaner Production**, 196, 1429-1442, 2018.

MESA, J.; GONZÁLEZ-QUIROGA, A.; MAURY, H. Developing an indicator for material selection based on durability and environmental footprint: A Circular Economy perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, 160, 104887, 2020.

MESTRE, A.; COOPER, T. Circular product design. A multiple loops life cycle design approach for the circular economy. **The Design Journal**, v. 20, n. sup1, p. S1620-S1635, 2017.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na Engenharia de produção: estruturação recomendações para sua condução. **Production** (Revista Produção), 17(1), 216-229, 2007.

MIGUEL, P. A. C.; HO, L. L. Levantamento tipo survey. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 73-128, 2010.

MILIOS, L.; CHRISTENSEN, L. H.; MCKINNON, D.; CHRISTENSEN, C.; RASCH, M. K.; ERIKSEN, M. H. Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis. **Waste Management**, 76, 180-189, 2018.

MOLINA-AZORÍN, J. F.; LÓPEZ-GAMERO, M. D. Mixed methods studies in environmental management research: prevalence, purposes and designs. **Business Strategy and the Environment**, v. 25, n. 2, p. 134-148, 2016.

MONGBAY. Countries with the highest biological biodiversity. Acesso realizado em 02/2018. http://rainforests.mongabay.com/03highest_biodiversity.htm, 2016.

MORENO, M.; DE LOS RIOS, C.; ROWE, Z.; CHARNLEY, F. A conceptual framework for circular design. **Sustainability**, v. 8, n. 9, p. 937, 2016.

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**, 10 (1), 247, 2018.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. **Journal of Business Ethics**, 140(3), 369-380, 2017).

NAKANO, D. N. Métodos de pesquisa adotados na engenharia de produção e gestão de operações. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**, 2010.

NIU, S.; ZHUO, H.; XUE, K. DfRem-driven closed-loop supply chain decision making: A systematic framework for modeling research. **Sustainability**, 11, 3299, 2019

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. Assessing the Role of Big Data and the Internet of Things on the Transition to Circular Economy: Part II: An extension of the ReSOLVE framework proposal through a literature review. **Johnson Matthey Technology Review**, v. 64, n. 1, p. 32-41, 2020.

NUNNALLY, J.C.; BERNSTEIN, I.H. **Psychometric theory** (3rd ed.). New York: McGraw-Hill, 1994.

PARAJULY, K.; WENZEL, H. Product family approach in e-waste management: a conceptual framework for circular economy. **Sustainability**, 9, 768, 2017.

PARAJULY, K.; FITZPATRICK, C.; MULDOON, O.; KUEHR, R. Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU. **Resources, Conservation & Recycling**: X, 100035, 2020.

PARMAR, B. L.; FREEMAN, R. E.; HARRISON, J. S.; WICKS, A. C.; PURNELL, L.; DE COLLE, S. Stakeholder theory: The state of the art. *The academy of management annals*, 4(1), 403-445, 2010.

PAULRAJ, A. Understanding the relationships between internal resources and capabilities, sustainable supply management and organizational sustainability. **Journal of Supply Chain Management**, 47 (1), 19-37, 2011.

PEEL, M. J. Addressing unobserved selection bias in accounting studies: The bias minimization method. **European Accounting Review**, 27 (1), 173–183, 2018.

PHAM, T.T.; KUO, T.C.; TSENG, M.L.; TAN, R.R.; TAN, K.; IKA, D.S.; LIN, C.J. Industry 4.0 to accelerate the circular economy: A case study of electric scooter sharing. **Sustainability**, 11(23), 6661, 2019.

PIALOT, O.; MILLET, D.; BISIAUX, J. “Upgradable PSS”: Clarifying a new concept of sustainable consumption/production based on upgradability. **Journal of Cleaner Production**, Vol.141, pp.538-550, 2017.

PINHEIRO, M.A.P.; JUGEND, D.; DEMATTÊ FILHO, L. C; ARMELLINI, F. Framework proposal for ecodesign integration on product portfolio management. **Journal of Cleaner Production**, 185, 176-186, 2018.

PINHEIRO, M.A.P.; SELES, B.M.R.P.; CAMARGO F. P.; JUGEND, D.; SOUSA JABBOUR, A. B. L.; SILVA, H.M.R.; LATAN, H. The role of new product development in underpinning the circular economy: a systematic review and integrative framework. **Management Decision**, 57 (4), 840-862, 2019.

