

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

MARINA FERNANDES AGUIAR

**PROPOSTA DE MATRIZ DE MATURIDADE PARA O DESENVOLVIMENTO DE
NOVOS PRODUTOS SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR**

BAURU/SP

2021

MARINA FERNANDES AGUIAR

**PROPOSTA DE MATRIZ DE MATURIDADE PARA O DESENVOLVIMENTO DE
NOVOS PRODUTOS SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR**

Dissertação de mestrado apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Campus Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Jugend.

BAURU/SP

2021

Aguiar, Marina Fernandes.

Proposta de matriz de maturidade para o desenvolvimento de novos produtos sob a perspectiva da economia circular / Marina Fernandes Aguiar, 2021
155 f. : il.

Orientador: Daniel Jugend

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Economia Circular. 2. Processo de desenvolvimento de produtos. 3. Matriz de maturidade. 4. Desenvolvimento de Produtos para a Economia Circular I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARINA FERNANDES AGUIAR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de setembro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARINA FERNANDES AGUIAR, intitulada **PROPOSTA DE MATRIZ DE MATURIDADE PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS SOB A PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR**. 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. DANIEL CAPALDO AMARAL (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. VINÍCIUS PICAÑO RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / Insper Instituto de Ensino e Pesquisa. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovada. 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

*Dedico este trabalho aos meus pais, Janete e Ricardo,
e à minha irmã Camila, por serem meus exemplos,
pela compreensão, presença e apoio constantes.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir viver mais essa conquista, me iluminando durante toda minha trajetória e colocando em minha vida pessoas tão queridas e especiais.

Aos meus pais, Janete e Ricardo, por todo o amor e cuidado, por serem a minha base, meus maiores exemplos de dedicação e honestidade, por me transmitirem os valores mais importantes e por fornecerem suporte material e emocional, proporcionando tantas oportunidades e privilégios.

À minha irmã Camila, por ser a guardiã das minhas melhores memórias, por ser a voz que me diz que vai ficar tudo bem nos momentos difíceis e por me inspirar a sempre dar o melhor de mim.

Aos meus familiares e todos os meus amigos, por serem apoio e torcida, mesmo de tão longe, trazendo leveza e calma mesmo em meio a momentos de tanta incerteza.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Jugend, por desde a graduação ter sido um excelente mentor, pacientemente me guiando e apresentando aos desafios da academia, pelos incentivos para ir além e por ter me proporcionado tantas oportunidades.

Aos membros da banca avaliadora, professores Vinícius Picanço Rodrigues e Daniel Capaldo Amaral, por gentilmente avaliarem o meu trabalho e por cada sugestão para seu aprimoramento. Estendo também este agradecimento aos especialistas contatados durante a pesquisa e aos profissionais das quatro empresas, pelo seu tempo e contribuições.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, à qual entrelacei a minha história em 2013, ainda menina, e que neste período me acolheu, despertando um sentimento de pertencimento, me presenteou com amizades para toda a vida e me fez reiterar minha crença na beleza de ser uma eterna aprendiz.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Produção da UNESP de Bauru, pelo conhecimento compartilhado e pela inspiração.

Aos funcionários da UNESP de Bauru, em especial ao Gustavo, da Seção de Pós-graduação, agradeço por toda a paciência e gentileza em cada instrução; e ao Breno Ottoni, da biblioteca, pela atenção e amizade, desde a graduação.

Aos professores e pesquisadores a quem tenho como principais inspirações, agradeço especialmente à Prof^a Dra. Ana Beatriz Jabbour, por ter sido quem me introduziu à pesquisa científica na graduação; à Prof^a Dra. Paula Fiorini, pela parceria nos trabalhos desenvolvidos e gentileza em compartilhar tantas dicas; ao Prof. Dr. Bruno Castro, pela amizade e por sempre me recordar que um pesquisador precisa estar em vários lugares ao mesmo tempo; à Prof^a Dra.

Camila Poltronieri, pela amizade e oportunidade de aprender em conjunto; ao Prof. Dr. Mateus Gerolamo, por me apresentar ao conceito do “ainda não” e à coragem de nos considerarmos *lifelong learners*, e à Profª Dra. Daniela Pigosso, pelo brilhantismo com que realiza suas pesquisas e pela atenção em compartilhar suas experiências.

A todos os funcionários da área da saúde, que neste ano tão difícil foram e continuam sendo grandes heróis. Meu respeito e mais profunda admiração pela mais generosa das atitudes: garantir a sobrevivência e recuperação do próximo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo financiamento desta pesquisa.

Muito obrigada!

“... and one of the sweet uses of adversity is the genuine satisfaction which comes from hearty works of head or hand, and to the inspiration of necessity, we owe half the wise, beautiful, and useful blessings of the world.”

Louisa May Alcott

RESUMO

Nos últimos anos, vários trabalhos têm sugerido a abordagem da economia circular (EC) como alternativa ao modelo linear tradicional, o qual é baseado em extrair – fabricar – usar – descartar. Para a sua adoção, torna-se relevante incorporar princípios como os de regeneração, compartilhamento, otimização, reciclagem, remanufatura e virtualização desde a etapa de projetos de produtos. No entanto, a incorporação gradual de práticas em direção à circularidade ainda tem sido foco de poucos trabalhos, indicando uma necessidade de propor modelos, métodos e ferramentas que possam auxiliar empresas a integrar os princípios da EC no processo de desenvolvimento de produtos (PDP), de acordo com a abordagem do Desenvolvimento de Produtos Circulares (DPC). Visando contribuir com esse tema, este trabalho tem como objetivo propor uma matriz de maturidade para avaliar a integração de práticas, métodos e ferramentas da EC no PDP. Para isso, o desenvolvimento teórico e empírico da ferramenta foram combinados. Primeiramente, a revisão sistemática e de conteúdo da literatura possibilitou identificar que o DPC é um tema emergente, tendo adicionado novas estratégias de *design* àquelas já recomendadas pelo *ecodesign*. Essas novas estratégias foram incorporadas à versão inicial da matriz de maturidade, de acordo com o desempenho esperado para cada nível. O próximo passo consistiu no aprimoramento da matriz em duas etapas: por meio da avaliação de seis acadêmicos especialistas no tema, seguida pela investigação empírica de sua robustez em quatro contextos empresariais distintos. Assim, foi possível concluir que a matriz de maturidade desenvolvida é capaz de prover *insights* e direcionamentos a partir do diagnóstico e entendimento de quão circular é o atual processo de desenvolvimento de produtos, o que pode fomentar também o aprendizado organizacional nas empresas.

Palavras-chave: Economia circular; Processo de Desenvolvimento de Produtos; Matriz de Maturidade; Desenvolvimento de Produtos para a Economia Circular.

ABSTRACT

In recent years, many studies have suggested the circular economy (CE) approach as an alternative to the traditional linear model, which is based on take-make-use-dispose. For its adoption, it becomes relevant to incorporate principles such as regeneration, sharing, optimization, recycling, remanufacturing, and virtualization from the product *design* stage. However, the gradual incorporation of practices towards CE has been the focus of few studies, indicating the necessity of proposing models, methods, and tools to help companies to integrate CE practices into the new product development (NPD), following the Circular Product *Design* (CPD) approach. Aiming to contribute to this theme, this research has the general objective of proposing a maturity matrix to evaluate the integration of practices, methods, and tools of CE into the product development process of companies. To do so, the theoretical and empirical development were combined. Firstly, through the systematic and content review of literature, it was noticed that CPD is an emergent theme, having added new *design* strategies to those already recommended by *ecodesign*. These new strategies were incorporated into the first version of the maturity matrix, in accordance with the expected performance for each level. The next step consisted in improving the matrix in two contexts: through the evaluation by six experts on the theme followed by the empirical investigation of its robustness in four different organizational contexts. Therefore, it was possible to conclude that the maturity matrix can provide insights and guidance through the diagnosis and understanding of how circular is the product development process, promoting organizational learning.

Keywords: Circular economy; New product development; Maturity matrix, Circular Product *Design*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da dissertação.....	25
Figura 2 – Escolas de pensamento que influenciam o conceito de EC.....	28
Figura 3 – Modelo da Fundação Ellen MacArthur para a EC	31
Figura 4 – Integração do PDP às outras áreas funcionais.....	36
Figura 5 – Modelo de Referência de Rozenfeld et al. (2006)	36
Figura 6 – Incorporação das preocupações ambientais ao <i>Design</i> de produtos.....	37
Figura 7 – Sustentabilidade e sua integração com o desenvolvimento de produtos.....	38
Figura 8 – Circularidade a nível de produto e suas dimensões.....	40
Figura 9 – Princípio da Inércia.....	43
Figura 10 – Priorização de estratégias para aumento da circularidade.....	43
Figura 11 – Desenvolvimento de Produtos Circulares e seus componentes.....	44
Figura 12 – Habilidades de <i>Design</i> para criar produtos para ciclos fechados.....	49
Figura 13 – Dez considerações para o <i>Design</i> para a Economia Circular.....	50
Figura 14 – O processo de <i>Design</i> circular e seus componentes.....	51
Figura 15 – Estágios evolutivos do CMMI.....	59
Figura 16 – Modelo de maturidade de Rozenfeld (2006)	61
Figura 17 – Rede de coocorrência de palavras-chave da busca inicial.....	63
Figura 18 – Requisitos para mudança de nível em Gouvinhas et al. (2016)	66
Figura 19 – Roteiro para a elaboração de uma matriz de maturidade.....	70
Figura 20 – Protocolo de seleção dos artigos da revisão sistemática.....	73
Figura 21 – Fluxo metodológico para aprimoramento da matriz.....	80
Figura 22 – Evolução temporal das publicações.....	82
Figura 23 – Visão holística das informações bibliométricas.....	83
Figura 24 – Distribuição geográfica das publicações selecionadas.....	84
Figura 25 – Rede de palavras-chave com três coocorrências.....	85
Figura 26 – Rede de palavras-chave com quatro coocorrências.....	86
Figura 27 – Sistematização das estratégias de DPC.....	87
Figura 28 – Abordagens do DPC mais enfatizadas pela literatura.....	91
Figura 29 – Abordagens do DPC por ano.....	92
Figura 30 – Resultados da Empresa A.....	118
Figura 31 – Resultados da Empresa B.....	121
Figura 32 – Resultados da Empresa C.....	124

Figura 33 – Resultados da Empresa D.....	126
Figura 34 – Alinhamento das dimensões propostas com as particularidades do DPC.....	133
Figura 35 – Classificação geral das empresas em relação aos níveis de maturidade.....	134

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Ações do modelo ReSOLVE.....	33
Quadro 2 – Estratégias circulares e abordagens para o <i>Design</i>	46
Quadro 3 – Definições e exemplos de competências circulares para o <i>Design</i>	47
Quadro 4 – Nove competências de economia circular para o <i>Design</i>	48
Quadro 5 – Síntese das principais competências necessárias ao <i>Design</i> circular.....	53
Quadro 6 – Diferenças entre matriz e modelo de maturidade.....	57
Quadro 7 – Diferenças entre as representações do CMMI.....	58
Quadro 8 – Palavras-chave da busca inicial.....	62
Quadro 9 – Níveis de maturidade do EcoM2.....	64
Quadro 10 – Abordagens para a avaliação de práticas de gestão.....	68
Quadro 11 – Informações gerais dos especialistas.....	75
Quadro 12 – Caracterização das empresas.....	76
Quadro 13 – Perfil dos entrevistados.....	78
Quadro 14 – Principais abordagens do DPC.....	88
Quadro 15 – Breve descrição dos trabalhos que abordam indicadores do DPC.....	93
Quadro 16 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz.....	95
Quadro 17 – Versão inicial da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP).....	101
Quadro 18 – Versão final das dimensões para desenvolvimento da matriz.....	107
Quadro 19 – Versão final da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP).....	113
Quadro 20 – Comparativo entre os modelos e matrizes de maturidade.....	130
Quadro 21 – Principais abordagens de <i>Design</i> apontadas pelas empresas.....	135
Tabela 1.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Análise do Ciclo de Vida

B2B – *Business to business*

C2C – *Cradle to Cradle*

CMMI – *Capability Maturity Model*

CPD – *Circular Product Design*

DfX – *Design for X*

DPC – Desenvolvimento de Produtos Circulares

EC – Economia Circular

EMF – *Ellen MacArthur Foundation*

EoL – *End of life*

IRP – *International Resource Panel*

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU - Organização das Nações Unidas

PDP – Processo de Desenvolvimento de Produtos

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PSS - *Product Service System*

SEI - *Software Engineering Institute*

TI – Tecnologia da informação

V&V – Verificação e Validação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização da pesquisa	17
1.2	Justificativa de pesquisa	21
1.3	Questões e objetivo de pesquisa	24
1.4	Estrutura da dissertação	25
2	REVISÃO TEÓRICA	27
2.1	Economia Circular (EC)	27
2.2	Desenvolvimento de Produtos Circulares (DPC)	35
2.3	Competências e habilidades para o <i>design</i> de produtos circulares	46
2.4	Modelos e matrizes de maturidade	54
2.4.1	<i>Principais conceitos e definições</i>	54
2.4.2	<i>Capability Maturity Model Integration (CMMI)</i>	57
2.4.3	<i>Análise crítica dos modelos de maturidade relacionados à sustentabilidade e desenvolvimento de produtos</i>	60
2.4.4	<i>Abordagens para a avaliação de práticas de gestão</i>	68
3	MÉTODO DE PESQUISA	70
3.1	Fase 1 – Planejamento	71
3.2	Fase 2 – Desenvolvimento	72
3.3	Fase 3 - Avaliação	74
4	RESULTADOS	81
4.1	Resultados da revisão sistemática de literatura	81
4.1.1	<i>Panorama de pesquisa</i>	81
4.1.2	<i>Análise de redes de coocorrência de palavras-chave</i>	84
4.1.3	<i>Estratégias e abordagens identificadas pela revisão sistemática</i>	87
4.1.4	<i>Indicadores para o Desenvolvimento de Produtos Circulares</i>	92
4.2	Versão inicial da matriz de maturidade	94
4.3	Versão final da matriz de maturidade	104
4.4	Análise dos resultados	118
5	DISCUSSÕES	130
5.1	Análise comparativa com os modelos anteriores	130
5.2	Análise e interpretação dos resultados empíricos	134
6	CONCLUSÕES	137

6.1	Principais resultados obtidos.....	137
6.2	Implicações teóricas e gerenciais	138
6.3	Limitações da pesquisa e direcionamentos futuros.....	139
	REFERÊNCIAS.....	141
	APÊNDICE A - Carta convite enviada aos especialistas por e-mail	153
	APÊNDICE B – Mensagem enviada aos profissionais.....	154
	APÊNDICE C – Questionário para caracterização da empresa.....	155

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da pesquisa

Nos últimos 150 anos, o modelo linear de produção e consumo tem sido a abordagem predominante na indústria e mercados de consumo (LINDER; WILLIANDER, 2017). As origens deste modelo, baseado em “extrair – fabricar – usar – descartar”, datam da Revolução Industrial, sendo que a economia global foi desenvolvida tomando-o como base. Na economia linear, também chamada “economia do processamento” ou “economia do lixo”, o processo industrial tem por base o fluxo unidirecional de materiais, com a transformação da matéria-prima em um produto final e posteriormente em um resíduo descartável (ELIA; GNONI.; TORNESE, 2017).

Devido a fatores como a mecanização, o desenvolvimento de novos sistemas de energia e a divisão do trabalho, houve um significativo aumento da quantidade, variedade e velocidade de produção ao longo da primeira e segunda revoluções industriais (ANDREWS, 2015). Além disso, o modelo linear foi incentivado e reforçado pela chamada obsolescência programada, cujo propósito é o de que os bens de consumo se tornem rapidamente obsoletos e sejam substituídos. Inicialmente proposta em 1932 como meio de estimular o mercado a se recuperar da queda da bolsa de valores em 1929, ainda é praticada atualmente, especialmente em produtos eletrônicos (ANDREWS, 2015).

O modelo da economia linear é movido pela premissa do equilíbrio entre a oferta e a demanda do planeta (GOYAL; ESPOSITO; KAPOOR, 2018). Entretanto, conforme aponta o levantamento realizado pela Fundação Ellen MacArthur (2014), não há precedentes para o atual desafio de expandir a oferta para atender a demanda futura. A garantia de recursos se torna um problema urgente ao passo que mais matéria-prima é consumida do que o montante que pode ser extraído globalmente (MESTRE; COOPER, 2017). A situação é de “sobrecarga ecológica”, ou seja, a demanda humana sobre o planeta (pegada ecológica) é maior que a capacidade da natureza de repor os recursos e absorver os resíduos (biocapacidade) (WEETMAN, 2019).

Os encontros internacionais, como o Protocolo de Kyoto, o Acordo de Copenhague e o Acordo de Paris, que reuniram discussões a respeito das mudanças climáticas e da sustentabilidade, têm destacado a crescente preocupação de diversos países nesse sentido (MENDONÇA et al., 2020). Além disso, de acordo com o relatório da Organização das Nações

Unidas - ONU (2013), a população mundial alcançou 7,2 bilhões em 2013, dos quais a grande maioria de 82,5 por cento, correspondente a 5,9 bilhões, vive em regiões menos desenvolvidas. A projeção para 2050 é de 9,6 bilhões de pessoas, sendo que se espera que a maior parte deste crescimento seja advinda de países em desenvolvimento (UN, 2013).

Destaca-se também, neste sentido, a estimativa da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), de que o grupo de classe média com renda disponível sofrerá um considerável aumento, de 1,8 bilhão em 2010 para 5 bilhões em 2030. Este crescimento da população, do poder de compra e do consumo tem causado um impacto sem precedentes na demanda de muitos recursos (ANDREWS, 2015). Uma vez mais escassos, se tornam mais caros. Gestores dos setores públicos e privados se mostram preocupados com a volatilidade dos preços, inclusive de recursos básicos, como água, alimentos e energia (WEETMAN, 2019). Nesse ritmo, as reservas de alguns metais se esgotarão nos próximos 50 anos (OHDE et al., 2018). À luz das diversas questões sociais, econômicas e ambientais atuais, esta conjuntura se mostra frágil e insustentável (ANDREWS, 2015), impondo o desafio de se buscar maneiras para manter o consumo sem aumentar a demanda por recursos (OHDE et al., 2018).

Uma das alternativas contemporâneas que emerge visando mitigar os efeitos da economia linear é a busca pelos modelos circulares (GUSMEROTTI et al., 2019). O reconhecimento dos limites do uso de energia e dos recursos globais, além da importância de se considerar o planeta como um “sistema” em que a poluição e os resíduos são vistos como perdas, constituem os fundamentos da lógica da Economia Circular (BOCKEN et al., 2016). Baseada em abordagens anteriores como o *Cradle to Cradle* e a Ecologia Industrial, a Economia Circular (EC) introduz uma perspectiva para o ecossistema industrial, em que o crescimento econômico é dissociado do consumo de recursos e emissões poluentes, ao passo que os materiais e produtos em fim de vida são concebidos novamente como recursos, e não como resíduos (ELIA; GNONI.; TORNESE, 2017).

O modelo circular foca em um cuidadoso alinhamento e gerenciamento do fluxo de recursos pela cadeia de valores integrando logística reversa, inovação de projeto, ecossistema colaborativo e inovação no modelo de negócios. Para que isso seja possível, torna-se necessário configurar o ecossistema para a disponibilidade prolongada de recursos, obtida por meio de práticas como redução do uso, reuso e reciclagem. Isso implica reconfigurar o fluxo de materiais da abordagem linear (recurso – produto – resíduo) para uma abordagem de ciclo fechado (recurso – produto – resíduo – novo produto) (GOYAL; ESPOSITO; KAPOOR, 2018).

Diferentemente do modelo linear, a EC baseia-se no princípio de “fechar o ciclo de vida” dos produtos, reduzindo o consumo de matérias-primas, de energia e água. Em uma EC, preserva-se os valores econômico e ambiental dos materiais pelo maior tempo possível mantendo-os no sistema econômico, tanto por meio do prolongamento da vida dos produtos ou pelo retorno ao sistema para serem reusados (den HOLLANDER; BAKKER; HULTINK, 2017). Além disso, a adoção da EC tende a promover também novas relações entre as empresas, por meio das chamadas redes simbióticas colaborativas (WEETMAN, 2019), tornando-as, ao mesmo tempo, consumidoras e fornecedoras de materiais reincorporados ao ciclo de produção (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2014).

No contexto da crescente população e padrões globais de consumo que se mostram insustentáveis, o *design* sustentável de produtos ganha maior relevância (MESTRE; COOPER, 2017). Segundo Brundage et al. (2018), durante o ciclo de vida de um produto, a possibilidade de reduzir o impacto ambiental de cada estágio se torna menor à medida que o produto avança pelo ciclo de vida. Com base nisso, a fase de projeto conceitual (*conceptual design*), em que se inicia o ciclo de vida do produto, tem recebido atenção dos pesquisadores extensivamente (BRUNDAGE et al., 2018). Sarkis e Dou (2017) apontam que existe um princípio básico relacionado ao *design* que declara que nos estágios iniciais do projeto do produto, cerca de 70 a 80 por cento dos seus custos de produção são determinados e fixados. O relatório do Painel Internacional de Recursos (*International Resource Panel - IRP*) pontua que esse cenário se repete na análise dos impactos ambientais – cerca de 80 por cento do impacto ambiental de um produto é definido na fase de projeto do produto (NASR et al., 2018).

Desing, Braun e Hischier (2021) e Brundage et al. (2018) ressaltam que após a conclusão do projeto detalhado do produto, algumas características importantes são definidas, como sua geometria, especificações e planos iniciais de produção, incluindo a qualidade e quantidade de matéria-prima e energia necessárias. Sob a perspectiva ambiental, esses atributos influenciam significativamente os estágios seguintes do ciclo de vida do produto, interferindo, por exemplo, nas taxas de refugo do processo produtivo e nas opções de destino final após o fim de vida. Dessa forma, Brundage et al. (2018) estabelecem que a fase de *design* do produto lança uma “sombra ambiental” (BRUNDAGE et al., p. 878, tradução nossa) ao longo das fases posteriores do seu ciclo de vida.

Nesse sentido, nota-se que as abordagens de *design* expandiram progressivamente seu foco. Inicialmente, tratavam a sustentabilidade de forma isolada, como, por exemplo, somente um ator da cadeia esforçando-se para a melhoria de aspectos pontuais, como a reciclabilidade.

Mais recentemente, essas abordagens passaram a adotar uma perspectiva sistêmica, englobando um maior grau de complexidade e demandando uma maior variedade de atores (DOKTER; THUVANDER; RHAË, 2021).

Dessa forma, atualmente muitas empresas estão se esforçando para criar modelos de negócio alinhados à abordagem da economia circular, buscando fechar o ciclo de recursos. Em contrapartida, uma condição necessária ao bom efeito desses esforços é a incorporação das metas circulares ao *design* de produtos, dado que a maior parte do desempenho ambiental de um produto é definido nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento (ALBÆK et al., 2020). Ademais, a integração de aspectos ambientais durante o desenvolvimento de produtos pode gerar oportunidades para a organização, não apenas relacionadas à diminuição do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do produto, mas também auxiliando na melhoria de sua imagem e no aumento da capacidade inovativa (DANGELICO, 2017).

Assim, o processo de desenvolvimento de produtos (PDP) desempenha um papel de destaque para a adoção da EC, mediante a incorporação dos princípios da circulação de materiais e de energia desde a fase de pré-desenvolvimento (GENG; DOBERSTEIN, 2008). Bovea e Pérez-Belis (2018) ressaltam que pela perspectiva da EC, aspectos como reuso, reciclagem, remanufatura e atualização devem ser integrados ainda nas atividades de projeto de produtos. Ao adotar esses princípios, busca-se manter os produtos no sistema econômico, evitando ao máximo a extração de matéria-prima virgem da natureza (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; den HOLLANDER; BAKKER; HULTINK, 2017).

No contexto da transição para a EC, os projetistas são apresentados ao desafio de criar produtos robustos em termos de funcionalidade e recursos empregados, seguindo os princípios da circularidade e considerando que eles serão mantidos em uso pelo maior tempo possível (RUIZ-PASTOR et al., 2021). Isso implica em delinear os requisitos e especificações do produto tendo em mente o propósito desejado e aumentando sua performance sustentável por múltiplos ciclos de vida (DIAZ et al., 2021). Segundo Ohde et al. (2018), já na fase de conceito e primeira manufatura, deve-se levar em consideração, por exemplo, a reutilização do produto. Para isso, busca-se integrar requisitos como o uso de materiais reciclados, recicláveis, não perigosos e que permitam fácil desmontagem e reaproveitamento de componentes desde as etapas de projeto de produto (OHDE et al., 2018).

Apesar da relevância da citada integração, trabalhos como Gusmerotti et al. (2019) e Sassanelli et al. (2019) salientam que a medição e avaliação de performances circulares ainda

não é uma prática comum entre as empresas e estudos e propostas de incorporação gradual de práticas em direção à circularidade têm sido foco de poucos trabalhos (GUSMEROTTI et al., 2019). Ademais, também não é claro de que maneira é possível identificar o grau de incorporação de práticas recomendadas pela EC em um contexto real de desenvolvimento de produtos.

Assim, há uma necessidade de propor modelos, métodos e ferramentas que possam auxiliar as empresas a integrar os princípios circulares ao processo de desenvolvimento de produtos, considerando os diferentes níveis de performance e complexidade deste processo. Esta é a lacuna que esta pesquisa se propõe a preencher, amparando-se na concepção de que a comunicação das melhores práticas é facilitada pelo uso de modelos e matrizes de maturidade, por meio da síntese de conhecimento para utilização em iniciativas de melhoria (HELGESSION; HÖST; WEYNS, 2012). De acordo com Bititci et al. (2015), a abordagem de maturidade provê um duplo benefício: ao mesmo tempo em que promove reflexões entre o time de gestão, facilitando o processo de aprendizagem organizacional, também provê uma estrutura para a análise e revisão de práticas organizacionais, fomentando a melhoria contínua.

1.2 Justificativa de pesquisa

Diversas publicações têm ressaltado a EC como uma das principais abordagens para a promoção da sustentabilidade ambiental (KORHONEN et al., 2018; PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018; SIHVONEN; PARTANEN, 2017), sendo também considerada uma de suas principais tendências (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; MCALOONE; PIGOSSO, 2017; SINGH; ORDOÑEZ, 2016), uma vez que incentiva a busca por desacoplar o crescimento econômico da utilização de recursos naturais (OHDE et al., 2018). O conceito da EC identifica a relevância do valor da matéria-prima que é perdido e o impacto ambiental imposto pela produção de bens a partir da extração de materiais, uso e descarte após um ciclo único (BAKKER; BALKENENDEAND; POPPELAARS, 2018).

Mesmo com este reconhecimento, o emprego das práticas da EC parece ainda não estar bem disseminado na indústria e existem desafios para a sua efetiva adoção (LINDER; WILLIANDER, 2017). Do ponto de vista da inovação, autores como Bocken et al. (2016) e Lüdeke Freund, Gold e Bocken (2019) ressaltam que a mudança de paradigma da economia linear tradicional para a circular pode ser entendida como uma inovação gerencial e não

somente de produto e de processo. Neste contexto, Ritzén e Sanström (2017) consideram que a EC pode ser vista até mesmo como uma inovação do tipo radical.

Devido às dificuldades envolvidas nessa transição, Bocken et al. (2017) observaram que o interesse pela adoção das práticas de EC tem crescido notavelmente nos últimos anos. Pesquisas sobre EC têm destacado que sua adoção depende do processo de desenvolvimento de produtos (PDP) (BOVEA; PÉREZ-BELIS, 2018; PINHEIRO et al., 2019; VANEGAS et al., 2018) e, especialmente, das atividades de projeto de produtos (PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018; SIHVONEN; PARTANEN, 2017). A integração das questões relativas à EC em um estágio inicial do processo de *design* de produtos é considerada relevante, uma vez que no momento em que as especificações do produto estão sendo elaboradas, usualmente apenas pequenas alterações são possíveis. Uma vez alocados os recursos, a infraestrutura e as atividades para o desenvolvimento do produto, torna-se mais difícil realizar mudanças (BOCKEN et al., 2016).

De acordo com Sihvonen e Partanen (2017), amparando-se nos princípios da EC, os produtos desenvolvidos não devem somente gerar menores impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida, mas, também, terem o seu uso prolongado, otimizado e compartilhado entre clientes. Isso pode ocorrer inclusive pela adoção de recursos de tecnologia da informação e da *internet*, diminuindo, assim, a extração de recursos virgens da natureza e os impactos ambientais decorrentes da produção, transporte e descarte inadequados de produtos (EMF, 2015; PINHEIRO et al., 2019).

Apesar do destaque recente que a EC vem recebendo dos estudos de sustentabilidade e gestão ambiental, as práticas para a integração da EC no PDP ainda carecem ser melhor investigadas. Mesmo internacionalmente, observa-se que são poucos os trabalhos que analisam as relações práticas entre a EC e o PDP. Além disso, ainda não é claro quais seriam as práticas adequadas e os impactos para as firmas na transição de uma economia linear para circular (GUSMEROTTI et al., 2019; KORHONEN et al., 2018).

Assim, como primeiro passo para a realização desta pesquisa, uma busca inicial por trabalhos que tratassem de propostas e implementações de modelos e matrizes de maturidade em sustentabilidade foi realizada, utilizando como método a revisão bibliográfica sistemática. Sua operacionalização é descrita na seção 2 deste trabalho. Foi possível identificar somente seis trabalhos nessa temática. Hynds et al. (2014) desenvolveram uma ferramenta de avaliação da maturidade destinada a medir os esforços em sustentabilidade da organização em várias

dimensões do processo de desenvolvimento de novos produtos, agrupadas em duas categorias (ferramentas e estratégia). Já Teixeira e Canciglieri Junior (2019) adicionaram a perspectiva do planejamento estratégico para apresentar um novo modelo, integrando os aspectos de sustentabilidade ao processo de desenvolvimento de produtos. Três outros trabalhos trataram diretamente dos níveis de maturidade em *ecodesign*. Pigosso, Rozenfeld e McAloone (2013) desenvolveram o *Ecodesign Maturity Model* (EcoM2), apoiando organizações com o processo de implementação do *ecodesign*. Gouvinhas et al. (2016) desenvolveram um *framework* para autoavaliação que permite às empresas um melhor entendimento de quais ações necessitam ser tomadas antes de implementarem ferramentas do *ecodesign*. Já Moultrie, Sutcliffe e Maier (2016) também estudaram esta abordagem, com foco no *design* de dispositivos médicos. Mais recentemente, Sehnem et al. (2019) examinaram modelos de negócio de empresas brasileiras para identificar os setores engajados com a EC, avaliando também o nível de maturidade de tais modelos.

A seção 2, de Revisão Teórica, é composta por uma subseção de análise destes seis trabalhos, em que foi possível verificar que nenhum deles trata especificamente da integração da EC ao processo de desenvolvimento de produtos. Essa constatação corrobora o ponto de vista defendido por Dokter, Thuvander e Rahe (2021), os quais destacam a importância de se distinguir o conceito de desenvolvimento sustentável adotado pelas perspectivas da economia linear e da circular. Sauvé, Bernard e Sloan (2016) apontam que para a economia linear, a ênfase dada ao desenvolvimento sustentável está nas ações de redução de resíduos, reciclagem e redução da poluição. Em contrapartida, para a economia circular, o esforço não está em otimizar o que já existe, mas sim em repensar o *modus operandi*, partindo da ideia de um ciclo fechado de recursos que evita a geração de resíduos (DOKTER; THUVANDER; RHAHE, 2021). Ademais, o *Design* de Produtos Circulares possui características que o distinguem do *ecodesign*, como a sensibilização dos consumidores com o conceito da EC (SELVEFORS et al., 2019) e a busca pela preservação do capital natural, evitando ao máximo a extração de matéria-prima virgem da natureza (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Além disso, faz-se necessário destacar que, apesar das similaridades entre modelos e matrizes de maturidade, uma vez que ambos visam a melhoria contínua de processos e de níveis de capacidades, a terminologia utilizada nesse trabalho será a de “matriz”, dado que, como verificaram Maier, Moultrie e Clarkson (2012), é equivocado o uso deste termo como sinônimo de modelo. As matrizes possuem como estrutura o arranjo por meio de grade entre os níveis de maturidade, com o uso de células com a descrição dos traços característicos de desempenho em

cada nível. Assim, podem ser consideradas ferramentas de diagnóstico e de melhoria menos complexas em relação aos modelos, que geralmente fazem uso de escala Likert, questionários binários (sim ou não) e *checklists* para o seu desenvolvimento e proposição (MAIER; MOULTRIE; CLARKSON, 2012).

1.3 Questão e objetivos de pesquisa

Diante do apresentado e discutido nesse capítulo, o presente trabalho foi motivado pelas seguintes questões: (i) *“Como empresas podem incorporar gradativamente as práticas, métodos e ferramentas da EC em seu PDP?”*; ii) *“Como avaliar a intensidade dessa integração da EC no PDP destas empresas?”*.

Tendo em vista que atualmente a EC é uma das principais vertentes para promover a sustentabilidade ambiental (KORHONEN et al., 2018; PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018) e que as práticas associadas ao PDP desempenham importante papel em sua operacionalização (SIHVONEN; PARTANEN, 2017), o objetivo geral deste trabalho consiste em propor uma matriz de maturidade para avaliar a integração de práticas, métodos e ferramentas da EC no PDP de empresas. Para que esse objetivo geral seja alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

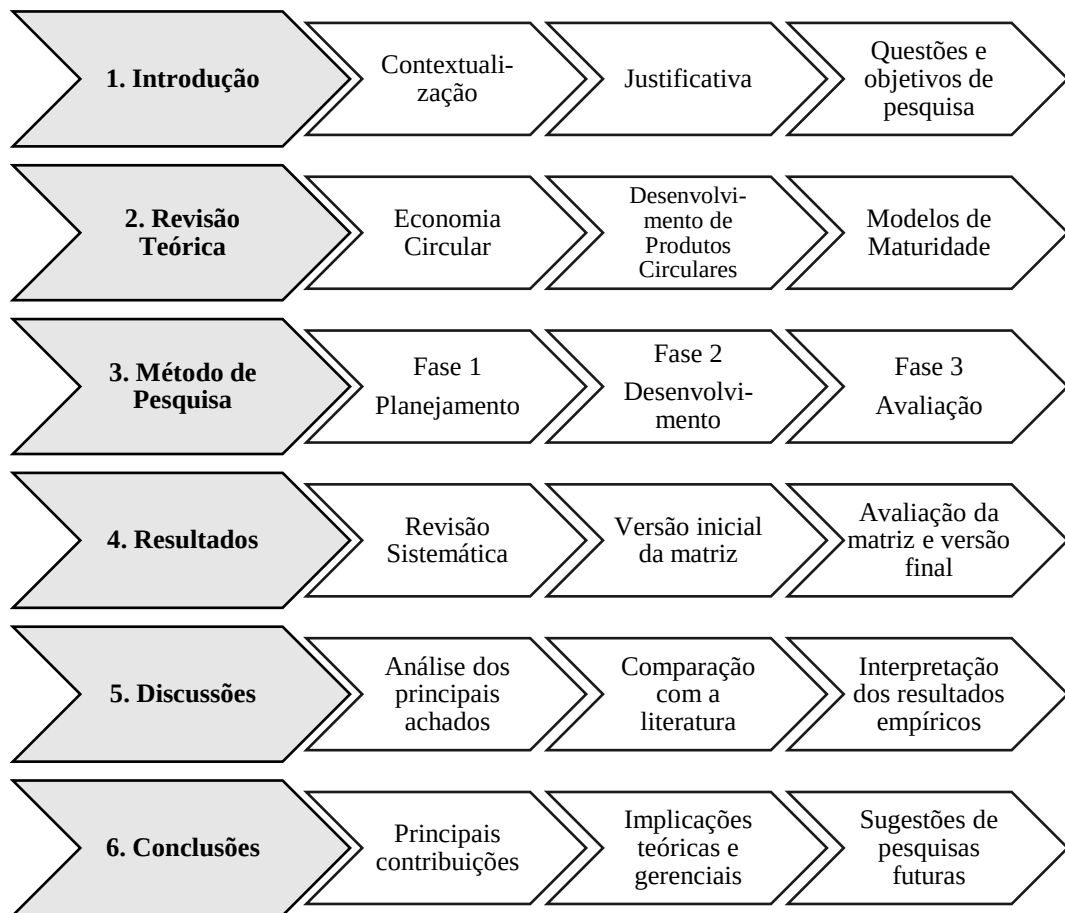
- I) Revisão do estado da arte referente às abordagens de maturidade para o desenvolvimento de produtos e sistematização das principais práticas, métodos e ferramentas propostas pela EC e que sejam aplicadas ao PDP;
- II) Desenvolvimento teórico da matriz de maturidade para integração das práticas, métodos e ferramentas da EC no PDP, estabelecendo as dimensões de análise;
- III) Verificação da consistência e robustez da matriz, com aprimoramento da versão teórica após análise de especialistas da academia;
- IV) Avaliação da utilidade e usabilidade da matriz em contextos de empresas que desenvolvem produtos.

Destaca-se que no capítulo 3, referente ao Método de Pesquisa, há o detalhamento da maneira com que serão atendidos tais objetivos e respondidas as questões de pesquisa.

1.4 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório inicial, composto pelos tópicos de contextualização, justificativa, questão e objetivos de pesquisa, este trabalho é composto por outros cinco capítulos. A Figura 1 ilustra a estrutura da dissertação, apresentando a sequência das seções e os tópicos tratados em cada uma delas.

Figura 1 – Estrutura da dissertação



Fonte: Elaborada pela autora.

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura pertinente aos temas a serem abordados, explorando os principais conceitos referentes à EC, *Circular Product Design (CPD)* ou Desenvolvimento de Produtos Circulares (DPC)¹ e modelos e matrizes de maturidade.

No capítulo 3, há a descrição do método de pesquisa adotado para cumprir o objetivo proposto. Para isso, foi realizado o desdobramento em três fases: a Fase 1, de planejamento,

¹ Nota-se que o termo *Circular Product Design (CPD)* está se firmando na literatura, dado o crescente interesse da academia no tema. Para facilitar o entendimento do leitor, será utilizada neste trabalho a denominação Desenvolvimento de Produtos Circulares, bem como sua sigla – DPC -, que corresponde à tradução para a língua portuguesa do termo supracitado.

que compreende a identificação do *gap* na literatura e caracterização da busca efetuada; a Fase 2, de desenvolvimento, englobando a sequência de atividades presentes para elaborar a versão inicial da matriz; e, por fim, a Fase 3, de avaliação, com a descrição do procedimento de análise por parte dos especialistas no tema e também em contextos empresariais reais, por meio de entrevistas com profissionais.

O capítulo 4 é destinado à apresentação dos resultados obtidos em cada atividade das fases acima citadas, culminando com a incorporação das melhorias sugeridas e versão final da matriz. O capítulo 5 corresponde à discussão, promovendo a associação entre os resultados e evidências encontradas com a literatura. Finalmente, no capítulo 6, encerra-se o presente trabalho com as conclusões obtidas, as limitações enfrentadas e as possibilidades de pesquisas futuras.

2 REVISÃO TEÓRICA

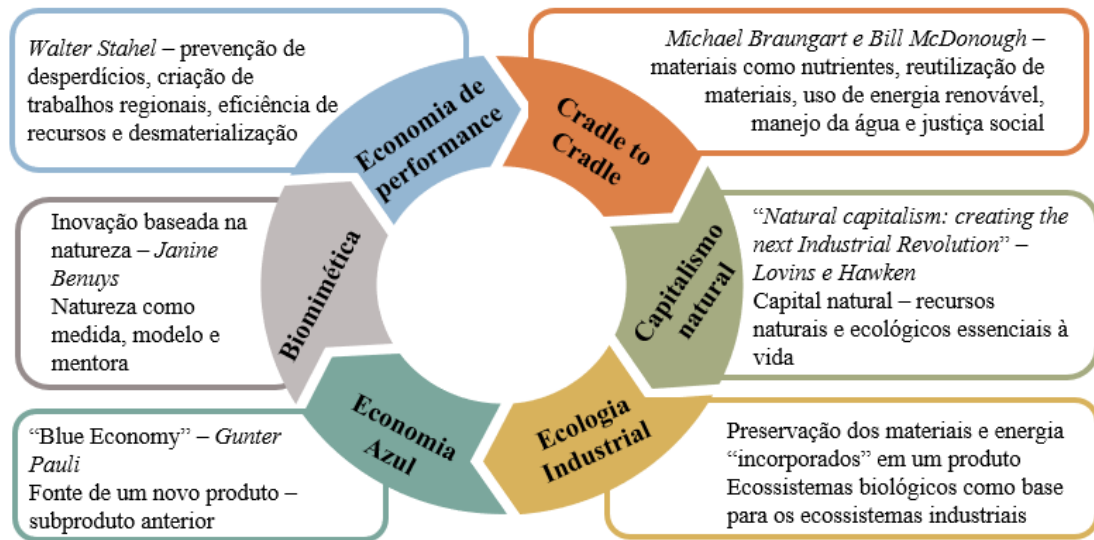
Neste capítulo é apresentada a estrutura conceitual teórica a respeito dos temas tratados neste trabalho, com a explanação dos conceitos fundamentais relacionados à EC, ao DPC e aos modelos e matrizes de maturidade. Buscou-se evidenciar as práticas, métodos e ferramentas para a integração da EC no contexto de desenvolvimento de produtos, bem como ressaltar a importância de se avaliar o grau de incorporação dessas práticas por meio das ferramentas de maturidade.