QUEIROZ, M. M.; TELLES, R. Big data analytics in supply chain and logistics: an empirical approach. **The International Journal of Logistics Management**, 29(2), 767-783, 2018.

RAGAERT, K.; HUBO, S.; DELVA, L.; VEELAERT, L.; DU BOIS, E. Upcycling of contaminated post- industrial polypropylene waste: A design from recycling case study. **Polymer Engineering & Science**, 58, 528-534, 2018.

RAJAPATHIRANA, R. J.; HUI, Y. Relationship between innovation capability, innovation type, and firm performance. **Journal of Innovation & Knowledge**, 3(1), 44-55, 2018.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Connecting circular economy and Industry 4.0. **International Journal of Information Management**, 49, 98-113, 2019.

RAMLI, N. A.; LATAN, H.; NARTEA, G.V. Why should PLS-SEM be used rather than regression? Evidence from the capital structure perspective. In N. K. Avkiran, C. M. Ringle (Eds.), **Partial least squares structural equation modeling: Recent advances in banking and finance** (pp. 171–209). Cham: Springer International, 2018.

RANDHAWA, K.; WILDEN, R.; HOHBERGER, J. A bibliometric review of open innovation: Setting a research agenda, **Journal of Product Innovation Management**, Vol.33 No. 6, pp.750-772, 2016.

RAUEN, F. J. Pesquisa científica: discutindo a questão das variáveis. **SIMFOP: Santa Catarina**, 2012.

RAUT, R. D.; LUTHRA, S.; NARKHEDE, B. E.; MANGLA, S. K.; GARDAS, B. B.; PRIYADARSHINEE, P. Examining the performance oriented indicators for implementing green management practices in the Indian agro sector. **Journal of Cleaner Production**, 215, 926-943, 2019.

RAYKOV, T.; MARCOULIDES, G. A. **Introduction to psychometric theory**. Routledge, 2011.

RINGLE, C. M.; WENDE, S.; BECKER, J. M. SmartPLS 3. In. **Boenningstedt: SmartPLS GmbH**, 2015.

RITZÉN, S.; SANDSTRÖM, G.Ö. Barriers to the Circular Economy–integration of perspectives and domains. **Procedia Cirp**, 64, 7-12, 2017.

RODRIGUES, V. P.; PIGOSSO, D. C.; MCALOONE, T. C. Process-related key performance indicators for measuring sustainability performance of ecodesign implementation into product development. **Journal of Cleaner Production**, 139, 416-428, 2016.

ROSA, P.; SASSANELLI, C.; URBINATI, A.; CHIARONI, D.; TERZI, S. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, 58(6), 1662-1687, 2020.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C. D.; SILVA, S. L. D.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo, 2006.

RYMASZEWSKA, A.; HELO, P.; GUNASEKARAN, A. IoT powered servitization of manufacturing—an exploratory case study. **International Journal of Production Economics**, v. 192, p. 92-105, 2017.

SABAGHI, M.; MASCLE, C.; BAPTISTE, P. Evaluation of products at design phase for an efficient disassembly at end-of-life. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 177-186, 2016.

SAGE, E. The shift from a throwaway society to a more circular economy, 2018. Acesso realizado em 01/2019. <https://www.stuff.co.nz/dominion-post/comment/107352012/the-shift-from-a-throwaway-society-to-a-more-circular-economy>.

SAIDANI, M.; YANNOU, B.; LEROY, Y.; CLUZEL, F.; KENDALL, A. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, 207, 542-559, 2019.

SANCHEZ, B.; HAAS, C. Capital project planning for a circular economy. **Construction Management and Economics**, Vol.36 No.6, pp.303-312, 2018).

SARSTEDT, Marko; RINGLE, Christian M.; HAIR, Joseph F. Treating unobserved heterogeneity in PLS-SEM: A multi-method approach. In: **Partial least squares path modeling**. Springer, Cham, 2017. p. 197-217.

SARKIS, J.; GONZALEZ-TORRE, P.; ADENSO-DIAZ, B. Stakeholder pressure and the adoption of environmental practices: The mediating effect of training. **Journal of Operations Management**, 28 (2), 163-176, 2010.