2.1 Economia Circular (EC)

O conceito de EC tem muitas variantes. Do ponto de vista acadêmico, existe uma falta de consenso e várias definições coexistem, além da influência de um rico conjunto de escolas de pensamento (HOMRICH et al., 2018). Alguns autores, como Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), Su et al. (2013) e Geissdoerfer et al. (2017), atribuem a Pearce e Turner (1990) a introdução do conceito da EC. Esta associação se justifica no fato de esses dois autores terem investigado a influência dos recursos naturais nos sistemas econômicos e os impactos que essa perspectiva linear provoca (HOMRICH et al., 2018).

Nos últimos anos, de acordo com Geissdoerfer et al. (2017), o entendimento da EC e suas aplicações práticas passou a incorporar contribuições de uma gama de conceitos que compartilham a ideia de ciclo fechado (*closed loop*). Entre essas chamadas “escolas de pensamento”, destacam-se a economia de performance, a filosofia *Cradle to Cradle* (C2C – “berço ao berço”), o capitalismo natural, a ecologia industrial, a abordagem *Blue Economy* e a biomimética (HOMRICH et al., 2018; SENAI, 2020; WEETMAN, 2019), conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Escolas de pensamento que influenciam o conceito de EC



Fonte: Baseado em Homrich et al. (2018); Weetman (2019) e SENAI (2020).

A economia de desempenho ou de performance, idealizada por Walter Stahel, diz respeito à uma economia que dispõe de estratégias industriais para a prevenção de desperdícios, criação de trabalhos regionais, eficiência de recursos e desmaterialização (GEISSDOERFER et al., 2017). Um de seus principais instrumentos é o *Product-Life Institute*, que promove a venda de serviços ao invés de bens, combinando o *design* sistêmico, a inovação técnica e comercial (WEETMAN, 2019). Stahel cunhou o termo “*cradle to cradle*”, sendo que Michael Braungart e Bill McDonough continuaram a desenvolvê-lo, criando a certificação *Cradle to Cradle*. O modelo atual foca nos seguintes princípios para a melhoria contínua: saúde dos materiais (considerados como nutrientes), reutilização de materiais, uso de energia renovável, manejo da água e justiça social (WEETMAN, 2019). Dessa forma, pode-se dizer que o modelo “*cradle to cradle*”, “*do berço ao berço*”, se configura como uma alternativa ao modelo linear (“*cradle to grave*” – “do berço ao túmulo”) (SENAI, 2020).

A abordagem do capitalismo natural advém da publicação do livro “*Natural Capitalism: Creating the next Industrial Revolution*”, de Amory e Hunter Lovins e Paul Hawken. O capital natural pode ser entendido como os recursos naturais e ecológicos que são essenciais à vida dos seres vivos e cuja substituição pode ser muito complexa ou até mesmo impossível. Os autores do livro alertam para a escassez desses recursos e listam quatro princípios do capitalismo natural: o aumento da produtividade dos recursos naturais, a produção com inspiração na biologia, a adoção de modelos de fluxo contínuo de serviços e o reinvestimento em capital natural (WEETMAN, 2019).

A Ecologia Industrial se baseia no princípio da preservação dos materiais e energia “incorporados” em um produto, ou seja, que foram utilizados em seu processo de produção até a obtenção do produto final (WEETMAN, 2019). Nesta abordagem, os padrões observados nos ecossistemas biológicos são usados como modelo para os ecossistemas industriais, sendo que a produtividade destes é menos dependente da extração de recursos (HOMRICH et al., 2018).

Já a Economia Azul (*Blue Economy*), proposta pelo empresário Gunter Pauli, busca inspiração nos sistemas oceânicos para o desenvolvimento de processos inovadores, mediante o “cascateamento” de nutrientes e energia. Nessa abordagem, defende-se que a fonte de um novo produto pode ser um subproduto anterior (WEETMAN, 2019), tomando como base os princípios de preservação da biodiversidade, do uso da energia solar e alinhamento dos modelos de negócio com as características particulares de cada região (SENAI, 2020). Uma outra escola de pensamento que influencia o modelo circular é a biomimética, a chamada “inovação baseada na natureza”, idealizada pela cientista Janine Benyuys, a qual a define como uma nova disciplina que se destina a estudar os padrões da natureza e então se esforça em imitar esses *designs* e processos para a solução de problemas humanos. Assim, a biomimética considera a natureza como modelo, medida e mentora.

Recentemente, a EC vem recebendo atenção de empresas, *think tanks* (instituições dedicadas a produzir e difundir conhecimento sobre temas políticos, econômicos ou científicos por meio da publicação de estudos, artigos e da participação de seus integrantes na mídia) e grupos de negócios. Ao se afastarem do tradicional sistema “extrair, produzir, descartar”, as organizações estão adotando abordagens circulares, impulsionadas por iniciativas políticas e trabalhos de consultores globais (WEETMAN, 2019).

A Fundação Ellen MacArthur, uma das atuais organizações que promove a EC a nível mundial, definiu quatro “blocos construtivos” para a adoção da EC (EMF, 2013; ELIA; GNONI.; TORNESE, 2017):

1. Design da Economia Circular: engloba a construção de novas competências para a adoção de uma abordagem diferente para o *design* de produtos, a qual facilite o reuso, a reciclagem e o cascadeamento, em que o resíduo de um processo passa a ser *input* de outro produto. Seus objetivos são a durabilidade e facilidade de reutilização no estágio de fim de vida, a consideração de possíveis aplicações para os subprodutos e resíduos, além de evitar o uso de substâncias perigosas;

2. Novos modelos de negócios: compreende tanto a substituição de modelos existentes quanto o aproveitamento de novas oportunidades, destacando o papel das grandes empresas como impulsionadoras do *mindset* circular ao explorar suas características de escala e integração vertical. Um exemplo que está sendo amplamente adotado diz respeito aos sistemas produto-serviço em contraposição à propriedade do produto;

3. Ciclos reversos: novas habilidades e abordagens são necessárias para promover o cascadeamento e o retorno final dos materiais para o solo ou de volta para o sistema produtivo. Com sistemas eficientes de coleta e tratamento e a efetiva segmentação de produtos em fim de vida, há o estímulo para a redução de “vazamento” de materiais para fora do sistema. Como exemplo, pode-se citar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para a reciclagem de alta qualidade;

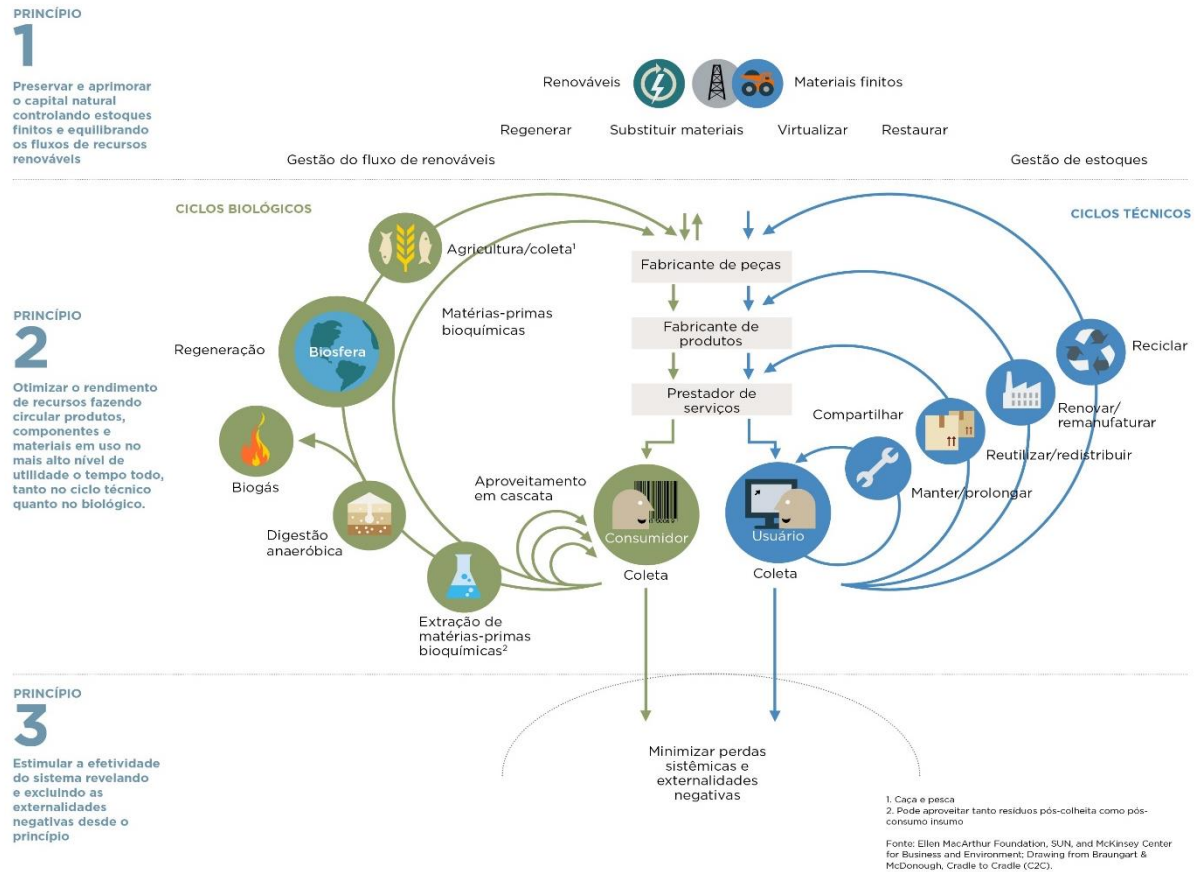
4. Capacitadores e condições sistêmicas favoráveis: enfatiza o papel dos mecanismos de mercado para o encorajamento da reutilização de materiais e aumento da produtividade de recursos. Entre os principais atores estão os formuladores de políticas, as instituições educacionais e líderes de opinião populares.

Além disso, o projeto econômico e de negócios para a EC é baseado em princípios, conceitos e metas abrangentes, incluindo a distinção entre dois ciclos de materiais: o técnico e o biológico. A abordagem *Cradle to Cradle* considera esses materiais como nutrientes, no sentido da capacidade que cada material possui de “nutrir” um novo produto ou processo. Os nutrientes biológicos correspondem aos materiais da biosfera, de origem natural, como alimentos, partes de plantas, madeira, couro, entre outros; são materiais seguros e não tóxicos e retornam ao solo, ao fim de uso. Os nutrientes técnicos correspondem àqueles minerados ou extraídos da crosta terrestre, incluindo combustíveis fósseis e materiais de origens fósseis não renováveis (WEETMAN, 2019).

Buscando sistematizar os possíveis caminhos para lidar com essas duas categorias de materiais de forma circular, a Fundação Ellen MacArthur propôs um modelo que ficou conhecido como “Diagrama Borboleta”, ilustrado na Figura 3, composto por dois ciclos. O ciclo técnico envolve a gestão dos materiais finitos, em que o uso substitui o consumo; os produtos são recuperados e, em sua maior parte, restaurados. Já o ciclo biológico está relacionado ao fluxo de materiais renováveis que são, em sua maior parte, regenerados (SEHNEM et al., 2019). A ênfase nos ciclos internos representa uma oportunidade econômica e ambiental, tendo em vista que quanto mais estreitos os ciclos, maior é o potencial de preservação de materiais,

energia e capital incorporados no produto (BAKKER; BALKENENDEAND; POPPELAARS, 2018).

Figura 3 – Modelo da Fundação Ellen MacArthur para a EC



Fonte: Fundação Ellen MacArthur (2015).

Os ciclos técnicos (lado direito do diagrama, em azul) correspondem à gestão dos materiais duráveis. Para desacoplar seu rendimento do crescimento econômico e controlar o esgotamento de recursos, torna-se necessário preservar e distribuir o trabalho, a energia, os materiais e o custo de capital incorporados em formas superiores de integridade do produto e dos componentes ao invés de seu descarte ao final do primeiro uso. Destacam-se na Figura 3 quatro ciclos de nutrientes técnicos. Primeiramente, um produto é revendido ou compartilhado com um novo usuário, por meio de ações como manutenção, reuso ou redistribuição. Essa primeira estratégia corresponde ao ciclo interno no modelo (manter), que engloba atividades que estendem ou prolongam a vida do produto no primeiro ciclo de uso. Para a execução dessa estratégia, há uma relação de dependência com o *design* do produto, qualidade dos materiais e do processo de fabricação. Na sequência, no segundo ciclo, a prioridade é reutilizar e

redistribuir, possibilitando novos ciclos de uso para o produto. O terceiro ciclo está relacionado ao acondicionamento e à remanufatura de componentes, que podem estender o uso dos produtos ou até mesmo criar um novo uso. Em seguida, a reciclagem envolve a obtenção de recursos que são extraídos de sua forma mais básica, com técnicas como a moagem e o derretimento (HOWARD; HOPKINSON; MIEMCZYK, 2019; WEETMAN, 2019).

Os ciclos biológicos (lado esquerdo do diagrama, em verde) englobam a gestão dos materiais naturais que são consumidos, perdendo sua integridade e qualidades originais, mas podendo ser reaproveitados em outras atividades para criação de valor. Howard, Hopkinson e Miemczyk (2019) exemplificam que peças de vestuário podem prover fibras e material têxtil para outros usos comerciais. Um outro princípio chave é o de que a energia é mantida por fontes renováveis, levando a reduções significativas no consumo de combustíveis fósseis.

De acordo com Howard, Hopkinson e Miemczyk (2019), uma razão determinante para a popularidade deste *framework*, comumente referido como “diagrama borboleta”, é o fato de alinhar uma lógica de negócios convincente com a necessidade de desacoplar a geração de valor do consumo de recursos finitos. Recentemente, o modelo tem sido visto como um catalisador nos negócios e nos debates acadêmicos e políticos, como por exemplo, para o estabelecimento do *British Standard 8001 Framework for implementing the principles of CE in organisations* (HOWARD; HOPKINSON; MIEMCZYK, 2019). Nota-se que a estrutura inicialmente proposta pelo *framework* tem passado por iterações e continua a evoluir, mantendo-se coerente com práticas operacionais de negócios e produções emergentes.

Uma outra estrutura proposta pela Fundação Ellen MacArthur para auxiliar as empresas em direção à adoção dos princípios circulares é o modelo ReSOLVE (EMF, 2015; JABBOUR et al., 2019; PINHEIRO et al., 2019; JABBOUR et al., 2020). Trata-se de uma estrutura que organiza os princípios da circularidade, aplicando-os por meio de seis ações fundamentais: regenerar, compartilhar, otimizar, “ciclar” (*loop*), virtualizar e trocar. O Quadro 1 apresenta a síntese dessas ações, bem como seus exemplos.

Quadro 1 – Ações do modelo ReSOLVE

Ação	Descrição	Exemplos
Regenerar	Conjunto de ações para recuperar, reter e restaurar a saúde dos ecossistemas terrestres.	Transição para fontes renováveis de energia, uso de materiais de base biológica/ambientalmente amigáveis e restauração/proteção de ecossistemas.
Compartilhar	Compartilhamento de ativos, de modo que a propriedade de um bem não é mais necessária para desfrutar de seu valor. Extensão da primeira vida do produto ou possibilidade de várias vidas úteis.	• Compartilhamento de carros, aluguel de ferramentas, plataformas <i>online</i> de compartilhamento; • <i>Design</i> de produtos apreciável e durável, atualização, manutenção, reparo e reutilização secundária.
Otimizar	Melhorias na eficiência de recursos, componentes e materiais, aumentando seu desempenho, tanto nos ciclos técnicos quanto nos biológicos. Remoção de resíduos na produção e cadeia de suprimentos.	• Manutenção preventiva de equipamentos por meio de ferramentas derivadas do <i>big data</i>; • Substituição de processos de fabricação convencionais e compras mais limpas; • Sistemas de informação eficientes, algoritmos de automação e planejamento de processos/produtos.
Ciclar (loop)	Manter componentes e materiais em ciclos fechados, promovendo o retorno do resíduo à economia, por meio da remanufatura, reciclagem, reuso, compostagem, sistemas de devolução e troca.	• Uso de digestão anaeróbia e extração de substâncias bioquímicas de resíduos orgânicos; • <i>Design</i> para desmontagem/reciclagem, introdução de reclassificação na produção, equipamentos técnicos e instalações para remanufatura.
Virtualizar	Entregar valor sem a necessidade de materializar o ativo físico, com foco na estratégia de serviços. Aplicação de TI verde.	• Uso de <i>e-books</i>, uso do <i>digital twin</i> para o desenvolvimento de protótipos e uso de <i>smart products</i>; • Uso de sistemas de informação: <i>e-commerce</i>, edifícios inteligentes, inteligência artificial e sistemas de transporte inteligentes; • Uso de telecomunicações para diminuir o uso de escritórios e viagens.
Trocar	Desenvolvimento de competência para/e adoção de novas tecnologias, melhorando a maneira com que se produz bens e serviços.	• <i>Design</i> para modularidade; • Aplicação de materiais avançados e novas tecnologias, como a impressão 3D; • Uso de transporte multimodal.

Fonte: Adaptado de Jabbour et al. (2019); Ellen MacArthur Foundation (2015).

Alguns estudos sugerem a aplicação das práticas associadas ao conceito da EC em diferentes níveis. O nível macro engloba países, regiões e municípios, por meio das políticas e regulamentações; o nível meso compreende as redes de relacionamento e parques industriais, e o nível micro corresponde às empresas propriamente ditas (GENG et al., 2012; URBINATI; CHIARONI; TOLETTI, 2019; YUAN et al., 2006).

Em relação ao nível macro, a Alemanha se destaca como pioneira ao integrar a EC em leis nacionais em 1996 por meio de uma diretiva chamada “*Closed Substance Cycle and Waste Management Act*” (GEISSDOERFER et al., 2017). Na sequência, em 2002, o Japão se esforçou para implementar a “*Basic Law for Promoting the Creation of a Recycling Oriented Society*” e a China adotou a “*Circular Economy Promotion Law*” no ano de 2009 (FRANCO et al., 2019). Mais recentemente, a EC ultrapassou a barreira dos países, sendo foco de organizações supranacionais, como a União Europeia, a qual elaborou sua estratégia circular em 2015 por meio do chamado *Circular Economy Action Plan*.

McDowall et al. (2017) compararam as políticas relacionadas à EC aplicadas pela China e pela Europa. O estudo evidencia que a perspectiva chinesa da EC foi desenvolvida em meio às questões da poluição e no contexto do rápido crescimento do país, enquanto na Europa, o foco se encontra nas oportunidades de negócio e eficiência de recursos (MCDOWALL et al., 2017). A concentração da população em países menos desenvolvidos representa um desafio significativo, já que o conceito de EC é mais novo nesses locais do que em países desenvolvidos. Já nos países em desenvolvimento, a adoção da EC requer uma sistemática mudança de comportamento a longo prazo para todos os *stakeholders* (GOYAL; ESPOSITO; KAPOOR, 2018).

No Brasil, enquanto algumas empresas ainda têm dificuldades em adotar práticas alinhadas com as premissas da EC, já existem alguns casos de sucesso. Ohde et al. (2018) apontam que dadas as condições geográficas e históricas, sendo um país continental, vários elos da cadeia produtiva permeiam o território brasileiro. Em muitos casos, desde a extração dos recursos até o consumo acontecem no país, facilitando a criação de sistemas reversos, em que o *output* do processo retorna à indústria (OHDE et al., 2018). Sehnem et al. (2019) destacam que os negócios brasileiros tendem a replicar comportamentos e modelos de negócio disseminados em países desenvolvidos. Porém, os autores fazem a ressalva de que esses modelos precisam ser adaptados ao ecossistema econômico particular do país (SEHNEM et al. 2019).

Além disso, Sehnem et al. (2019) salientam que consolidar a EC em uma empresa que considera as premissas ambientais desde seu nascimento tende a ser muito mais fácil que reconfigurar um negócio tradicional para que incorpore tais premissas. Segundo os autores, a base para o sucesso já está presente quando a própria cultura demonstra uma maior consciência e comprometimento com a sustentabilidade, ao passo que, em negócios mais tradicionais, é necessário primeiramente criar a consciência dessa cultura para então efetivamente operar as práticas da EC (SEHNEM et al. 2019).

2.2 Desenvolvimento de Produtos Circulares (DPC)

Nas últimas décadas, o processo de desenvolvimento de produtos (PDP) tem desempenhado um papel de destaque para a manutenção da competitividade das empresas, dada a conjuntura do cenário econômico atual, marcada por mercados internacionalizados e menores ciclos de vida dos produtos (FRANZOSI; ESTORILIO, 2019; ROZENFELD et al., 2006). O bom desempenho de empresas de manufatura depende de suas capacidades de identificar as necessidades do consumidor e rapidamente criar produtos que satisfaçam essas necessidades. Nesse sentido, o desenvolvimento de produtos pode ser entendido como o conjunto de atividades que se inicia com essa percepção de uma oportunidade de mercado e termina com a produção, venda e entrega de um produto (EPPINGER; ULRICH, 2015). Assim, deve ser eficaz, em termos de alcance de resultados que atendam às necessidades do mercado e que se integrem à estratégia da empresa, e deve também ser eficiente, no que se refere à melhor maneira de atingir tais resultados: com o mínimo de recursos possível e menores tempo e custo (ROZENFELD et al., 2006).

Rozenfeld et al. (2006) elencaram as principais características referentes ao PDP, sendo elas: a imprevisibilidade de dados e informações, a criticidade do início do processo, em que são tomadas as decisões importantes, responsáveis por grande parcela do custo do produto final, e o envolvimento de diversas áreas da empresa e da cadeia de suprimentos, como mostra a Figura 4. Além disso, Eppinger e Ulrich (2015) citam desafios relativos à área, tais como os *trade-offs* envolvidos, a mudança constante no ambiente e a pressão temporal.

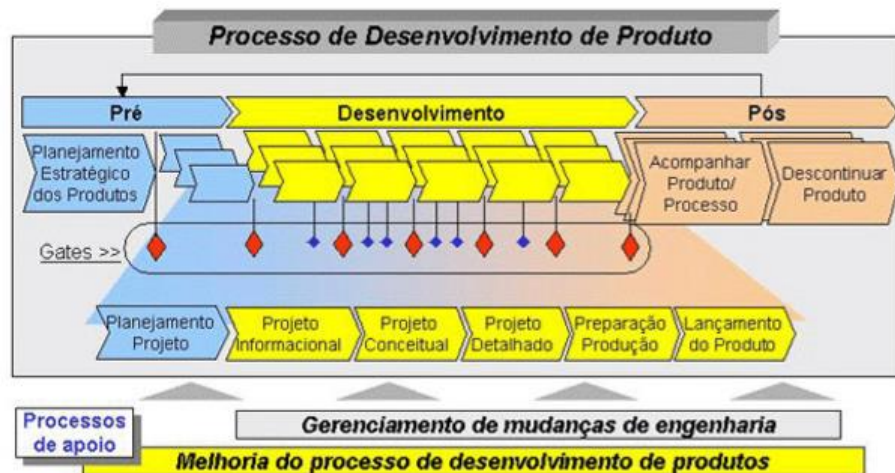
Figura 4 – Integração do PDP às outras áreas funcionais



Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2006).

Rozenfeld et al. (2006) apresentaram o chamado Modelo Unificado do PDP, uma proposta de agrupamento das práticas de gestão do PDP em três macrofases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento, como ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Modelo de Referência de Rozenfeld et al. (2006)



Fonte: Rozenfeld et al. (2006).

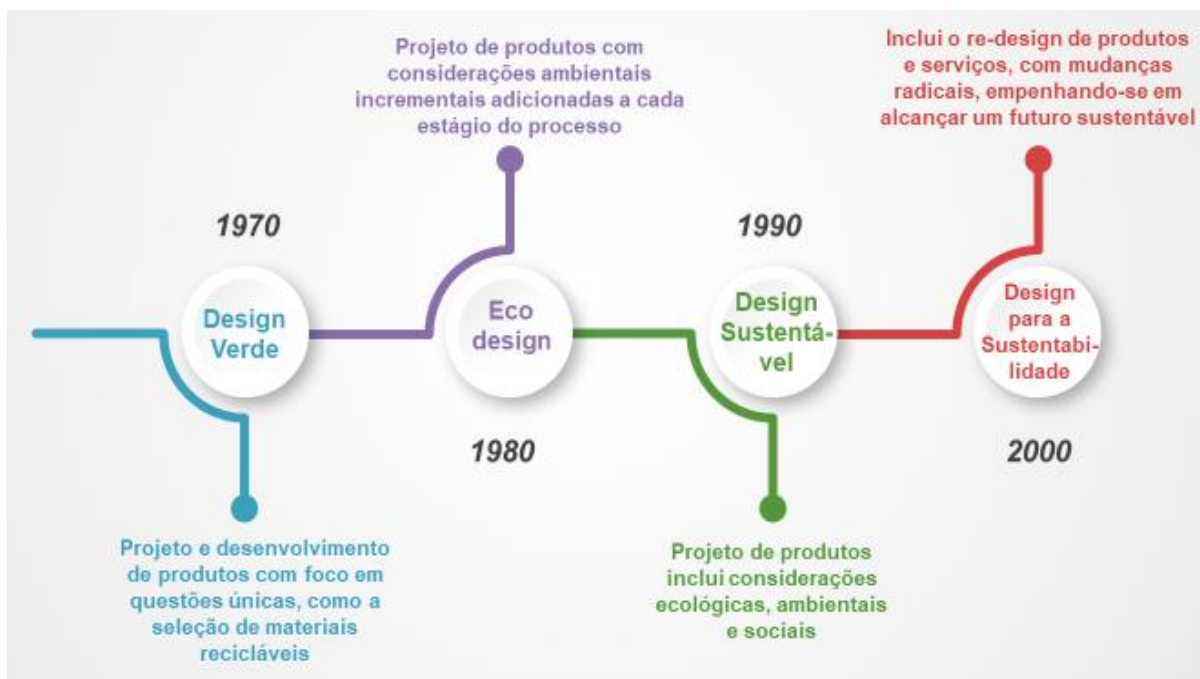
O pré-desenvolvimento corresponde ao elo entre os objetivos da empresa e os projetos em desenvolvimento, compreendendo o planejamento estratégico dos produtos e o planejamento do projeto. Seu objetivo é a definição do portfólio de produtos da empresa, com base em seu plano estratégico, nas ideias vindas de fontes internas ou externas, nas oportunidades e restrições. Na macrofase do desenvolvimento, são definidas as estruturas funcionais que o produto deve possuir, por meio do projeto informacional, projeto conceitual, projeto detalhado, preparação da produção e lançamento do produto. Nesse momento são definidas diversas especificações, como as do processo de produção até as relacionadas à

assistência técnica e atendimento ao cliente. No pós-desenvolvimento, é feito o acompanhamento dos resultados do produto no que diz respeito ao desempenho de mercado e momento adequado para sua descontinuidade. É nesta etapa que são identificadas as oportunidades de melhoria do produto, com base nas lições aprendidas (ROZENFELD et al., 2006; TOLEDO; SIMÕES, 2010).

Segundo Ferradaz et al. (2020), um modelo organizacional não é, por si só, viável ou inviável; isso dependerá da habilidade da organização em implementá-lo e operacionalizá-lo. Devem ser levados em conta aspectos como possíveis obstáculos, particularidades da organização e complexidade dos fatores externos (FERRADAZ et al., 2020).

Nas últimas décadas, muitas discussões têm fomentado a implementação de um papel diferente para o desenvolvimento de produtos. É possível observar abordagens variadas que emergiram em diferentes momentos, buscando maneiras de diminuir os danos causados ao meio ambiente desde as atividades de projeto de produto. Assim, ao reconhecer a responsabilidade dos profissionais que tratam do projeto do produto, ao longo dos anos as filosofias ambientais foram evoluindo do “*design verde*” para o *design* para a sustentabilidade, como mostra a Figura 6, e, mais recentemente, para o *design* para a circularidade ou *design* circular (MORENO et al., 2016).

Figura 6 – Incorporação das preocupações ambientais ao *Design* de produtos



Fonte: Adaptado de Moreno et al. (2016).

Existem críticas às três primeiras abordagens mostradas na Figura 6 (“*design verde*”, *ecodesign* e *design sustentável*) referentes ao fato de ainda serem embasadas em uma filosofia linear, na tentativa de “serem menos piores”. A busca por produtos “menos piores” ao meio ambiente pode trazer consequências imprevistas ou “efeitos rebote” quando não são consideradas sob uma perspectiva sistêmica. Um exemplo é a utilização de materiais que não podem ser posteriormente recuperados, desmontados ou reusados (MORENO et al., 2016). Já a abordagem do *Design for X (DfX)* engloba essa perspectiva preventiva, mas adiciona também o *design* para ciclos fechados; assim, é um termo comumente usado para representar a visão holística do *design* circular (MORENO et al., 2016).

Já McAloone e Pigosso (2017) exploraram a evolução dos conceitos de sustentabilidade e apresentam sua integração com o desenvolvimento de produtos em três períodos: 1990 a 2010, 2010 a 2020 e 2020 a 2030, como ilustra a Figura 7. Os dois primeiros períodos englobam o desenvolvimento real do tema, enquanto o último período representa projeções dos autores com base nas tendências observadas.

Figura 7 - Sustentabilidade e sua integração com o desenvolvimento de produtos



Fonte: Adaptado de McAloone; Pigosso (2017).

De acordo com McAloone e Pigosso (2017), na década de 1990, o *ecodesign* surgiu com a proposta de integrar as questões ambientais no desenvolvimento de produtos, visando melhorar seu desempenho ambiental. Métodos e ferramentas de apoio ao *ecodesign*, como a análise do ciclo de vida, por exemplo, foram sendo desenvolvidos ao longo do período entre 1990 e 2010, levando o setor industrial a obter ganhos ambientais. Porém, a maioria das ações

tomadas para implementação deste conceito-chave eram concentradas no nível operacional, sob uma perspectiva restrita, ligada principalmente à eficiência de materiais e energética, e a sustentabilidade ainda era vista como um custo necessário (MCALOONE; PIGOSSO, 2017).

Já na década de 2010, o conceito de *Product Service System* (PSS) ou sistemas produto-serviço começou a se destacar, dado seu potencial para aprimorar a competitividade mediante novos modelos de negócio voltados à extensão da vida do produto, geralmente pelo compartilhamento, e a chamada desmaterialização. Neste período, a sustentabilidade social passa a receber maior atenção das organizações, ainda que muitas delas ainda não reconheçam os esforços para melhoria da sustentabilidade como atividade que gera valor (MCALOONE; PIGOSSO, 2017).

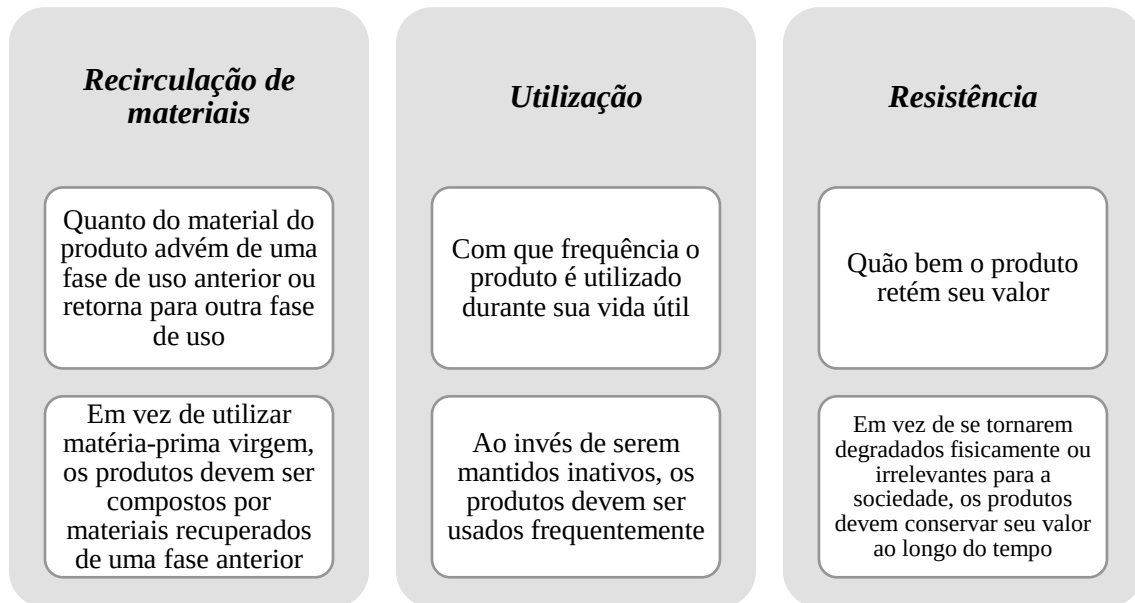
Em relação à década que se inicia em 2020, os autores apontam que os riscos relacionados à escassez de recursos podem ser minimizados por meio da melhor compreensão do conceito da EC e da prática da colaboração por toda a cadeia de valor. Essa mudança permitirá que cada decisão da organização seja tomada com base em sólidas considerações sustentáveis, estabelecendo assim uma abordagem holística (MCALOONE; PIGOSSO, 2017).

Nota-se que o *Design* de Produtos Circulares (DPC) é inspirado por outras abordagens já existentes, mas, conforme enfatizam Asif et al. (2021), o *design* para a sustentabilidade e o *ecodesign* abordam o processo de *design* ainda sob a ótica dos sistemas lineares de manufatura, sendo que ainda é ausente a visão de manter o valor dos produtos ao longo do tempo, a qual se apresenta como princípio chave na EC. Assim, o DPC compartilha princípios similares aos destas outras abordagens, incluindo desacelerar os ciclos de recursos, prolongando a vida útil dos produtos; estreitar os ciclos de recursos, com ênfase na eficiência energética; e fechar o ciclo de recursos, por meio da recirculação (ALBÆK et al., 2020). Contudo, Sumter et al. (2021) apontam três fatores que diferenciam o *design* para a Economia Circular de outras abordagens de *design* para a sustentabilidade: a ênfase no alto valor, a qualidade na circulação de materiais e o uso de modelos de negócios circulares.

Conforme observado por den Hollander, Bakker e Hultink (2017), os valores econômico e ambiental dos produtos desenvolvidos sob os princípios da EC devem ser planejados para serem preservados o maior tempo possível, de modo que o seu ciclo de vida seja prolongado ou que os produtos e seus componentes sejam recolocados de volta ao mercado. Dessa forma, para o *design*, a EC substitui o conceito de fim de vida com a restauração, o incentivo ao uso de energia renovável e à eliminação do uso de materiais químicos tóxicos.

Boyer et al. (2021), por sua vez, sugerem o entendimento da circularidade a nível de produto a partir de três dimensões: recirculação de materiais, utilização e resistência (Figura 8).

Figura 8 – Circularidade a nível de produto e suas dimensões



Fonte: Adaptado de Boyer et al. (2021)

De acordo com Boyer et al. (2021), existe uma certa ingenuidade ao considerar que todos os produtos podem atender ao máximo as três dimensões, mas é importante considerá-las em conjunto na construção de ferramentas de avaliação. Deve-se, assim, ter em mente que um produto deve ser elaborado a partir de materiais recuperados e deve ser usado frequentemente, enquanto mantém seu valor por um longo período de tempo (BOYER et al., 2021).

Há atualmente uma crescente variedade de princípios, métodos e ferramentas para apoiar o projeto e desenvolvimento de produtos para ciclos fechados (MORENO et al., 2016), o chamado *design* de produtos para a circularidade. Cayzer, Griffiths e Beghetto (2017) ressaltam diversas maneiras para melhorar a circularidade ao nível do produto, como o aumento da durabilidade, a modularização, a remanufatura, o reuso de componentes e o *design* de produtos com menos material, livres de substâncias químicas tóxicas e possíveis de serem reciclados ou compostados. Outros autores ressaltam princípios relacionados à produção, como a eficiência energética e uso de fontes renováveis de energia (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; SINGH; ORDOÑEZ, 2016; URBINATI; CHIARONI; TOLETTI, 2019), a otimização de processos e produtos para a eficiência de recursos e o aproveitamento de resíduos como recursos (URBINATI; CHIARONI; TOLETTI, 2019).

Para a adoção da EC, a gestão do PDP deve se atentar ainda a projetos de produtos que atendam aos princípios de facilidade de manutenção (SINGH; ORDOÑEZ, 2016), de desmontagem (VANEGAS et al., 2017), atualização (den HOLLANDER, BAKKER; HULTINK, 2017) e compartilhamento de produtos e serviços, por meio da intensificação do uso da *internet* e tecnologia da informação (EMF, 2015; MCALOONE; PIGOSSO, 2017).

A preocupação com o prolongamento do tempo útil de vida dos produtos torna necessária também a elaboração de estratégias de extensão do uso dos produtos que compõem o portfólio (VANEGAS et al., 2017), evitando que eles se tornem obsoletos do ponto de vista físico e emocional (den HOLLANDER, BAKKER; HULTINK, 2017). Isso é possível por meio de projetos que permitam a remanufatura, o reuso, a remodelagem e a reciclagem (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; den HOLLANDER, BAKKER; HULTINK, 2017; LINDER; WILLIANDER, 2017; SINGH; ORDOÑEZ, 2016; VANEGAS et al., 2017).

Apesar do gradativo aumento desse conjunto de princípios, métodos e ferramentas, Mestre e Cooper (2017) defendem que ainda existe uma lacuna no desenvolvimento, implementação e difusão de soluções efetivas de produtos e projetos que sustentem a transição para a EC, sendo necessário estabelecer uma abordagem sistêmica nos níveis técnico e biológico. Buscando suprir essa carência, os autores propuseram um *framework* composto por dois níveis: “*Design para o Ciclo Técnico*” e “*Design para o Ciclo Biológico*”. Cada um deles é subdividido em duas estratégias adicionais, totalizando quatro estratégias a serem consideradas em diferentes fases do ciclo de vida do produto, apoiando projetistas e desenvolvedores (MESTRE; COOPER, 2017).

O “*Design para o Ciclo Técnico*” está relacionado ao uso tecnológico, à transformação de materiais e recursos energéticos e à otimização de projetos aos maiores níveis possíveis de eficiência. O objetivo é minimizar os *inputs* de material e de energia, e as emissões nos *outputs* por todo o ciclo de vida do produto, maximizando a proposição de valor para o usuário e para a sociedade. As estratégias do ciclo técnico são as de “desacelerar o ciclo” (*slow the loop*) e de “fechar o ciclo” (*close the loop*). A primeira estratégia inclui desacelerar o fluxo de materiais em cada fase do ciclo de vida, incluindo o *design* para a durabilidade, enquanto a segunda inclui abordagens que permitam a desmontagem e seleção de materiais apropriados (MESTRE; COOPER, 2017).

Já o “*Design para o Ciclo Biológico*” representa as soluções que ocorrem ou que são inspiradas pelos ecossistemas naturais, em que os materiais retornam à natureza ao longo do

tempo. As estratégias do ciclo biológico são as de “ciclos de inspiração biológica”, que adota a abordagem da Biomimética, e “ciclos de base biológica”, que objetivam usar materiais biológicos que podem retornar à biosfera e prover nutrientes. Mestre e Cooper (2017) ressaltam ainda que durante as fases de projeto, não há certeza em relação ao DPC, no sentido de atingir um ciclo totalmente fechado, mas as melhorias e inovações a curto e médio prazo podem ser alcançáveis se um planejamento sistemático para o projeto do produto é embasado na visão da EC (MESTRE; COOPER, 2017).

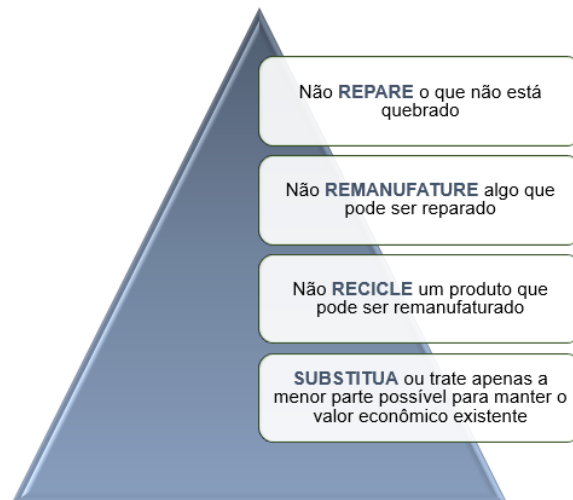
Assim, além de ser considerado uma evolução do *ecodesign*, o DPC busca apoiar os ciclos técnicos e biológicos de materiais por meio da preservação do capital natural (MCALOONE; PIGOSSO, 2017; MORENO et al., 2016), evitando ao máximo a extração de matéria-prima virgem da natureza (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). De acordo com Subramanian et al. (2019), os processos e práticas relacionadas ao DPC são diferentes do desenvolvimento de produtos tradicional. O DPC é considerado mais complexo, até mesmo exigindo novas habilidades dos *designers* envolvidos no desenvolvimento de produtos (SUBRAMANIAN et al., 2019; SUMTER et al., 2020).

Ademais, diferentemente do *ecodesign*, o DPC é baseado nas premissas de que os consumidores se sensibilizam com o conceito de EC (SELVEFORS et al., 2019) e de que os produtos devem ser projetados de forma que a qualidade dos materiais e componentes seja preservada da melhor maneira possível ao longo de seu ciclo de vida. Segundo Kane, Bakker e Balkenende (2018, p. 39, tradução nossa), um produto circular pode ser definido como “um produto capaz de passar por repetidos ciclos de obsolescência e recuperação enquanto mantém o mais alto nível de integridade possível”. Já den Hollander, Bakker e Hultink (2017) argumentam ainda que há uma distinção fundamental entre *ecodesign* e *design* de produtos circulares (DPC). Um dos princípios que guia o *ecodesign* é a hierarquia de resíduos, que detalha uma ordem de prioridade para sua gestão, desde a prevenção, passando pelo reuso, reciclagem, recuperação e descarte. Os autores salientam que essa visão compartilhada do resíduo como entidade central é insignificante no contexto da EC, em que o resíduo é ressignificado. Essa discordância indica que há uma necessidade de examinar (e possivelmente reconsiderar) os conceitos que tais termos buscam expressar.