SARKIS, J.; ZHU, Q.; LAI, K. H. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. **International journal of production economics**, 130(1), 1-15, 2011.

SASSANELLI, C.; URBINATI, A.; ROSA, P.; CHIARONI, D.; TERZI, S.; Addressing circular economy through design for X approaches: A systematic literature review. **Computers in Industry**, 120, 103245, 2020.

SAUERWEIN, M.; DOUBROVSKI, E.; BALKENENDE, R.; BAKKER, C. Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, 226, 1138-1149, 2019.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**, 17, 48-56, 2016.

SCHUBERTH, Florian; HENSELER, Jörg; DIJKSTRA, Theo K. Confirmatory composite analysis. **Frontiers in psychology**, v. 9, p. 2541, 2018.

SELES, B. M. R. P.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; LATAN, H.; ROUBAUD, D. Do Environmental Practices Improve Business Performance Even in an Economic Crisis? Extending the Win-Win Perspective. **Ecological Economics**, 163, 189-204, 2019.

SELVEFORS, A.; REXFELT, O.; RENSTRÖM, S.; STRÖMBERG, H. Use to use—A user perspective on product circularity. **Journal of Cleaner Production**, 223, 1014-1028, 2019.

SHAHBAZI, S.; JÖNBRINK, A. K. Design Guidelines to Develop Circular Products: Action Research on Nordic Industry. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3679, 2020.

SHAHBAZI, S., JÖNBRINK, A. K., JENSEN, T. H., PIGOSSO, D. C. A., MCALOONE, T. C. et al. Circular Product Design and Development: CIRCit Workbook 3. 2020.

SIHVONEN, S.; PARTANEN, J. A survey of perceived prevalence of selected environmental topics in product development, and their relationships with employee's ecological concern. **Journal of Cleaner Production**, 199, 1116-1129, 2018.

SINCLAIR, M.; SHELDRIK, L.; MORENO, M.; DEWBERRY, E. Consumer intervention mapping—A tool for designing future product strategies within circular product service systems. **Sustainability**, 10, 2088, 2018.

SINGH, J.; ORDOÑEZ, I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 134, p. 342-353, 2016.

SINGH, J.; COOPER, T.; COLE, C.; GNANAPRAGASAM, A.; SHAPLEY, M. Evaluating approaches to resource management in consumer product sectors-An overview of global practices. **Journal of Cleaner Production**, 224, 218-237, 2019.

SINGHAL, K.; SINGHAL, J. Opportunities for developing the science of operations and supply-chain management. **Journal of Operations Management**, 30(3), 245-252, 2012.

SOUSA JABBOUR, A.B.L.; LUIZ, J.V.R.; LUIZ, O.R.; JABBOUR, C.J.C.; NDUBISI, N.O.; OLIVEIRA, J.H.C.; JUNIOR, F.H. Circular economy business models and operations management. **Journal of Cleaner Production**, 235, 1525-1539, 2019.

SOUSA-ZOMER, T.T.; MAGALHÃES, L.; ZANCUL, E.; CAMPOS, L.M.; CAUCHICK-MIGUEL, P.A. Cleaner production as an antecedent for circular economy paradigm shift at the micro-level: evidence from a home appliance manufacturer. **Journal of Cleaner Production**, 185, 740-748, 2018.

STAHEL, W. R. The performance economy: business models for the functional service economy. In **Handbook of performability engineering** (pp. 127-138). Springer, London, 2008.

STÅL, H. I.; CORVELLEC, H. A decoupling perspective on circular business model implementation: Illustrations from Swedish apparel. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 630-643, 2018.

STAMMINGER, R.; BUES, A.; ALFIERI, F.; CORDELLA, M. Durability of washing machines under real life conditions: Definition and application of a testing procedure. **Journal of Cleaner Production**, 121222.

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGINGER, M. The Circular Bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. **Resources, Conservation & Recycling**: X, 100029, 2020.

STEWART, R.; NIERO, M. Circular economy in corporate sustainability strategies: A review of corporate sustainability reports in the fast- moving consumer goods sector. **Business Strategy and the Environment**, 27, 1005-1022, 2018.