Nesse sentido, den Hollander, Bakker e Hultink (2017) apresentam o Princípio da Inércia de Walter Stahel como guia para o DPC, com base na seguinte indicação (em tradução livre): “Não repare o que não está quebrado, não remanufacture algo que pode ser reparado,

não recicle um produto que pode ser remanufaturado. Substitua ou trate apenas a menor parte possível para manter o valor econômico existente do sistema técnico”, como a Figura 9 ilustra.

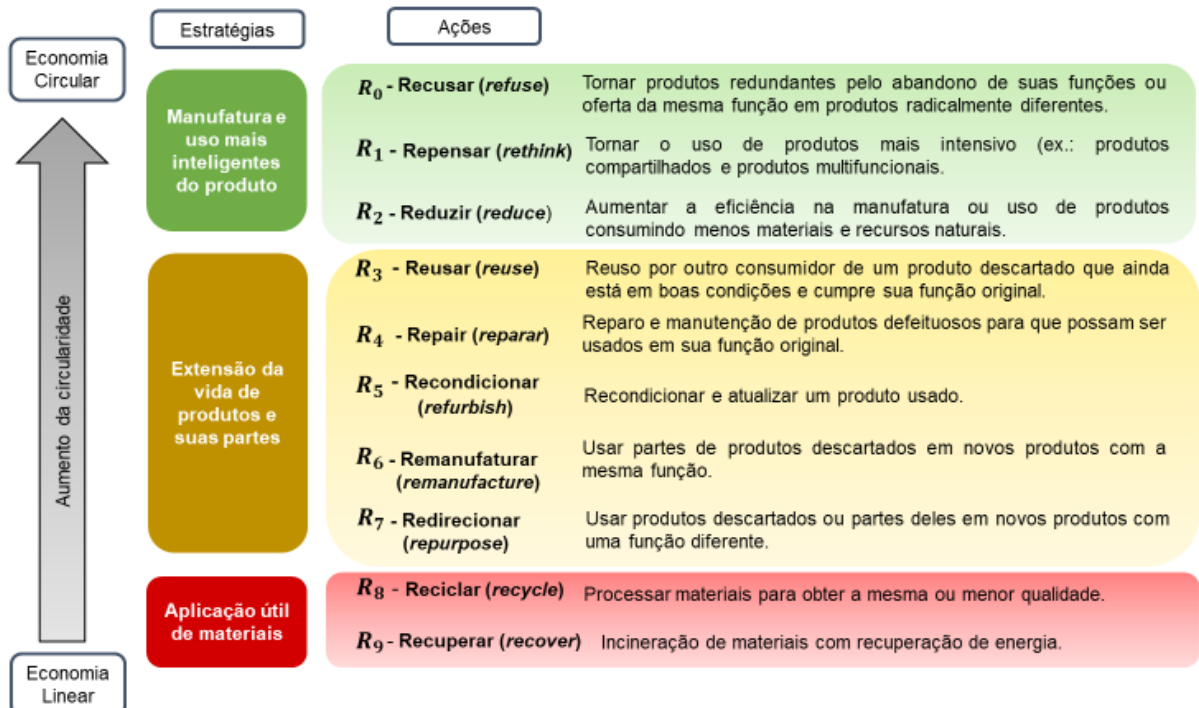
Figura 9 - Princípio da Inércia



Fonte: Adaptado de Ghisellini; Ulgiati (2020).

Dessa forma, sob a perspectiva do *design* de produtos, a reciclagem é a opção menos desejada, tendo em vista que envolve a destruição da integridade do produto. Esse ponto de vista é compartilhado por Potting et al. (2017), os quais citam que as estratégias que buscam reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar a geração de resíduos podem ser ordenadas por sua prioridade de acordo com os níveis de circularidade, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Priorização de estratégias para aumento da circularidade

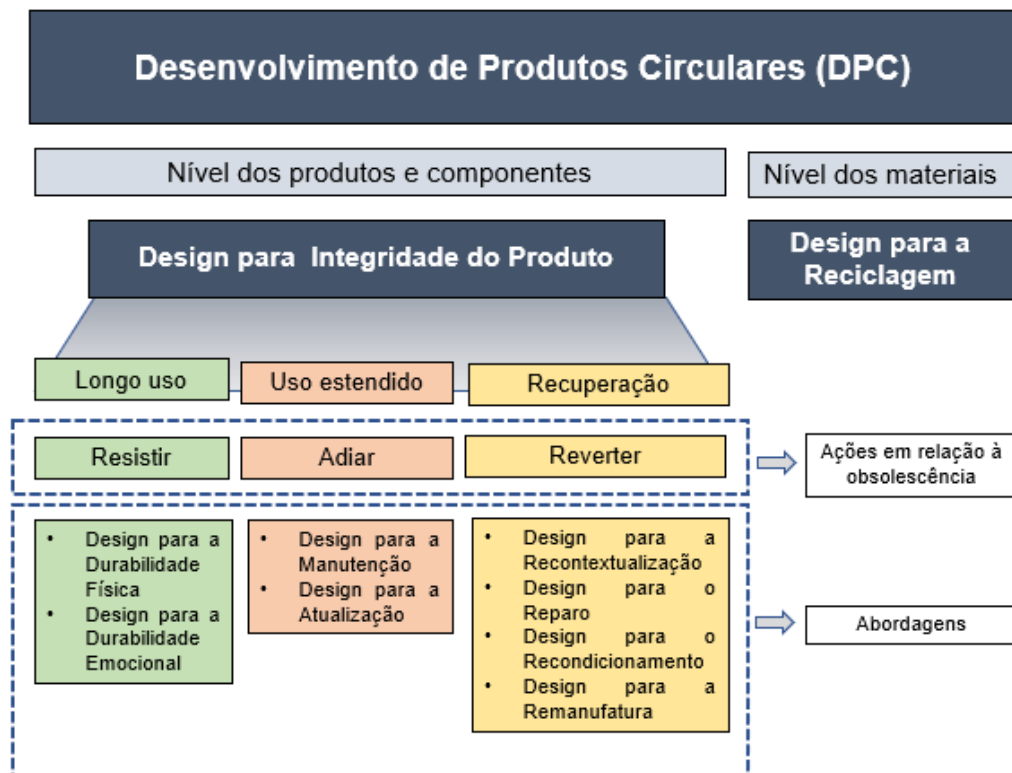


Fonte: Adaptado de Potting et al. (2017).

Observando a Figura 10, nota-se que a manufatura e o uso mais inteligentes de produtos são geralmente preferíveis em relação à extensão de sua vida útil. Esta estratégia, por sua vez, é seguida pela reciclagem e recuperação de matérias pela incineração, a qual apresenta o nível de prioridade mais baixo, pois os materiais não estão mais disponíveis para aplicação em outros produtos.

Den Hollander, Bakker e Hultink (2017) defendem que o Princípio da Inércia está relacionado com a integridade do produto, a qual pode ser definida como a extensão com que um produto permanece idêntico ao seu estado original ao longo do tempo (den HOLLANDER; BAKKER; HULTINK, 2017). Tais autores propõem uma sistematização conforme a Figura 11.

Figura 11 – Desenvolvimento de Produtos Circulares e seus componentes



Fonte: Adaptado de den Hollander; Bakker, Hultink (2017).

De acordo com den Hollander, Bakker e Hultink (2017), os projetistas deveriam primeiramente prevenir um produto de se tornar obsoleto e garantir que os recursos possam ser recuperados com o maior nível de integridade. Tais metas podem ser alcançadas ao nível de produtos e componentes (por meio do *design* para a integridade do produto) e ao nível dos materiais (referido como *design* para a reciclagem). Esses dois níveis compõem o chamado Desenvolvimento de Produtos Circulares (DPC).

Tendo em vista que o *Design* para a Reciclagem é um conceito bem estabelecido na literatura e que nele a integridade do produto é perdida, os autores se esforçam em explorar e definir o *Design* para a Integridade do Produto. Para isso, apresentam uma divisão de acordo com a ação sobre a obsolescência: resistir (longo uso), adiar (uso estendido) e reverter. Além disso, para cada uma dessas ações, definem as práticas de projeto do produto a serem executadas. Para resistir a obsolescência, há o *Design* para a Durabilidade Física e Durabilidade Emocional; para adiar a obsolescência, a recomendação é o uso do *Design* para a Manutenção e o *Design* para a Atualização; já para reverter a obsolescência, indicam o *Design* para a Recontextualização, o *Design* para o Reparo, o *Design* para a Recondicionamento e o *Design* para a Remanufatura.

Outro aspecto interessante nesse sentido, destacado por Andrews (2015), é a importância da proatividade dos projetistas no sentido de não esperarem pelo desenvolvimento de uma infraestrutura para a remanufatura, reuso e/ou reciclagem antes de começarem a projetar produtos para a EC. O estudo destaca que tais profissionais devem antecipar e se preparar para esta economia alternativa especialmente quando há um longo período para a entrega do produto final, desde o conceito inicial até o chão de fábrica. Além do *design* voltado para ciclos fechados, existe também o potencial de influência direta nos negócios e no comportamento do consumidor por meio da extensão da vida útil dos produtos e aumento do valor percebido destes (ANDREWS, 2015).

Wastling, Charnley e Moreno (2018) pontuam que o termo “*design*” é bastante abrangente, englobando uma gama de atividades. Os autores exploram a definição do *Design Council*, do Reino Unido, a qual se distribui por um espectro, em que o *design* técnico está situado em uma extremidade e o *design* centrado no ser humano (*human-centred design*) se encontra na outra extremidade. O *design* técnico compreende o projeto e especificações de um produto, componente ou sistema e é o lado do espectro em que a literatura atual tem se debruçado. Já no *design* centrado no ser humano, o aspecto técnico dá lugar às atividades de entendimento das necessidades das pessoas e criação de soluções para essas necessidades. Dessa forma, estabelece-se que os produtos não devem ser projetados somente com foco em como os princípios de *design* permitem um encaixe no sistema circular, mas também em como se encaixam às necessidades e desejos do consumidor (WASTLING; CHARNLEY; MORENO, 2018).

2.3 Competências e habilidades para o *design* de produtos circulares

Konietzko, Bocken e Hultink (2020) propõem cinco estratégias em que as organizações podem inovar em direção à EC: “*narrowing*”, correspondente a reduzir o uso de produtos, componentes, materiais e energia por todo o ciclo de vida, desde a concepção até a recuperação; “*slowing*”, referente à extensão do uso de produtos, componentes e materiais; “*closing*”, que se refere a reincorporação ao ciclo econômico dos resíduos pós-consumo, fechando o ciclo; “*regenerating*”, que engloba o gerenciamento de ecossistemas naturais, uso de materiais renováveis e não tóxicos e uso de energia renovável, e “*informing*”, que leva em conta o uso da tecnologia da informação e tecnologias disruptivas como suporte às práticas circulares. Para cada uma destas estratégias, os autores exemplificam abordagens para o *design*, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Estratégias circulares e abordagens para o *Design*

Estratégia	Abordagens para o <i>Design</i>
<i>Narrow</i> – usar menos	<i>Design</i> com <i>inputs</i> de baixo impacto
<i>Slow</i> – usar por mais tempo	<i>Design</i> para a durabilidade física
<i>Close</i> – usar novamente	<i>Design</i> com materiais adequados para a reciclagem primária
<i>Regenerate</i> – produzir de forma limpa	<i>Design</i> com materiais não tóxicos
<i>Inform</i> – uso de dados e tecnologia da informação	<i>Design</i> de produtos conectados

Fonte: Konietzko, Bocken e Hultink (2020).

Mais recentemente, após a realização de estudos com *designers* que trabalham na Holanda, Sumter et al. (2021) apresentaram sete competências circulares para o *design*: (1) *Design* para Múltiplos Ciclos de Uso, (2) *Design* para a Recuperação, (3) Avaliação do Impacto Circular, (4) Modelos de Negócio Circulares, (5) Engajamento Circular do Usuário, (6) Colaboração para a Economia Circular e (7) Comunicação da Economia Circular. O Quadro 3

ilustra a forma com que os autores definem, descrevem e exemplificam cada uma das competências.

Quadro 3 – Definições e exemplos de competências circulares para o *Design*

Competência	Definição	Exemplo
<i>Design para a Recuperação</i>	• Incorporar estratégias de recuperação durante o processo de <i>Design</i>, considerando múltiplos ciclos de uso • Contribuição para o desenvolvimento de produtos que possam ser reparados, remanufaturados e/ou reciclados, ou serviços que permitam que os produtos passem por tais processos	Estratégias de <i>design</i> que permitam a recuperação, como a modularidade e a desmontagem
<i>Design para Múltiplos Ciclos de Uso</i>	• Prever as consequências do uso prolongado e de múltiplos ciclos de uso • <i>Design</i> de produtos que possam ser usados mais de uma vez, pelo mesmo usuário ou usuários diferentes	• Foco em serviços que mantenham os produtos em uso; • Uso de estratégias como o <i>Design</i> para a durabilidade e <i>Design</i> para a desmontagem
<i>Avaliação do Impacto Circular</i>	• Estimar o impacto ambiental das soluções circulares em um nível sistêmico, apoiando a tomada de decisões durante o processo de <i>design</i> • Medição da circularidade das soluções de <i>design</i>, com o uso de indicadores como o “conteúdo reciclado” (percentual de material reciclado em um produto) ou o índice de reparabilidade	• Uso dos indicadores de impacto ambiental já existentes; • Criação de indicadores específicos para uso nos projetos de produto
<i>Integração dos modelos de negócio circulares</i>	• Desenvolver, ao mesmo tempo, o produto, serviço e modelo de negócio circular • <i>Design</i> de produtos que se encaixem em um modelo de negócio circular e vice-versa	Avaliação da viabilidade de inclusão de serviços associados ao produto
<i>Engajamento Circular do Usuário</i>	• Engajar os usuários nos períodos de uso e fim de uso dos produtos • <i>Design</i> de produtos e serviços que engajam os usuários em relação à EC, permitindo, por exemplo, o compartilhamento	Promover o reconhecimento dos benefícios das soluções circulares por parte dos usuários
<i>Colaboração para a Economia Circular</i>	• Identificar, mapear, facilitar e gerenciar a colaboração ente <i>stakeholders</i> externos para a operacionalização do modelo de negócios circular • Engajamento e colaboração com diferentes <i>stakeholders</i> ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos	Envolvimento de múltiplos parceiros nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto, promovendo sessões de <i>brainstorming</i> e co-criação
<i>Comunicação da Economia Circular</i>	• Contar histórias coerentes a respeito das soluções circulares • Uso de técnicas de comunicação, como o <i>storytelling</i>, para criar um vocabulário compartilhado a respeito da EC	Fornecer exemplos de aplicação bem-sucedida da EC, por meio de estudos de caso, e criar um entendimento comum de suas propostas

Fonte: Adaptado de Sumter et al. (2021).

Com o objetivo de avaliar o reconhecimento de tais dimensões por um grupo internacional de *designers*, Sumter et al. (2021) conduziram uma pesquisa *survey*, obtendo como resultado a adição de mais duas dimensões ao conjunto inicial: “Pensamento Sistêmico

Circular” e “Manufatura e Materiais Circulares”. Além da adição das duas competências, os autores reformularam as definições, fazendo ajustes conforme os resultados obtidos no estudo. A competência “Integração dos modelos de negócio circulares” foi renomeada para “Proposições de Negócio Circulares”, destacando o valor que os sistemas produto-serviço podem oferecer aos usuários. O mesmo ocorreu com a competência “Comunicação da Economia Circular”, que passou a ser referida como “*Storytelling* da Economia Circular”, enfatizando o convencimento de *stakeholders* para o desenvolvimento de sistemas produto-serviço. O Quadro 4 mostra o resultado final após tais alterações, com as nove competências de economia circular para o *design*.

Quadro 4 – Nove competências de economia circular para o *design*

	<i>Habilidade de...</i>
<i>Pensamento Sistêmico Circular</i>	Utilizar uma abordagem de <i>design</i> que considere a economia circular como um sistema complexo, levando em conta os efeitos sistêmicos que as intervenções de <i>design</i> circular podem ter
<i>Design para a Recuperação</i>	Desenvolver sistemas produto-serviço que permitam a recuperação de produtos, materiais e componentes
<i>Design para Múltiplos Ciclos de Uso</i>	Criar sistemas produto-serviço projetados para mais de um ciclo de uso
<i>Proposições de Negócio Circulares</i>	Desenvolver proposições que busquem fechar o ciclo de produtos
<i>Engajamento Circular do Usuário</i>	Engajar os usuários em todos os aspectos da EC, durante o uso e após o fim de vida dos produtos
<i>Manufatura e Materiais Circulares</i>	Selecionar materiais e métodos de manufatura que minimizem o impacto, levando em conta todo o ciclo de vida do produto
<i>Avaliação do Impacto Circular</i>	Mensurar o impacto ambiental, econômico e social das intervenções do <i>design</i> circular
<i>Colaboração para a Economia Circular</i>	Facilitar colaborações entre a rede de valor, estimulando a transição à EC
<i>Storytelling da Economia Circular</i>	Criar visões e narrativas envolventes da EC para torná-la uma ideia compartilhada entre os <i>stakeholders</i>

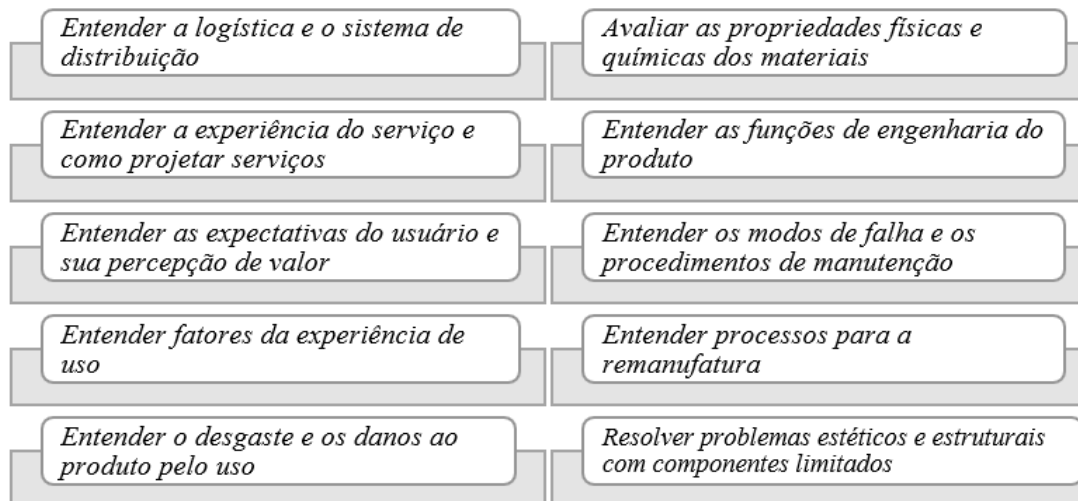
Fonte: Adaptado de Sumter et al. (2021).

Sumter et al. (2021) destacam que as competências são complementares, formando um conjunto interconectado. A competência Pensamento Circular Sistêmico indica que a abordagem sistêmica é um elemento fundamental do processo de *design* circular. As competências *Design* para a Recuperação e *Design* para Múltiplos Ciclos de Uso estão centradas nos objetivos de desacelerar e fechar os ciclos de produtos e materiais. Já as competências Proposições de Negócio Circulares, Engajamento Circular do Usuário e

Manufatura e Materiais Circulares permitem que o processo de desenvolvimento de sistemas produto-serviço espelhe a natureza integrativa do *design*, a qual conecta negócios, usuários e tecnologia. O aspecto mediador, relacionado à percepção do impacto das intervenções, está representado pela competência Avaliação do Impacto Circular. Por fim, as competências de Colaboração para a Economia Circular e *Storytelling* da Economia Circular compõem o lado interpessoal do processo de *design*, com o envolvimento e engajamento dos *stakeholders* (SUMTER et al., 2021).

Além disso, Sumter et al. (2021) apontam ainda que as competências identificadas diferem daquelas listadas por De Los Rios e Charnley (2017), uma vez que foram formuladas com orientação aos resultados e indicam como são aplicadas na prática. De Los Rios e Charnley (2017), por sua vez, elencaram dez requisitos para o desenvolvimento de capacidades necessárias ao *design* de produtos e serviços que apoiam os diversos caminhos que levam ao fechamento de ciclos de materiais. A Figura 12 ilustra esses requisitos, os quais, segundo os autores, podem ser complementares ou mutuamente excludentes, a depender do modelo de negócio.