SUBRAMANIAN, N.; GUNASEKARAN, A.; WU, L.; SHEN, T. Role of traditional Chinese philosophies and new product development under circular economy in private manufacturing enterprise performance. **International Journal of Production Research**, 1-16, 2018.

SUMTER, D.; DE KONING, J.; BAKKER, C.; BALKENENDE, R. Circular economy competencies for design. **Sustainability**, 12, 1561, 2020.

TALENS PEIRÓ, L.; ARDENTE, F.; MATHIEUX, F. Design for Disassembly Criteria in EU Product Policies for a More Circular Economy: A Method for Analyzing Battery Packs in PC Tablets and Subnotebooks. **Journal of Industrial Ecology**, 21, 731-741, 2017.

TECCHIO, P.; MCALISTER, C.; MATHIEUX, F.; ARDENTE, F. In search of standards to support circularity in product policies: A systematic approach, **Journal of Cleaner Production**, Vol.168, pp.1533-1546, 2017.

TIWARI, M. K.; CHANG, P. C.; CHOUDHARY, A. Carbon-efficient production, supply chains and logistics. **International Journal of Production Economics**, (164), 193-196, 2015.

TSAI, K.H.; LIAO, Y.C. Innovation capacity and the implementation of eco-innovation: Toward a contingency perspective. **Business Strategy and the Environment**, 26 (7), 1000-1013, 2017.

TSENG, M. L.; TAN, R. R.; CHIU, A. S.; CHIEN, C. F.; KUO, T. C. Circular economy meets industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis? **Resources, Conservation and Recycling**, 131, 146-147, 2018.

TUKKER, A. Product services for a resource-efficient and circular economy—a review. **Journal of Cleaner Production**, Vol.97, pp.76-91, 2015.

TUNN, V. S.; FOKKER, R.; LUIJKX, K. A.; DE JONG, S. A.; SCHOORMANS, J. P. Making Ours Mine: Increasing Consumer Acceptance of Access-Based PSS through Temporary Product Customisation. **Sustainability**, 11, 274, 2019.

URBINATI, A.; CHIARONI, D.; TOLETTI, G. Managing the Introduction of Circular Products: Evidence from the Beverage Industry. **Sustainability**, 11, 3650, 2019.

UNITED NATIONS. SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOAL 12, 2017. Acesso realizado em 09/2018. < <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg12>>.

UNITED NATIONS. The “100% organic state” Sikkim in India wins Gold. Policies from Brazil, Denmark and Ecuador honoured with Silver Awards, 2018. Acesso realizado em 01/2019. <http://www.fao.org/agroecology/slideshow/news-article/en/c/1157015/>.

VAN DER LAAN, A.Z.; AURISICCHIO, M. A framework to use product-service systems as plans to produce closed-loop resource flows. **Journal of Cleaner Production**, 252, 119733, 2020.

VANEGAS, P.; PEETERS, J. R.; CATTRYSSSE, D.; TECCHIO, P.; ARDENTE, F.; MATHIEUX, F.; DUFLOU, J.R. Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. **Resources, Conservation and Recycling**, 135, 323-334, 2018.

VAZQUEZ-BRUST, D. A.; LISTON-HEYES, C. Environmental management intentions: An empirical investigation of Argentina's polluting firms. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 5, p. 1111-1122, 2010.

VOORHEES, C. M.; BRADY, M. K.; CALANTONE, R.; RAMIREZ, E. Discriminant validity testing in marketing: an analysis, causes for concern, and proposed remedies. **Journal of the Academy of Marketing Science**, v. 44, n. 1, p. 119-134, 2016.

WHALEN, K.; PECK, D. In the loop—sustainable, circular product design and critical materials. **International Journal of Automation Technology**, 8, 664-676, 2014.

WANG, C.; ZHAO, L.; LIM, M. K.; CHEN, W. Q.; SUTHERLAND, J. W. Structure of the global plastic waste trade network and the impact of China's import Ban. **Resources, Conservation and Recycling**, 153, 104591, 2020.

WBCSD World Business Council for Sustainable Development. Circular Metrics – Landscape Analysis. Online. Acesso realizado em 01/2019. <https://www.wbcsd.org/Programs/Energy-Circular-Economy/Factor-10/Metrics> Measurement, 2018.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introductory econometrics: A modern approach**. Nelson Education, 2020.

YIN, Robert K. et al. Design and methods. **Case study research**, v. 3, 2003.

ZHU, J.; FAN, C.; SHI, H.; SHI, L. Efforts for a circular economy in China: A comprehensive review of policies. **Journal of Industrial Ecology**, 23(1), 110-118, 2019.

APÊNDICE A – Lista de Artigos Revisados (Scopus)

Nº	Autores	Ano	Revistas
1	Franco	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
2	Selvefors et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
3	Bovea; Pérez-Beliz	2018	<i>Journal of Environmental Management</i>
4	Stewart; Niero	2018	<i>Business Strategy and the Environment</i>
5	Ackermann	2018	<i>Design Journal</i>
6	Sousa-Zomer et al.	2018	<i>Journal of Cleaner Production</i>
7	den Hollander; Bakker; Hultink	2017	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
8	Whalen; Peck	2014	<i>International Journal of Automation Technology</i>
9	Subramanian et al.	2018	<i>International Journal of Production Research</i>
10	Holtström; Bjellerup; Eriksson	2019	<i>Journal of Strategy and Management</i>
11	Bech et al.	2019	<i>Sustainability</i>
12	Kaddoura et al.	2019	<i>Sustainability</i>
13	Haziri et al.	2019	<i>Sustainability</i>
14	Richter et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
15	Halstenberg et al.	2019	<i>Sustainability</i>
16	Urbinati; Chiaroni; Toletti	2019	<i>Sustainability</i>
17	Kjaer et al.	2019	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
18	Sihvonen; Partanen	2018	<i>Journal of Cleaner Production</i>
19	Mesa; Esparragoza; Maury	2018	<i>Journal of Cleaner Production</i>
20	Sinclair et al.	2018	<i>Sustainability</i>
21	Haines-Gadd et al.	2018	<i>Sustainability</i>
22	Mandolini et al.	2018	<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
23	Atlason; Giacalone; Parajuly	2017	<i>Journal of Cleaner Production</i>
24	Almeida; Borsato; Ugaya	2017	<i>Journal of Cleaner Production</i>
25	Talens Peiró; Ardente; Mathieux	2017	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
26	Niero; Olsen	2016	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>
27	Singh; Ordoñez	2016	<i>Journal of Cleaner Production</i>
28	Moreno et al.	2016	<i>Sustainability</i>
29	Sihvonen; Partanen	2016	<i>Journal of Cleaner Production</i>
30	Peck et al.	2015	<i>Materials and Design</i>
31	Julianelli et al.	2020	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
32	Laan; Aurisicchio	2020	<i>Journal of Cleaner Production</i>
33	Sumter et al.	2020	<i>Sustainability</i>
34	Chen	2020	<i>Johnson Matthey Technology Review</i>
35	Cooper et al.	2020	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
36	Jugend et al.	2020	<i>Johnson Matthey Technology Review</i>
37	Leissner; Ryan-Fogarty	2019	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
38	Ford; Fisher	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
39	Jabbour et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
40	Dobrota et al.	2019	<i>Sustainability</i>
41	Belhadj et al.	2019	<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>