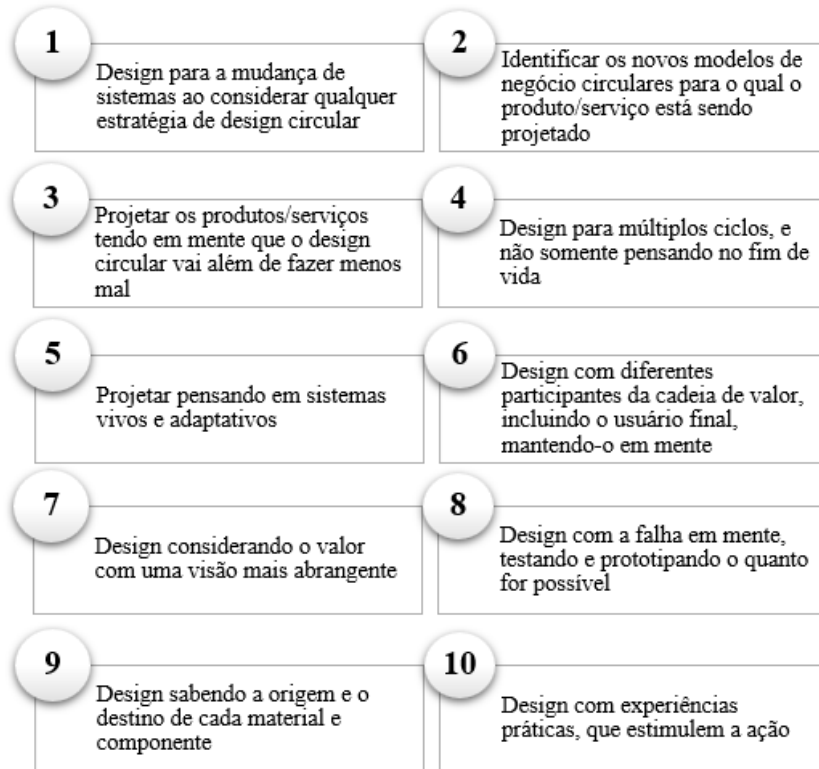
Figura 12 – Habilidades de *Design* para criar produtos para ciclos fechados



Fonte: Adaptado de De Los Rios; Charnley (2017).

As habilidades listadas por De Los Rios e Charnley (2017) vão ao encontro dos resultados obtidos por Moreno et al. (2016), com o desenvolvimento de um conjunto de recomendações para o *design* circular, objetivando apoiar *designers* e tomadores de decisões em sua jornada rumo à circularidade. Moreno et al. (2016) listam dez pontos a serem considerados em relação ao *design* para a EC, sintetizados na Figura 13.

Figura 13 - Dez considerações para o *Design* para a Economia Circular



Fonte: Adaptado de Moreno et al. (2016).

Além do material e do fluxo de nutrientes, Moreno et al. (2016) destacam que o *design* circular precisa também considerar o modelo de negócio para o qual o produto está sendo projetado, uma vez que diferentes tipos de ciclos de produtos ocorrem na EC. Existem ciclos em que se mantém o valor econômico dos recursos ao longo do ciclo de vida, enquanto outros tratam da adoção de recursos que podem ser reintegrados à natureza ou incorporados a outras cadeias. Dessa forma, de acordo com o modelo de negócio selecionado, o *design* de produtos circulares necessita “enquadrar-se ao propósito” (MORENO et al., 2016).

Shahbazi e Jönbrink (2020) reforçam essa ideia ao afirmar que a funcionalidade dos modelos de negócio circulares e fechamento de ciclos está condicionada ao *design* de produtos e serviços para a circularidade. No estudo realizado em quatro empresas de diferentes países nórdicos, os autores identificaram que aquela que mais aplicava estratégias circulares era justamente a empresa que alterou seu modelo de negócios, adotando o PSS, e ao mesmo tempo introduziu mudanças no *design* de produto, incluindo aspectos de circularidade simultaneamente (SHAHBAZI; JÖNBRINK, 2020). Nesse sentido, para estimular a transição para a EC, é fundamental que as estratégias de *design* e os modelos de negócio estejam alinhados (RUIZ-PASTOR et al., 2021).

Este ponto de vista é também compartilhado por Dokter, Thuvander e Rahe (2021), os quais colocam que para os produtos, o *design* circular está baseado na junção do *design* físico e do modelo de negócios; sendo assim, estes dois aspectos devem ser simultaneamente discutidos e desenvolvidos nos estágios iniciais do processo de *design*. Os resultados encontrados pelos autores indicam ainda que o processo de *design* no contexto da EC está alterando seu foco no objeto singular para a criação de sistemas, modelos de negócio, redes colaborativas e visões futuras. Busca-se, assim, a transição do *design* centrado no objeto para o *design* centrado em sistemas e serviços. Dokter, Thuvander e Rahe (2021) chegaram a essa conclusão após realizarem entrevistas com *designers* que trabalharam ativamente com projetos envolvendo circularidade e identificaram diversas perspectivas desses profissionais em relação ao *design* para a EC, englobando quatro dimensões: o processo do *design* circular, os efeitos da EC no *design*, a alteração do papel do *designer* e os fatores externos que afetam o *design* circular na prática. A Figura 14 ilustra o desdobramento da dimensão do processo de *design* circular e a composição de cada aspecto.

Figura 14 – O processo de *Design* circular e seus componentes

Processo de <i>Design</i> circular	
Complexidade do <i>Design</i> circular	• Expansão do escopo dos projetos, maior número de <i>stakeholders</i> envolvidos e maior duração da fase de pesquisa
<i>Design</i> do modelo de negócios	• <i>Design</i> do modelo de negócios como parte do processo de <i>design</i>
Perspectiva do ciclo de vida	• Foco em mais fases do ciclo de vida do produto; • <i>Designers</i> envolvidos com o ciclo de vida dos produtos
Uso de dados no processo de <i>design</i>	• Avaliação dos impactos ambientais antecipadamente; • Uso de dados para rastrear ciclos de vida e fase de uso; • Uso de passaportes de materiais e gêmeos digitais
<i>Design</i> para o reuso de materiais	• Incorporar a flexibilidade no processo de <i>design</i> para permitir o reuso;
Instruções para o <i>design</i> circular	• Alinhamento de expectativas nas instruções para o <i>design</i> circular;
<i>Design</i> de sistemas e serviços	• Transição do <i>design</i> centrado no objeto para o <i>design</i> centrado em sistemas e serviços;

Fonte: Adaptado de Dokter; Thuvander, Rahe. (2021).

Em relação à “Complexidade crescente no processo de *design*”, Dokter, Thuvander e Rahe (2021) destacam que o processo do *design* de produtos se torna mais complexo com a adoção da circularidade e que o desenvolvimento de uma solução circular tipicamente requer o envolvimento de mais *stakeholders* e *designers* em diferentes áreas e a consulta e inclusão de especialistas nas fases iniciais do processo. Estas preocupações geralmente levam a um processo de *design* mais longo, com mais iterações e fluxos de *feedback* (DOKTER; THUVANDER; RAHE, 2021).

Ademais, o processo de *design* se torna mais orientado a dados em um contexto de EC para se tornar capaz de avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto. Os autores defendem que os impactos ambientais necessitam ser calculados por todo o ciclo de vida ou pelos múltiplos ciclos de vida, e a duração da fase de pesquisa costuma ser mais longa, dado que envolve a compreensão do sistema do qual o produto faz parte, incluindo fornecedores e cadeia de valor. Dessa forma, o rastreamento de materiais e do desempenho dos produtos permite intervenções que podem posteriormente auxiliar a desacelerar e fechar os ciclos de recursos. Isso pode ser feito por meio de técnicas como os passaportes de materiais e o uso de gêmeos digitais (DOKTER; THUVANDER; RAHE, 2021).

Já em relação às outras dimensões, entre os efeitos da EC no *design*, os autores destacam os times dedicados à EC, a troca de conhecimento em EC, o desenvolvimento de estratégias e métodos para analisar a circularidade e o modelo de negócios que estimula a captura de valor ao longo do ciclo de vida dos produtos. No que diz respeito à alteração do papel do *designer*, os autores pontuam o estabelecimento de colaborações para a EC, o engajamento dos clientes e o *designer* como um conector e agente da mudança circular. Por fim, entre os fatores externos, Dokter, Thuvander e Rahe (2021) apontam a necessidade de regulações e políticas, os materiais na EC, a logística reversa, o entendimento e comprometimento com a EC e as restrições do atual sistema linear.

Com o objetivo de analisar comparativamente as semelhanças apresentadas nos trabalhos acima descritos, elaborou-se o Quadro 5, que compreende as principais competências necessárias ao *design* circular. Essas competências formam a base para a definição das áreas de processo que compõem a matriz de maturidade, juntamente com as práticas e métodos obtidos na revisão sistemática de literatura.

Quadro 5 - Síntese das principais competências necessárias ao *Design* circular

Manufatura e Materiais Circulares	Design para Múltiplos Ciclos de Uso	Design para a Recuperação	Proposições de Negócio Circulares	Engajamento Circular do Usuário	Avaliação do Impacto Circular	Colaboração para a EC	Storytelling da EC
Materiais na EC	Design para o reuso de materiais	Perspectiva do ciclo de vida	● Design do modelo de negócios ● Design de sistemas e serviços	Engajamento dos clientes	Desenvolvimento de estratégias e métodos para analisar a circularidade;	Estabelecer colaboração para a EC	● Entender e se comprometer com a EC ● Troca de conhecimento em EC
Design com a falha em mente, testando e prototipando o quanto for possível	Design para múltiplos ciclos, e não somente pensando no fim de vida	Projetar tendo em mente que o design circular vai além de fazer menos mal	● Identificar os novos modelos de negócio circulares para o qual o produto/serviço está sendo projetado ● Design considerando o valor com uma visão mais abrangente	Design com experiências práticas, que estimulem a ação	Design sabendo a origem e o destino de cada material e componente	Design com diferentes participantes da cadeia de valor, incluindo o usuário final, mantendo-o em mente	
● Avaliar as propriedades físicas e químicas dos materiais ● Entender os modos de falha e os procedimentos de manutenção	Entender processos para a remanufatura		Entender a experiência do serviço e como projetar para serviços	Entender as expectativas do usuário e sua percepção de valor	Entender a logística e o sistema de distribuição		
Narrowing	Slowing	Closing Regenerating			Informing		

Referências

- SUMTER et al. (2021)
- DOKTER; THUVANDER; RAHE (2021)
- MORENO et al. (2016)
- DE LOS RIOS; CHARNLEY (2017)
- KONIETZKO; BOCKEN; HULTINK (2020)

Fonte: Baseado em Sumter et al. (2021), Dokter, Thuvander e Rahe (2021), Moreno et al. (2016), De Los Rios e Charnley e Konietzko, Bocken e Hultink (2020)

2. 4 Modelos e matrizes de maturidade

2.4.1 Principais conceitos e definições

O conceito de maturidade pode ser visto como um processo evolutivo e como uma métrica (CARVALHO, 2014). Baseando-se em trabalhos anteriores, Khoshgoftar e Osman (2009) entendem o conceito de maturidade com base em um tripé, conectando os termos ação, atitude e conhecimento. “Ação” diz respeito à habilidade de agir e decidir, “atitude” representa a disposição para se envolver no processo e “conhecimento” está relacionado ao entendimento do impacto da ação e da atitude. A soma desses três vetores é o que melhor explica o conceito de maturidade, de acordo com Khoshgoftar e Osman (2009).

Como pontuam Pacchini et al. (2019), faz-se necessário notar a distinção entre os termos “maturidade” (*maturity*) e “prontidão” (*readiness*). Esses autores adotam como definição para prontidão “o estado em que uma organização está pronta para realizar uma tarefa” (PACCHINI et al., 2019, p. 103125, tradução nossa). Já em relação à maturidade, a definição adotada é a do “nível de evolução que uma organização alcançou em determinada tarefa” (PACCHINI et al., 2019, p. 103125, tradução nossa).

Essa diferenciação também foi tratada no trabalho de Schumacher, Erol e Sihn (2016), os quais destacam que a avaliação da prontidão é uma atividade geralmente prévia ao processo de maturação; já a avaliação da maturidade se destina a identificar o estado atual deste processo. Dessa forma, a prontidão demonstra a aptidão da organização em iniciar o desenvolvimento de um processo, sob a perspectiva da implementação, enquanto a maturidade se dispõe a analisar quão estruturado e sistematizado está este processo (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016).

Zoubeck et al. (2021) também compartilham desse ponto de vista, sob a ótica do uso de tecnologias. Tais autores indicam que os modelos de avaliação da prontidão são úteis em um momento prévio à implantação, com a verificação do preparo e cumprimento dos pré-requisitos. Por outro lado, os modelos de maturidade se enquadram na descrição e captura do estado atual de um processo (ZOUBECK et al., 2021). Similarmente, analisando empresas de manufatura de países europeus e buscando fatores que caracterizam a indústria 4.0, Castelo-Branco, Cruz-Jesus e Oliveira (2019) consideram que a prontidão está relacionada à possibilidade de presença, isto é, a habilidade para desenvolver a indústria 4.0, enquanto a maturidade se traduz na habilidade de processar as informações advindas dos atributos da indústria 4.0: a

interconectividade, a interoperabilidade e a virtualização (CASTELO-BRANCO; CRUZ-JESUS; OLIVEIRA, 2019).

Neste contexto, Bititci et al. (2015) apresentam três definições. Primeiramente, os autores definem maturidade como a reação ao ambiente de maneira adequada, por meio da aplicação de práticas de gestão e medição de desempenho, sendo que essa reação geralmente não é instintiva, mas sim aprendida. Nessa linha, os autores entendem modelo de maturidade como um arranjo de práticas em que se define, para cada área da organização, o nível de formalidade, sofisticação e incorporação dessas práticas, desde o *ad hoc* até o nível otimizado. Por fim, a avaliação da maturidade corresponde então ao uso sistemático de um modelo com o objetivo de avaliar as atuais práticas de uma organização, identificando o nível de maturidade em que se encontra (BITITCI et al., 2015).

Bititci et al. (2015) relembram que o conceito de modelo de maturidade não é uma novidade no campo da pesquisa em gestão. Tendo emergido na década de 1970 na literatura referente ao desempenho de sistemas de informação, o conceito de modelo de maturidade tem sido amplamente adotado e utilizado em diversas áreas (BITITCI et al., 2015). Nesta concepção de um processo de mudança organizacional, os modelos de maturidade foram influenciados pela área de Gestão da Qualidade, sendo Crosby (1994) um dos primeiros autores a abordar o assunto. Tendo verificado que as atividades empresariais relativas à gestão da qualidade eram subjetivas e de difícil mensuração, Crosby desenvolveu e propôs um modelo para avaliar a maturidade da gestão da qualidade. O “Aferidor de Maturidade da Gerência de Qualidade” divide-se em cinco estágios de maturidade: incerteza, despertar, esclarecimento, sabedoria e certeza (CROSBY, 1994).

Um modelo de maturidade descreve o desenvolvimento de capacidades específicas dentro de uma organização ao longo do tempo (HYNDS et al., 2014). A maior parte dos *frameworks* dos modelos de maturidade incluem quatro ou cinco níveis de maturidade, em que cada nível representa um maior grau de competências que o anterior (HYNDS et al., 2014). Dessa forma, os níveis de maturidade consistem em estágios evolucionários com uma clara definição de objetivos e processos, podendo funcionar como um guia para a organização (SEHNEM et al. 2019).

Sob a perspectiva da melhoria contínua, as propostas de modelos ou matrizes de maturidade podem fornecer pré-requisitos para as melhorias a serem desenvolvidas para o alcance do próximo estágio. Por meio delas, a organização pode identificar de que maneira está

operando, para então traçar planos a fim de alcançar uma melhor posição em sua jornada pela excelência. Segundo Rozenfeld et al. (2006, p. 483), “o nível de maturidade é um patamar evolucionário de melhoria do processo.”

As características de uma organização imatura são a reatividade e a improvisação, sendo que a decisão de implementar melhorias é provocada apenas por situações emergenciais (FERRADAZ et al., 2020). Para que a organização evolua de um estágio imaturo para um que comece a buscar a maturidade, devem se fazer presentes a proatividade para o aprendizado, a consideração de erros como lições aprendidas e oportunidades de melhoria e também a participação e o envolvimento de todos na organização (FERRADAZ et al., 2020). Assim, a mudança cultural deve se iniciar na alta gerência e então ser difundida por todos os níveis organizacionais. Khoshgoftar e Osman (2009) destacam ainda que, no que chamam de “mundo real”, ou seja, na prática, não se encontra uma organização completamente madura, pois o estágio de máximo desenvolvimento não pode ser atingido.

Helgesson, Höst e Weyns (2012) afirmam que a elaboração de modelos de maturidade é uma prática geralmente vista como uma maneira vantajosa de se comunicar as melhores práticas, pois sintetiza o conhecimento de modo que este possa ser útil em iniciativas de melhoria. Segundo Bititci et al. (2015), existem duas formas em que a utilização de modelos de maturidade pode agregar valor às organizações. Inicialmente, a abordagem do modelo de maturidade provê uma estrutura que possibilita discussões entre o time de gestão, embasadas no engajamento e apropriação dos resultados da avaliação, tornando mais fácil o processo de aprendizagem organizacional. Além disso, a rapidez de obtenção dos resultados também facilita a revisão das práticas organizacionais, aumentando a frequência das análises de maturidade e promovendo a melhoria contínua (BITITCI et al., 2015).

Apesar de suas semelhanças, Maier, Moultrie e Clarkson (2012) estabeleceram diferenças chave entre um *grid* (ou matriz) e um modelo de maturidade, no que diz respeito à orientação, modo de avaliação e intenção, como mostra o Quadro 6.

Quadro 6 – Diferenças entre matriz e modelo de maturidade

Atributos	Grid ou matriz	Modelo
Orientação	Não direcionado a processos específicos e aplicáveis a empresas de diferentes setores industriais	Processos específicos, como o desenvolvimento de <i>software</i> e aquisições
Modo de avaliação	Arranjo em formato de matriz ou grid, criando uma série de células	Escala Likert, questionários binários e <i>checklists</i>
Intenção	Não objetivam fornecer certificação	Podem ser usados para obtenção de certificação

Fonte: Maier, Moultrie e Clarkson (2012).

Dessa forma, em relação à orientação, Maier, Moultrie e Clarkson (2012) distinguem que os *grids* de maturidade identificam as características que a organização deveria ter para o projeto e implantação de processos de alto desempenho, sendo aplicáveis a empresas de diferentes setores, enquanto os modelos são destinados a processos específicos, como o desenvolvimento de *software*.

Sobre o modelo de avaliação, a distinção é mais clara. Os modelos fazem uso de ferramentas mais clássicas, como escala Likert, questionários baseados em “sim ou não” e *checklists*. Já os *grids* de maturidade, tipicamente estruturados em formato de matriz, correlacionam os níveis de maturidade aos aspectos ou atividades-chave, criando, assim, um conjunto de células que descrevem em formato de texto os traços característicos de desempenho em cada nível (MAIER; MOULTRIE; CLARKSON, 2012).

Por fim, como contrastes em relação à intenção final de cada ferramenta, Maier, Moultrie e Clarkson (2012) destacam que por seguirem um modelo padrão, os modelos de maturidade podem ser usados para a obtenção de certificação, enquanto os *grids* e matrizes não objetivam este fim e podem ser usados em conjunto a iniciativas de melhoria mais amplas.

2.4.2 *Capability Maturity Model Integration (CMMI)*

Dentre os modelos de maturidade mais usualmente utilizados, destaca-se o *Capability Maturity Model Integration (CMMI)*, desenvolvido pelo Instituto de Engenharia de Softwares (SEI) da Universidade Carnegie Mellon, em Pittsburgh, na Pensilvânia, EUA (CARVALHO, 2014; KUWAMOTO et al., 2009). Segundo Chrissis et al. (2003), os modelos de capacidade e maturidade focam na melhoria de processos em uma organização, sendo compostos por elementos essenciais dos processos de uma ou mais áreas de negócio. Tais modelos descrevem

uma trajetória evolutiva de melhorias, do *ad hoc*, com processos imaturos, ao disciplinado, com processos maduros.

Existem dois tipos de abordagens para os modelos de capacidade e maturidade, que são também chamadas “representações”, refletindo a organização, uso e apresentação dos componentes do modelo. Em relação ao CMMI, as abordagens (representações) são por estágio e contínua. A representação contínua permite à organização selecionar uma área específica e realizar melhorias. Nesta abordagem, são usados níveis de capacidade para caracterizar aprimoramentos relativos a uma área individual. Assim, a representação contínua permite à organização aprimorar áreas diferentes em ritmos diferentes (CHRISSIS et al., 2003).

A representação por estágio usa conjuntos de áreas de processo pré-definidas para estabelecer uma trajetória de melhorias para a organização, descrita por meio de níveis de maturidade, os quais correspondem a um *plateau* bem definido para o alcance de processos organizacionais aprimorados. A representação por estágio oferece uma maneira sistemática e estruturada para execução da melhoria contínua “um passo de cada vez”. Alcançar determinado estágio assegura que uma melhoria adequada foi executada como base para se atingir o próximo estágio (CHRISSIS et al., 2003).

Em suma, a representação contínua foca na capacidade de uma área do processo, medida por meio dos níveis de capacidade, enquanto a representação por estágio foca na maturidade organizacional, medida por meio dos níveis de maturidade. Existem seis níveis de capacidade, numerados de 0 a 5, e cinco níveis de maturidade, numerados de 1 a 5, conforme mostra o Quadro 7.