42	Sauerwein et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
43	Singh et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
44	Kristensen; Remmen	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
45	Jensen et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
46	Cong; Zhao; Sutherland	2019	<i>Journal of Mechanical Design</i>
47	Eriksen; Astrup	2019	<i>Waste Management</i>
48	Martínez et al.	2019	<i>Journal of Cleaner Production</i>
49	Tunn et al.	2019	<i>Sustainability</i>
50	Ameli; Mansour; Ahmadi-Javid	2019	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
51	Haziri; Sundin	2019	<i>Journal of Remanufacturing</i>
52	Favi C. et al.	2019	<i>Advanced Engineering Informatics</i>
53	Niu; Zhuo; Xue	2019	<i>Sustainability</i>
54	Bovea et al.	2018	<i>Journal of Cleaner Production</i>
55	Lin	2018	<i>Computers & Industrial Engineering</i>
56	Hannula et al.	2018	<i>Minerals Engineering</i>
57	Vanegas et al.	2018	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
58	Kane; Bakker; Balkenende	2018	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
59	Sumter; Bakker; Balkenende	2018	<i>Sustainability</i>
60	Bovea et al.	2018	<i>Sustainability</i>
61	Milios et al.	2018	<i>Waste Management</i>
62	Ragaert et al.	2018	<i>Polymer Engineering and Science</i>
63	Franco	2017	<i>Journal of Cleaner Production</i>
64	Lieder et al.	2017	<i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
65	Cayzer; Griffiths; Beghetto	2017	<i>International Journal of Sustainable Engineering</i>
66	De los Rios; Charnley	2017	<i>Journal of Cleaner Production</i>
67	Baxter; Aurisicchio; Childs	2017	<i>Journal of Industrial Ecology</i>
68	Hildebrandt; Bezama; Thrän	2017	<i>Waste Management & Research</i>
69	Sherwood et al.	2017	<i>Molecules</i>
70	Parajuly, Wenzel	2017	<i>Sustainability</i>
71	Bocken et al.	2016	<i>Journal of Industrial and Production Engineering</i>
72	Sabaghi; Mascle; Baptiste	2016	<i>Journal of Cleaner Production</i>
73	Bakker et al.	2014	<i>Journal of Cleaner Production</i>
74	Stegmann et al.	2020	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
75	Hagejård et al.	2020	<i>Sustainability</i>
76	Sassanelli et al.	2020	<i>Computers in Industry</i>
77	Parajuly et al.	2020	<i>Resources, Conservation & Recycling: X</i>
78	Shahbazi; Jonbrink	2020	<i>Sustainability</i>
79	Mesa et al.	2020	<i>Resources, Conservation & Recycling</i>
80	Stamminger et al.	2020	<i>Journal of Cleaner Production</i>
81	Jabbour et al.	2020	<i>Resourcer Policy</i>
82	Flood et al.	2020	<i>Journal of Cleaner Production</i>
83	Koszewska; Bielecki	2020	<i>Entrepreneurship and Sustainability Issues</i>
84	Arcos et al.	2020	<i>Journal of Cleaner Production</i>

- | | | | |
|----|------------------|------|--------------------------------------|
| 85 | Fernandes et al. | 2020 | <i>Journal of Cleaner Production</i> |
| 86 | Mendoza et al. | 2017 | <i>Journal of Industrial Ecology</i> |
| 87 | Mestre; Cooper | 2017 | <i>The Design Journal</i> |

APÊNDICE B – Questionário aplicado na etapa de estudo de casos

Pesquisa sobre o desenvolvimento de produto circular (DPC) - roteiro de entrevista

1. Características gerais da empresa

- a) Qual é o nome da companhia?
- b) Posição / função do respondente?
- c) A sua empresa pertence a um grupo? Se sim, qual?
- d) Qual é a localização da sede da empresa?
- e) Quantos funcionários sua empresa possui? Se houver filiais, considere o número da filial em que você opera.
- f) Idade da empresa (número aproximado de anos)?
- g) Qual é o setor de atividade do seu estabelecimento?
- h) Quem são os principais usuários de seus produtos?
 - () Público em geral (B2C)
 - () Outras empresas (B2B)
- i) A empresa atende mercados internacionais? (exportação de produtos):
 - () Sim
 - () Não

Em caso afirmativo: cite os 3 principais países _____
- j) A empresa é certificada pela ISO 14001?
 - () Sim
 - () Não
 - () Em processo de certificação
- k) A empresa possui departamento ou área voltada para a área de sustentabilidade ambiental?
 - () Sim
 - () Não
- l) A empresa compartilha iniciativas de sustentabilidade por meio de relatórios públicos?
 - () Sim Qual? _____
 - () Não

2. Desenvolvimento de produto circular na empresa

O DPC compreende o foco em fazer produtos em um ciclo mais fechado, considerando, recuperar, reciclar, remanufaturar, reutilizar, reparar e reformar. Se você tiver vários produtos, escolha um que seja representativo em termos de suas vendas.

- a) Quais são as suas principais pressões internas e externas no DPC (por exemplo: Regulamentações já em vigor do governo federal, Processo de certificação, funcionários, Convicções pessoais de gerentes, conselho de administração, Busca por novos mercados)? Como isso acontece?

Por favor, comente brevemente como os itens listados desempenham um papel motivador ou desencorajador no DPC.