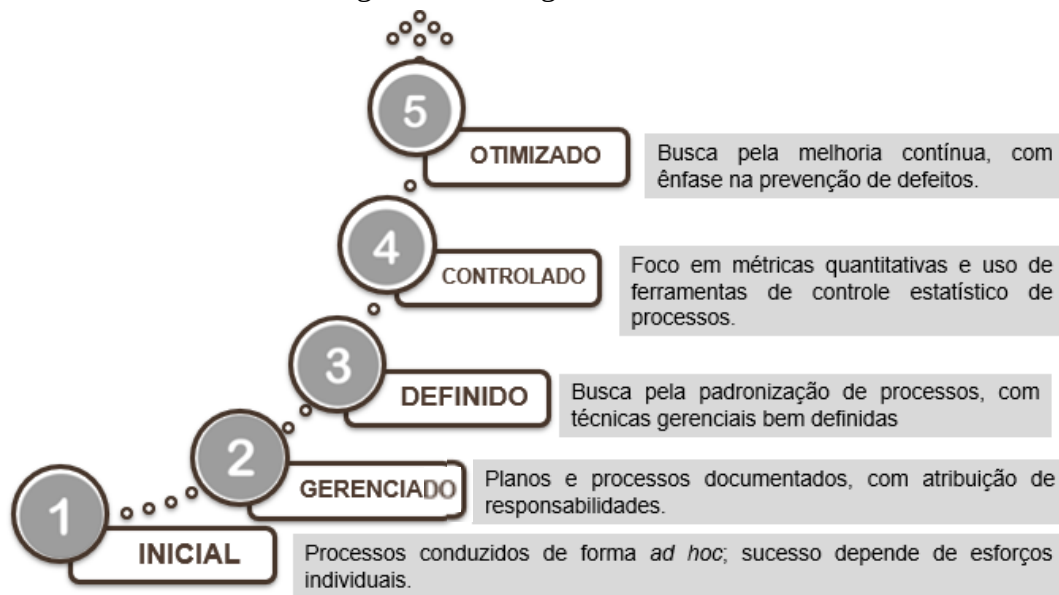
Quadro 7 – Diferenças entre as representações do CMMI

Nível	Representação Contínua Níveis de capacidade	Representação por estágio Níveis de maturidade
0	Incompleto	N/A
1	Realizado	Inicial
2	Gerenciado	Gerenciado
3	Definido	Definido
4	Quantitativamente gerenciado	Quantitativamente gerenciado
5	Otimizado	Otimizado

Fonte: Adaptado de Chrissis et al. (2003).

Dessa forma, na representação por estágios, a maturidade da organização é medida por meio de um conjunto de processos compreendidos em um estágio evolutivo, em cinco níveis, conforme mostra a Figura 15 (CARVALHO, 2014). Nota-se que os níveis de capacidade de 2 a 5 têm as mesmas denominações que os níveis de maturidade de 2 a 5. Segundo Chrissis et al. (2003), não se trata de uma coincidência, mas sim, de algo intencional, uma vez que os conceitos são complementares.

Figura 15 – Estágios evolutivos do CMMI



Fonte: Chrissis et al. (2003).

No nível de maturidade 1, Inicial, os processos são conduzidos caoticamente e a organização não dispõe de um ambiente estável. Seu desempenho é dependente do heroísmo de determinadas pessoas e não há a utilização de processos estabelecidos. As organizações neste nível possuem uma tendência de sobrecarga e abandono de processos em tempos de crise. No nível de maturidade 2, Gerenciado, os processos são planejados, medidos e controlados, com planos documentados e atribuição de responsabilidades. O nível 3 é caracterizado pelo uso padronizado de procedimentos, ferramentas e métodos, estabelecendo uma consistência por toda a organização. Neste nível, os processos são descritos de forma mais rigorosa, com propósito, *inputs*, atividades, funções, verificação e *outputs*. Em outras palavras, tem-se que os processos são gerenciados de maneira proativa por meio do entendimento das interrelações entre as atividades (CHRISSIS et al., 2003).

No nível de maturidade 4, a organização estabelece objetivos quantitativos como critérios para gerenciar seus processos. Assim, a qualidade e o desempenho do processo são

entendidos em termos estatísticos, com o apoio de ferramentas quantitativas. Com isso, as causas especiais de variação do processo são identificadas e corrigidas para prevenir ocorrências futuras. Por fim, no nível de maturidade 5, o foco está em melhorar continuamente o desempenho do processo por meio de inovações incrementais e melhorias tecnológicas. Os efeitos de tais mudanças são medidos e avaliados de acordo com os objetivos do negócio (CHRISSIS et al., 2003).

2.4.3 Análise crítica dos modelos de maturidade relacionados à sustentabilidade e desenvolvimento de produtos

No Brasil, um modelo de maturidade amplamente utilizado para a gestão do PDP é o proposto por Rozenfeld et al. (2006) no livro “*Gestão de desenvolvimento de produtos: Uma referência para a melhoria do processo*”, o qual sintetiza as melhores práticas do PDP e as distribui em cinco níveis: básico, intermediário, mensurável, controlado e melhoria contínua. Neste modelo (Figura 11), os níveis são relacionados com as macrofases pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento, representando o que os autores chamaram de “proposta lógica de passos evolutivos do PDP” (ROZENFELD et al., 2006, p. 484). Os autores ainda ressaltam que o modelo de referência não deve ser entendido como uma norma, pois há uma marcante distinção entre ambos. Diferentemente do modelo, a norma se restringe a estabelecer o que deve ser feito para a obtenção de uma certificação e não indica como realizar cada atividade (ROZENFELD et al., 2006).

Observando a Figura 16, nota-se que no nível básico algumas atividades essenciais do PDP são realizadas; no nível intermediário, ocorre a padronização das atividades e previsão dos resultados, com utilização de ferramentas consagradas. A utilização de indicadores caracteriza o nível mensurável e a correção de desvios é feita no nível controlado, sendo que o nível mais elevado corresponde ao de melhoria contínua de todo o processo. Nota-se ainda que o desenvolvimento sustentável é considerado a partir do nível intermediário, sendo que os “planos de reutilização, reciclagem e descarte integrados e realizados” aparecem na etapa do pós-desenvolvimento, no Subnível 2.4.

Figura 16 – Modelo de maturidade de Rozenfeld (2006)

Nível	Área de conhecimento	Sub Nível	Pré-desenvolvimento		Desenvolvimento				Pós-desenvolvimento		Processos de apoio		Transformação do PDP			
			Planejamento estratégico do produto	Planejamento do projeto	Projeto informacional	Projeto conceitual	Projeto detalhado	Preparação da produção	Lançamento do produto	Acompanhar produto e processo	Descontinuar produto	Gerenciar mudanças de engenharia		Melhoria incremental do PDP		
Básico: realiza as atividades	Engenharia produto	1.1		escopo, atividades macro e tempos	define requisitos, concepção, estrutura, desenhos, utiliza CAD, dimensiona itens				compra recursos					inicial		
	Marketing e qualidade	1.2	conversa com alta cúpula		desdobra requisitos, analisa ciclo de vida	considera requisitos na homologação do produto		libera produção	integra ações	atende à legislação						
	Engenharia processos, produção e suprimentos	1.3				planeja processo macro, acordos com fornecedores		produz lote piloto e homologa processo								
	Gestão de projetos e custos	1.4	pensa em portfólio		realiza estudo viabilidade, utiliza sistema	realiza aprovação simples de fases (gates)				planeja lançar						
Intermediário: utiliza padrões, métodos; gerencia atividades; é repetitivo	Engenharia produto	2.1	planejamento das plataformas de produto integrada ao portfólio	realiza análise de riscos, qualidade	modelagem funcional, define princípios de solução, concepções alternativas, aplica matriz morfológica, DFx e QFD		aplica FMEA, utiliza CAE, GED			integrado ao PDP, existe time de acompanhamento		realizado de maneira informal	ciclo de melhoria ocorre sem monitoramento de indicadores ou integração	com projetos de transformação gerenciados de forma integrada		
	Marketing e qualidade	2.2	realiza gestão de portfólio integrada ao planejamento estratégico da empresa					os processos de negócio resultantes são desenhados e projetados simultaneamente								
	Engenharia processos, produção e suprimentos	2.3		integra parceiros da cadeia de suprimentos		detalha o processo de fabricação e montagem, utiliza CSM, CAPP e PDM										
	Gestão de projetos, custos e meio ambiente	2.4	realiza todas atividades de gestão de projeto; existe integração entre planos; realiza gates de projeto com critérios pré definidos; monitora continuamente custos, volumes e preços previstos; monitora riscos; desenvolvimento sustentável é considerado						planos de reutilização, reciclagem e descarte integrados e realizados						processo formalizado, controlado, usa sistema	
	Resultados são mensuráveis	3	possui indicadores de desempenho para todas atividades.													
Existe controle e correções	4	ocorre controle de todas atividades com base nos indicadores e são tomadas ações corretivas integradas aos processos de apoio de gerenciamento de mudanças e melhoria incremental. Aplica-se o gerenciamento dos parâmetros críticos, e projeto robusto (método Tagushi).												projetos de transformação monitorados		
Melhoria contínua	5	ciclo de transformação do PDP integrado ao de melhoria incremental, ao gerenciamento de mudanças e ao planejamento do projeto														

Fonte: Rozenfeld (2006).

Além da gestão do PDP, existem modelos e matrizes de maturidade que têm sido propostos em áreas como gestão de projetos (NASCIMENTO et al., 2014; RABECHINI JR.; PESSÔA, 2005), *ecodesign* (PIGOSSO, 2012), *green products* (DANGELICO, PONTRANDOLFO, 2010) e gestão ambiental (REIS, 2016).

Para a identificação de trabalhos recentes que propõem modelos ou matrizes de maturidade em sustentabilidade, uma revisão sistemática da literatura foi conduzida na base Scopus, utilizando as palavras-chave apresentadas no Quadro 8. Na primeira linha estão as palavras-chave relacionadas à maturidade e na segunda linha, as relacionadas à sustentabilidade. Ambos os grupos foram conectados utilizando o operador Booleano AND e os termos de cada grupo foram conectados utilizando o operador Booleano OR.

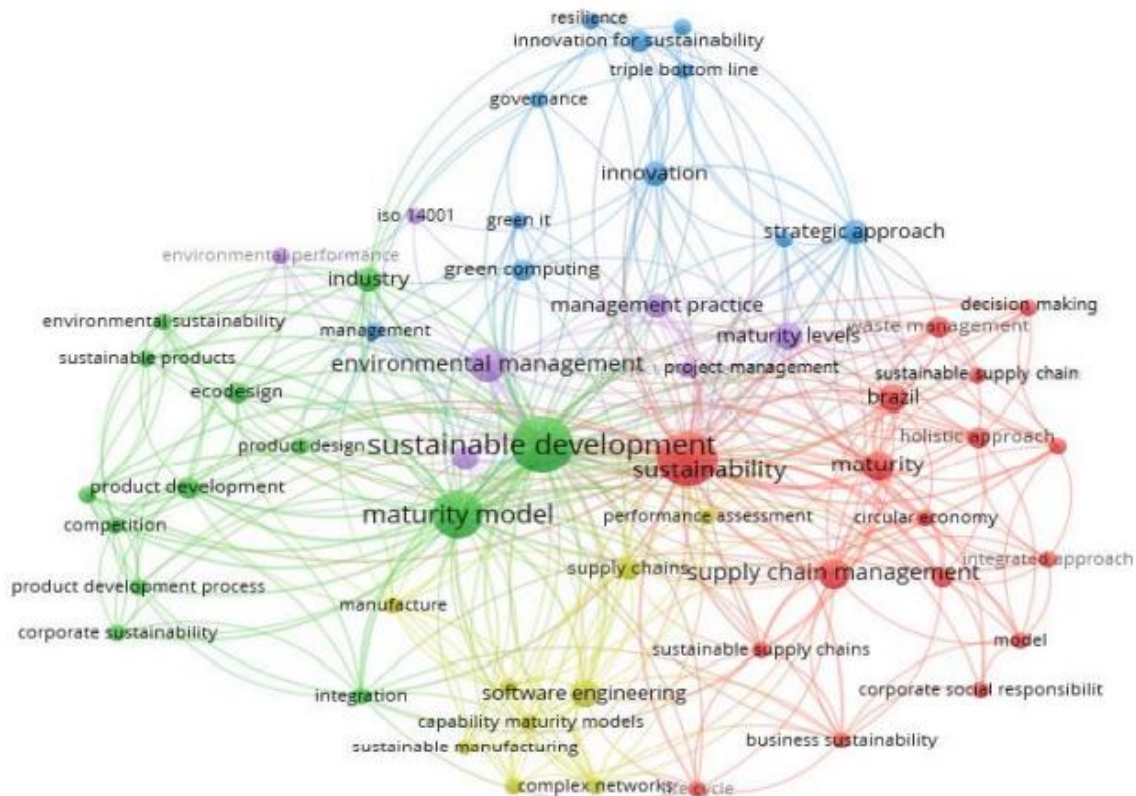
Quadro 8 – Palavras-chave da busca inicial

Maturidade	<i>“maturity model”; “maturity approach”; “maturity profile”; “maturity proposal”; “maturity grid”; “maturity assessment”; “maturity framework”; “maturity mapping”; “self-evaluation maturity”; “maturity level”; “maturity matrix”</i>
Sustentabilidade	<i>sustainability; “sustainable management”; “sustainable business models”; “environmental sustainability”; ecodesign; “ecodesign model”; “environmental requirement”; “environmental concern”; “environmental management”; “environmentally conscious”</i>

Fonte: elaborado pela autora.

Foram obtidos, inicialmente, 360 documentos. Ao aplicar o critério de selecionar somente artigos em inglês publicados em periódicos, obteve-se 187 documentos. Na sequência, com a leitura dos títulos e resumos, foram excluídos os artigos que não tratavam da proposta e/ou implementação de modelos de maturidade. Dessa forma, a amostra final abrangeu 45 artigos. Utilizando o *software VOSViewer*, foi possível obter a rede de palavras-chave ilustrada na Figura 17, que mostra a coocorrência de duas palavras-chave.

Figura 17 – Rede de coocorrência de palavras-chave da busca inicial



Fonte: elaborada pela autora.

Cinco *clusters* de diferentes cores foram formados. O cluster roxo destaca a gestão ambiental e a gestão de projetos como duas áreas em que o uso de modelos de maturidade tem sido investigado. Os *clusters* azul e amarelo apresentam termos relacionados à engenharia de *software* e tecnologia da informação, áreas em que os modelos de maturidade foram primeiramente utilizados. O *cluster* vermelho revela que a área de gestão da cadeia de suprimentos tem utilizado modelos de maturidade como suporte à tomada de decisão. Por fim, o *cluster* verde destaca que o desenvolvimento de produtos também é uma área-chave interessada na implementação de modelos de maturidade relacionados a questões sustentáveis.

Foi possível identificar cinco trabalhos cujo foco estava no uso de modelos de maturidade para avaliar a integração da sustentabilidade ao desenvolvimento de produtos.

- *Ecodesign Maturity Model (EcoM2)* – Pigosso; Rozenfeld e McAloone (2013)

Pigosso, Rozenfeld e McAloone (2013) desenvolveram um modelo de maturidade em *ecodesign* para auxiliar organizações no processo de implementação desta abordagem. Com base no diagnóstico da maturidade do desenvolvimento de produtos da empresa na implementação do *ecodesign*, o modelo propõe as práticas e melhorias a serem aplicadas,

adotando uma abordagem de melhoria contínua. Uma particularidade deste modelo é a combinação dos níveis de evolução e dos níveis de capacidade em *ecodesign* para então formar os níveis de maturidade, como mostra o Quadro 9.

Quadro 9 – Níveis de maturidade do EcoM2

		Nível de maturidade em <i>ecodesign</i>				
		1	2	3	4	5
Nível de evolução em <i>ecodesign</i>	1	Capabilidade 3	Capabilidade 4	Capabilidade 5	Capabilidade 5	Capabilidade 5
	2	-	Capabilidade 3	Capabilidade 3	Capabilidade 5	Capabilidade 5
	3	-	-	Capabilidade 3	Capabilidade 4	Capabilidade 5
	4	-	-	-	Capabilidade 3	Capabilidade 5
	5	-	-	-	-	Capabilidade 5

Fonte: Pigosso (2012)

Os níveis de evolução englobam os caminhos para a implementação, a abertura da organização para esta mudança e seu nível de conhecimento em *ecodesign*, variando de 1 a 5. No nível 1, a empresa tem pouca experiência em *ecodesign* e não aplica completamente suas práticas. No nível 2, a empresa dá seus primeiros passos na aplicação do *ecodesign* e é familiar com algumas práticas e seus benefícios, executando projetos piloto com foco em melhorias incrementais. O nível 3 é caracterizado pelo reconhecimento por parte da empresa da importância e dos benefícios do *ecodesign*, sendo que as questões ambientais passam a ser consideradas em todos os projetos. No nível 4, as práticas de *ecodesign* são incorporadas sistematicamente ao desenvolvimento de produtos, com análise da funcionalidade, enquanto no nível 5, as questões ambientais são totalmente incorporadas à estratégia da empresa.

Já o nível de capacidade avalia qualitativamente quão bem a organização aplica uma prática gerencial de *ecodesign*. Sendo inspirado no modelo CMMI, também é composto por 5 níveis (incompleto, *ad hoc*, formalizado, controlado e melhorado) (PIGOSSO, 2012).

- *IRI Sustainability Maturity Model - Hynds et al. (2014)*

Em seu artigo publicado na revista *Research-Technology Management*, os autores Hynds et al. (2014) elaboraram um modelo de maturidade para a sustentabilidade no desenvolvimento de novos produtos, contendo catorze dimensões organizadas em duas áreas: estratégia, englobando as atividades de infraestrutura e planejamento, e ferramentas de *design*, englobando as funções técnicas de engenharia do produto. Cada uma das catorze dimensões abrange aspectos relacionados aos comportamentos, processos e ferramentas utilizadas,

permitindo diagnosticar em qual dos quatro níveis de maturidade definidos (iniciando, aprimorando, prosperando e liderando) a organização se enquadra (HYNDS et al., 2014).

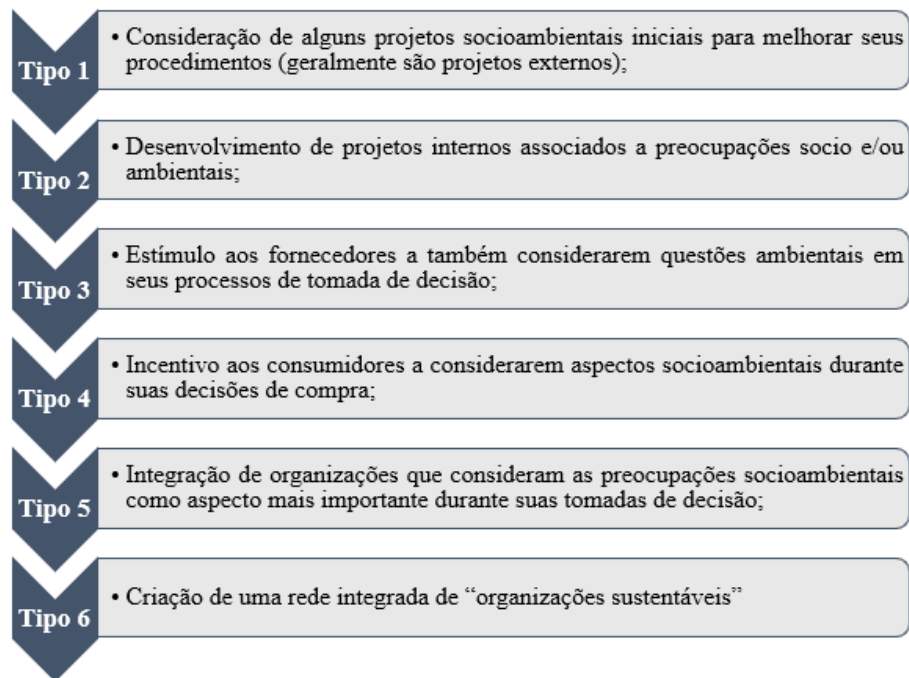
- *Maturity framework towards sustainability – Gouvinhas et al. (2016)*

Gouvinhas et al. (2016) desenvolveram um *framework* para um melhor entendimento de quais ações necessitam ser tomadas antes de as organizações implementarem ferramentas do *ecodesign*.

A classificação proposta por Gouvinhas et al. (2016) é composta por seis tipos de empresa. Em empresas do tipo 1 (“completamente imaturas”), o *ecodesign* não foi implementado e suas práticas estão mais relacionadas à lucratividade, redução de custos e eficiência produtiva. Nas empresas do tipo 2 (“empresas imaturas”), alguns projetos de *ecodesign* podem ter se iniciado, com certa “timidez”, e geralmente com auxílio de empresas de consultoria. No tipo 3, as empresas “inicialmente maduras” desenvolvem projetos sustentáveis internamente, tanto ao nível da produção quanto do desenvolvimento de produto. No tipo 4, as empresas são “maduras” e introduzem o *ecodesign* em seus processos diários, estimulando seus fornecedores a também considerarem preocupações ambientais em seus processos.