- b) Existe alguma tecnologia que foi considerada na sua empresa (por exemplo: *internet* das coisas, computação em nuvem, *big data*, impressora 3D, inteligência artificial)? Como isso acontece?

Por favor, comente brevemente como as tecnologias listadas têm facilitado o DPC.

- c) Que critérios circulares são considerados no desenvolvimento dos produtos da empresa (por exemplo: desmontagem, reutilização, remanufatura, reciclagem)? Como isso acontece?

Dentre os aspectos listados acima, quais são as prioridades para o desenvolvimento de produtos na empresa?

- d) Por favor, comente como é tratada a questão dos impactos do produto ao longo de seu ciclo de vida? Isso é planejado durante as etapas iniciais de desenvolvimento de produtos da empresa, por exemplo?

- e) Quais são as preocupações sobre o fim da vida útil dos produtos? Como funciona a logística reversa ou a política de descarte correto, por exemplo? Esses aspectos são incorporados ao planejamento de novos produtos?

3. Desafios e motivadores para o DPC

- a) Quais seriam alguns dos desafios que a empresa enfrenta ao implementar o DPC?

- b) Quais seriam os principais incentivos ou motivos para a empresa adotar o DPC?

APÊNDICE C – Carta-convite e questionário aplicado na etapa quantitativa

Os pesquisadores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista - UNESP, gostariam de lhe convidar para participar desta pesquisa que tem como objetivo verificar e analisar relações entre desenvolvimento de produtos ambientalmente sustentáveis e o desempenho das firmas.

Esse é um projeto de pesquisa com suporte da FAPESP, e o tempo estimado para o preenchimento é de apenas 7 minutos.

Como forma de retribuir a sua participação, ao término da pesquisa, será doado o valor de R\$ 5,00 (cinco reais) por questionário preenchido para uma cooperativa de reciclagem localizada na região de Bauru (SP).

Ainda, caso tenha interesse, lhe enviaremos um relatório gerencial com os principais resultados desta pesquisa.

Informamos que os dados coletados serão utilizados apenas para fins acadêmicos e serão mantidos em confidencialidade.

A disposição para quaisquer esclarecimentos e com elevada estima,

Prof. Dr. Daniel Jugend
Universidade Estadual Paulista, UNESP – Brasil
Contato: daniel.jugend@unesp.br
Telefone: 14 31066122 r 6868

Marco Antonio Paula Pinheiro
Doutorando da Universidade Estadual Paulista, UNESP – Brasil
Contato: marco.pinheiro@unesp.br
Telefone: 14 99686-3219

Por favor, inicie a partir da questão abaixo:

1. A empresa possui atividades de desenvolvimento de produtos?

- ☐ Sim
- ☐ Não

2. Quantos funcionários possui sua empresa? Caso ela possua filiais, considere o número referente à filial em que você atua.

- ☐ 1-19 funcionários ☐ 20-99 funcionários ☐ 100-499 funcionários ☐ Acima de 500 funcionários

3. Assinale o setor que melhor caracteriza a área de atuação da empresa:

- ☐ Agro Indústria
- ☐ Alimentos, Bebidas e Tabaco
- ☐ Automotiva e Equipamentos de Transporte
- ☐ Construção Civil
- ☐ Eletroeletrônica
- ☐ Madeira e Mobiliário

- () Médico-Hospitalar
 () Metal Mecânica, Máquinas e Instrumentos
 () Química, Bioquímica, Petroquímica, Plástico ou Borracha
 () Reciclagem
 () Tecnologia da Informação (TI) – hardware ou software
 () Têxtil, Vestuário e Couro
 Outro (especifique)

5. A empresa atende a mercados internacionais? (exportação de produtos):

- () Sim. Quais? (cite os 3 principais países):
 () Não

6. A empresa é certificada pela ISO 14001?

- () Sim
 () Não

7. Nome da empresa (opcional):

8. E-mail: (opcional para recebimento do relatório gerencial):

9. Cargo do respondente:

10. Para as próximas questões, considere como desenvolvimento de produtos: Melhorias em produtos existentes e/ou produtos completamente novos.

Práticas DPC - No processo de desenvolvimento de produtos, a empresa em que você trabalha:

1.Discordo Totalmente 2.Discordo Parcialmente 3.Não Concordo nem Discordo 4.Concordo Parcialmente
 5.Concordo Totalmente

Desenvolve produtos que permitam sua reciclagem	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que permitam sua reutilização ou de seus componentes	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que permitam sua remanufatura	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que sejam de fácil manutenção	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que sejam de fácil desmontagem	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que sejam de fácil recondicionamento/ reconstrução de componentes	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que permitam a personalização ao longo do uso ou que possuam design e aparência de modo que os clientes tenham desejo de usá-los por longos períodos de tempo	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos que permitam a sua atualização - <i>updating/upgrading</i> (aspectos como a atualização de softwares, trocas ou melhorias de componentes e módulos)	1	2	3	4	5
Desenvolve produtos atrelados a sistemas de serviços (oferecendo em conjunto com os produtos serviços, tais como: treinamento, consultoria, manutenção, garantia estendida, consumo de conteúdo, dentre outros)	1	2	3	4	5

Desenvolve produtos que sejam capazes de a satisfazer múltiplos e diferentes usuários, mesmo depois de já usados (múltiplos ciclos/ recontextualização) 1 2 3 4 5

11. Indústria 4.0 - No processo de desenvolvimento de produtos, a empresa em que você trabalha:

1.Discordo Totalmente 2.Discordo Parcialmente 3.Não Concordo nem Discordo 4.Concordo Parcialmente 5.Concordo Totalmente

Utiliza conectividade da *internet* das coisas - conexão digital de objetos e dispositivos (sensores, aplicativos, RFID, TAG - identificação eletrônica, etc.) 1 2 3 4 5

Utiliza a tecnologia de computação em nuvem (armazenamento de informações, sistemas de gestão on-line) 1 2 3 4 5

Utiliza e analisa grandes volumes de dados (big data) 1 2 3 4 5

Utiliza impressora 3D (manufatura aditiva) para prototipação de partes do produto, permitindo rápida atualização e manutenção 1 2 3 4 5

Utiliza simulação e realidade aumentada 1 2 3 4 5

Utiliza inteligência artificial 1 2 3 4 5

12. *Stakeholders* - Indique o nível de importância de cada um dos elementos abaixo para a adoção das práticas ambientais de desenvolvimento de produtos pela sua empresa.

1.Nenhuma Importância 2.Baixa Importância 3.Média Importância 4.Alta Importância 5.Total Importância

Exigência de clientes por produtos ambientalmente sustentáveis 1 2 3 4 5

Regulamentações ambientais provenientes do governo federal 1 2 3 4 5

Regulamentações ambientais regionais (estaduais e/ou municipais) 1 2 3 4 5

Funcionários/Empregados 1 2 3 4 5

Alta administração/Investidores 1 2 3 4 5

Fornecedores/Suprimentos 1 2 3 4 5

13. Desempenho Ambiental

Indique em que medida você concorda que sua empresa tem alcançado os seguintes resultados de desempenho ambiental.

1.Discordo Totalmente 2.Discordo Parcialmente 3.Não Concordo nem Discordo 4.Concordo Parcialmente 5.Concordo Totalmente

A empresa tem reduzido as emissões atmosféricas (gases poluentes) 1 2 3 4 5

A empresa tem reduzido o desperdício de água e energia 1 2 3 4 5

A empresa tem reduzido a geração de resíduos sólidos 1 2 3 4 5

A empresa tem reduzido o consumo de materiais perigosos/nocivos/tóxicos 1 2 3 4 5

A empresa tem melhorado a situação ambiental (diminuição de acidentes e/ou o passivo ambiental) 1 2 3 4 5

14. Desempenho de Mercado.

Indique em que medida você concorda que sua empresa tem alcançado os seguintes resultados de desempenho de mercado.

1.Discordo Totalmente 2.Discordo Parcialmente 3.Não Concordo nem Discordo
4.Concordo Parcialmente 5.Concordo Totalmente

A empresa tem aumentado a fatia de mercado (<i>market share</i>)	1	2	3	4	5
A empresa tem lançado produtos em novos mercados	1	2	3	4	5
A empresa tem melhorado a imagem e reputação	1	2	3	4	5
A empresa tem melhorado a lucratividade	1	2	3	4	5
A empresa tem melhorado a competitividade	1	2	3	4	5

Agradecemos a participação.