Os autores denominam as empresas do tipo 5 como “maduras e docentes”, no sentido de que tais empresas educam seus clientes para considerarem aspectos ambientais durante suas decisões de compra e desenvolvem novos procedimentos de *marketing*, aprimorando suas abordagens para ter uma relação mais próxima com os consumidores. Por fim, as empresas do tipo 6, denominadas “integradas”, consideram as questões ambientais e sociais como os critérios mais importantes para fazer negócio. Além de trocar experiências sustentáveis e estimular seus parceiros a fazerem o mesmo, essas organizações criam uma rede de “empresas sustentáveis” (GOUVINHAS et al., 2016). Um diferencial do *framework* proposto é o de que os autores também discutem os requisitos mínimos que necessitam ser atendidos para a mudança de um nível a outro, como ilustra a Figura 18.

Figura 18 – Requisitos para mudança de nível em Gouvinhas et al. (2016)



Fonte: Gouvinhas et al. (2016).

- *Grid de Maturidade para o design de dispositivos médicos – Moultrie, Sutcliffe e Maier (2016)*

Moultrie, Sutcliffe e Maier (2016) desenvolveram uma matriz de maturidade para avaliar a incorporação de princípios do *ecodesign* por empresas fabricantes de dispositivos médicos. Uma particularidade deste modelo é a de que os autores consideraram as diferentes fases do ciclo de vida do produto, elaborando um *grid* para cada uma delas (abastecimento de matéria-prima, manufatura e montagem, embalagem e distribuição, uso do produto e fim de vida). Cada *grid* apresenta a estrutura de cinco níveis, de 1 a 5, variando desde os piores resultados ambientais até os melhores resultados ambientais. Os autores ressaltam que a ferramenta foi desenvolvida com a intenção de analisar as características do produto (dispositivo médico), em vez de olhar para o “processo de maturidade”, nos termos dos autores. Dessa forma, fazem a ressalva de que à medida que as tecnologias envolvidas avançarem, a ferramenta necessitará ser atualizada (MOULTRIE; SUTCLIFFE, MAIER, 2016).

- *Strategic Planning Method for the Sustainability Integration in the Product Development Process (PEPDIPS) - Teixeira e Canciglieri Junior (2019)*

Teixeira e Canciglieri Junior (2019) defendem o ponto de vista de que existe uma necessidade de avançar o conhecimento em relação à relevância de se integrar a sustentabilidade ao planejamento estratégico de longo prazo. Com base nisso, os autores desenvolveram o Método de Planejamento Estratégico do Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos Sustentáveis (PEPDIPS, na sigla em inglês). Trata-se de um método que pode ser aplicado por qualquer empresa para guiar e facilitar a integração da sustentabilidade ao processo de desenvolvimento de produtos, sendo composto por 5 níveis (insignificante, ignorante, interessado, envolvido e integrado) e dois estágios (reconhecimento e compartilhamento). No estágio de reconhecimento, a avaliação da maturidade ocorre por meio da análise de seis parâmetros: estratégia, organizacional, motivação, operação e parceria. No estágio de compartilhamento, o plano de ação com as melhorias pretendidas é elaborado e comunicado (TEIXEIRA; CANCEGLIERI JUNIOR, 2019).

Mais recentemente, o estudo de Sehnem et al. (2019) teve como objetivo analisar modelos de negócio de empresas brasileiras para identificar os setores engajados com a EC, verificar as práticas sustentáveis adotadas, bem como avaliar o nível de maturidade de tais modelos, apresentando os fatores determinantes para a circularidade dos negócios. Para isso, seguiram a tipologia proposta pela Fundação Ellen MacArthur que separa os materiais em ciclos técnicos e biológicos. As práticas que integram ambos os ciclos foram então correlacionadas aos níveis de maturidade adaptados do estudo de Grant e Pennypacker (2006), variando do nível 0 (não existente) ao nível 5 (otimizado). A presença das práticas permite enquadrar a organização no estágio 1. A presença de indicadores de desempenho caracteriza o nível 2. Já a presença de um histórico de tais indicadores enquadra a organização no nível 3, enquanto no nível 4 as metas de melhoria estão ligadas aos resultados apresentados pelos indicadores. Por fim, o nível 5 ocorre quando as metas de melhoria são recorrentes ano após ano, e procura-se justificativas para aquelas não atingidas.

2.4.4 Abordagens para a avaliação de práticas de gestão

Panizzolo, Biazzo e Garengo (2010) defendem que uma ferramenta de avaliação para o PDP deve tomar como base as abordagens normativa-situacional ou normativa-contingencial, ou seja, deve-se definir os requisitos seguindo uma lógica de coerência, variando de acordo com as condições do contexto. Dessa forma, para facilitar o entendimento, os autores desenvolveram um *framework* para classificação dos métodos avaliativos das práticas de gestão. Esse *framework* foi elaborado a partir de duas dimensões: a *lógica de avaliação* e o *nível de abstração*. A lógica de avaliação compreende três atributos: a *conformidade*, correspondente à avaliação da aderência a um conjunto de requisitos, a *coerência*, relacionada à avaliação do alinhamento das práticas, levando em conta o contexto, e a *causalidade*, que diz respeito às relações de causa e efeito entre as ineficiências observadas e os fatores que as geram. Já o nível de abstração está relacionado à natureza das ferramentas; aquelas com um alto nível de abstração fornecem guias e princípios que necessitam ser complementados pelo julgamento dos avaliadores, enquanto as que possuem baixo nível de abstração apresentam indicadores detalhados, que reduzem a subjetividade. Ao propor a intersecção dessas duas dimensões, os autores elaboraram uma matriz, de acordo com o Quadro 10.

Quadro 10 – Abordagens para a avaliação de práticas de gestão

	<i>Lógica de avaliação</i>		
	<i>Conformidade</i>	<i>Coerência</i>	<i>Causalidade</i>
Alto nível de abstração	Abordagem Paradigmática I	Abordagem Contingencial II	Abordagem Aberta III
Baixo nível de abstração	Abordagem Normativa IV	Abordagem Contingencial Normativa V	

Fonte: Adaptado de Panizzolo, Biazzo e Garengo (2010).

A conformidade apresenta-se sob a forma de duas abordagens: a Paradigmática e a Normativa. A célula I (alta abstração; conformidade), referente à Abordagem Paradigmática, engloba os modelos compostos por requisitos não-prescritivos; em outras palavras, podem ser descritos como paradigmas, estando relacionados a critérios interdependentes. O *Malcolm Baldrige Criteria for Performance Excellence Framework* é um exemplo de modelo que segue essa lógica. Um outro exemplo mais clássico é o *Capability Maturity Model Integration*

(CMMI), com a descrição das práticas gerenciais tipicamente associadas aos objetivos que a organização busca para se destacar no desenvolvimento de produtos. Na célula IV (baixa abstração; conformidade), referente à Abordagem Normativa, determina-se o nível de aderência a requisitos prescritivos, com critérios de julgamento claros e questões binárias (PANIZZOLO; BIAZOO; GARENGO, 2010).

Correspondentemente, a coerência também se apresenta sob a forma de duas abordagens: a Contingencial e a Contingencial Normativa. A célula II (alta abstração; coerência), corresponde à Abordagem Contingencial, em que os modelos funcionam como guias para a análise de relações entre fatores contingenciais e atributos organizacionais, ausentes de critérios detalhados para julgamento. Já a Abordagem Contingencial Normativa, na célula V (baixa abstração; coerência), engloba requisitos prescritivos e um conjunto de regras “se - então” (PANIZZOLO; BIAZOO; GARENGO, 2010).

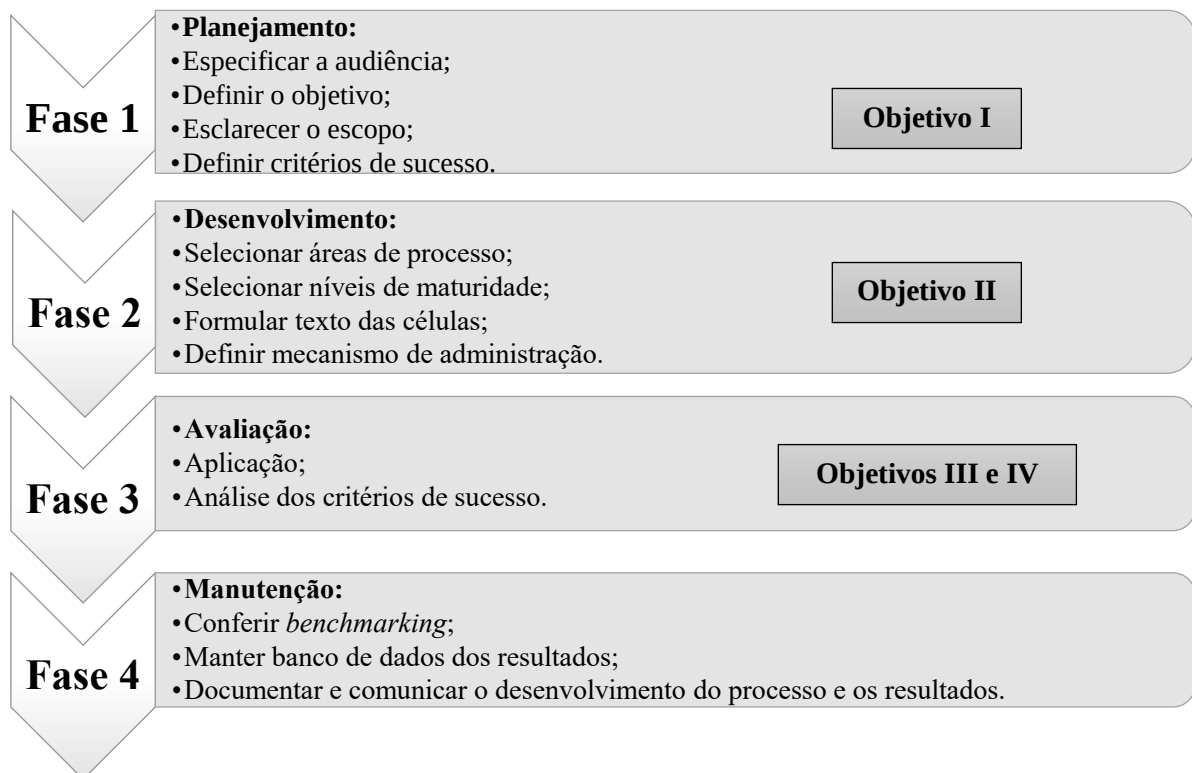
A causalidade segue a mesma divisão. Na célula III (alta abstração; causalidade), a abordagem Aberta pressupõe o delineamento de conexões entre sintomas de ineficiência e suas causas. Já a célula VI está representada como vazia, pois diz respeito a ferramentas que deveriam conter um conjunto de conhecimento codificados que permitiriam a rápida identificação das fontes de ineficiência referentes aos problemas observados. O desenvolvimento dessas ferramentas torna-se difícil dada a complexidade da natureza dos sistemas humanos (PANIZZOLO; BIAZOO; GARENGO, 2010).

3 MÉTODO DE PESQUISA

A partir da seleção e delimitação do escopo e com a finalidade de cumprir os objetivos e responder as questões de pesquisa levantadas na seção 1, definem-se neste capítulo as etapas referentes ao método de pesquisa empregado.

Para o desenvolvimento e proposição da matriz de maturidade, principal contribuição desta pesquisa, empregou-se o *roadmap* para desenvolvimento de matrizes de maturidade proposto por Maier, Moultrie e Clarkson (2012). A escolha deste roteiro como guia para este trabalho se justifica pelo seu reconhecimento na literatura. Publicado em 2012 no periódico *IEEE Transactions on Engineering Management*, a base Scopus indica que o artigo recebeu 122 citações; na base Google Scholar, a notoriedade é ainda mais evidente, com um total de 267 citações. Os autores sugerem a utilização de quatro fases para a elaboração de uma matriz de maturidade: planejamento, desenvolvimento, avaliação e manutenção, enfatizando que para cada fase há uma série de decisões que precisam ser tomadas pelos pesquisadores. A Figura 19 mostra a relação dessas quatro fases e seus pontos decisivos com o cumprimento dos objetivos específicos deste trabalho.

Figura 19 - Roteiro para a elaboração de uma matriz de maturidade



Fonte: Adaptado de Maier, Moultrie e Clarkson. (2012).

3.1 Fase 1 – Planejamento

Na Fase 1, de Planejamento, Maier, Moutrie e Clarkson (2012) definem quatro decisões como as primeiras ações necessárias para a elaboração da ferramenta. A primeira delas é a especificação da audiência, com a definição dos usuários esperados, tanto em termos de coleta de dados quanto do foco da avaliação, ou seja, a própria organização. Em seguida, tem-se a definição do objetivo, que pode ser analítico, envolvendo a busca por evidências para determinar melhorias necessárias, ou para o *benchmarking*, utilizando uma empresa que opera em nível de excelência para servir como referência. Segundo os autores, apesar de os *grids* de maturidade adotarem a estratégia analítica, é possível perceber dois focos: primeiro “criando consciência” e então utilizando a prática do *benchmarking*. A próxima decisão refere-se ao esclarecimento do escopo, podendo ser genérico ou específico. Quanto aos critérios de sucesso, dois parâmetros são definidos: a usabilidade, que se refere ao grau de entendimento dos usuários sobre a linguagem e conceitos usados, e a utilidade, que se refere à percepção da organização quanto aos efeitos do uso da ferramenta, em termos de aprendizado e planos de melhoria (MAIER; MOULTRIE; CLARKSON, 2012).

Assim, a matriz de maturidade proposta objetiva ter como audiência profissionais envolvidos no desenvolvimento de produtos, tanto deste próprio departamento quanto de áreas correlatas, como Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), que sejam tomadores de decisão em organizações envolvidas com o desenvolvimento de novos produtos e que apresentem preocupações quanto à sua pegada ambiental. Como exemplos de funções dos usuários esperados da matriz é possível citar os gerentes de produto, analistas de produto, gerentes de portfólio, coordenadores de P&D, gerentes de sustentabilidade, *designers*, entre outras funções. Quanto ao objetivo, a matriz proposta enquadra-se como uma ferramenta analítica, com a criação de consciência como primeiro passo. Assim, em relação ao escopo, pode-se dizer que se trata de uma ferramenta genérica, sem um foco específico para determinado tipo de indústria. Por fim, o sucesso é definido como a habilidade da matriz em prover *insights* e direcionamentos a partir do diagnóstico e entendimento de quão circular é o atual do processo de desenvolvimento de produto na organização.

3.2 Fase 2 – Desenvolvimento

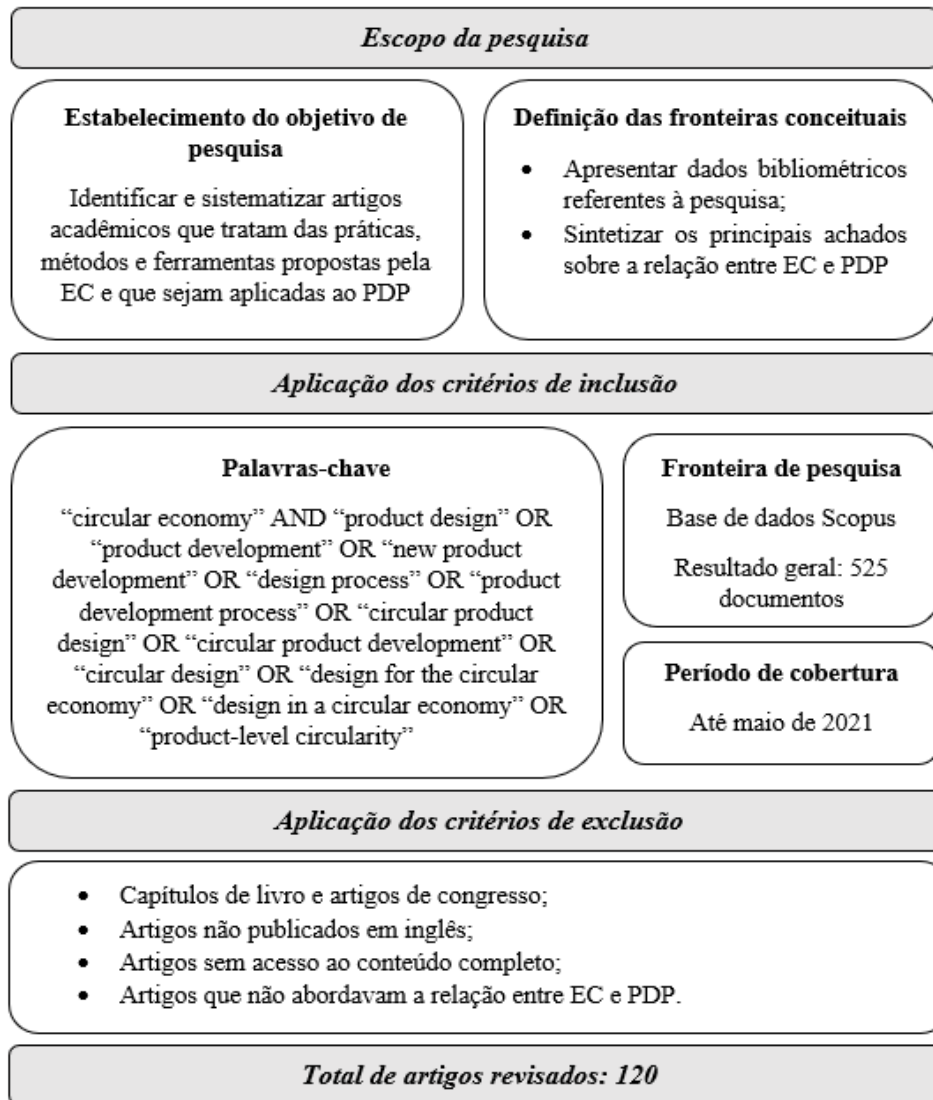
A Fase 2, de Desenvolvimento, é a mais extensa em termos de decisões envolvidas e atividades executadas e corresponde ao cumprimento do objetivo específico II. Compreende a seleção das áreas de processo, dos níveis de maturidade, a formulação dos textos das células e a definição do mecanismo de administração. Dessa forma, diz respeito à elaboração da arquitetura da matriz propriamente dita, obtendo como resultado sua versão inicial.

Maier, Moutrie e Clarkson (2012) enfatizam que a seleção das áreas de processo é provavelmente uma das etapas mais difíceis da elaboração de uma matriz de maturidade. Os autores recomendam a condução de uma revisão de literatura para prover este embasamento teórico inicial. Dessa forma, para o levantamento teórico de práticas, métodos e ferramentas provenientes da EC aplicáveis ao desenvolvimento de produtos circulares, foi realizada uma revisão sistemática de literatura seguindo abordagens de estudos que utilizaram esse método de pesquisa (tais como GOVINDAN; HASANAGIC, 2018; LUIZ et al., 2016; PINHEIRO et al., 2019). O protocolo de seleção dos artigos, baseado em Lu et al. (2013), pode ser visto na Figura 20.

A busca foi atualizada até maio de 2021. Em relação à fronteira da pesquisa, selecionou-se a base Scopus, tendo em vista seu prestígio no meio científico (GOVINDAN; HASANAGIC, 2018), sendo caracterizada como um dos bancos de dados acadêmicos mais abrangentes e reconhecidos (HARZING; ALAKANGAS, 2016). Em relação à definição dos termos de busca, foram realizados testes com palavras-chave relacionadas à economia circular, desenvolvimento de produtos e *design* circular de produtos. Optou-se por utilizar sinônimos destes termos para tornar a amostra mais representativa. Assim, utilizou-se no Scopus o campo “títulos, resumo ou palavras-chave”, sem restrição de ano de publicação. O resultado geral obtido pela busca foi de 525 publicações.

Na sequência, foram excluídos da amostra os capítulos de livro, artigos de congresso, artigos não publicados em inglês, artigos sem acesso ao conteúdo completo e aqueles que não abordavam diretamente a relação entre EC e PDP. Assim, após a leitura dos títulos e resumos, a amostra foi refinada para 120 artigos, cujas análises são apresentadas no capítulo de Resultados.

Figura 20 – Protocolo de seleção dos artigos da revisão sistemática



Fonte: Adaptado de Lu et al. (2018).

Como próxima decisão da Fase 2, Maier, Moutrie e Clarkson (2012) citam a seleção dos níveis de maturidade, ou seja, a escala de classificação, com níveis bem definidos e que mostrem uma progressão lógica. Para a matriz de maturidade proposta neste trabalho, optou-se por utilizar cinco níveis, do 1 ao 5, tomando como inspiração as ferramentas mais tradicionais, como o CMMI. A decisão seguinte corresponde à formulação dos textos das células, isto é, à intersecção entre as áreas de processo e os níveis de maturidade. Aqui buscou-se seguir a recomendação de que as descrições deveriam ser precisas, claras e concisas. Nesse sentido, um quadro com as definições de cada área de processo e os respectivos exemplos de abordagens foi elaborado como complemento à matriz.

Como decisão final da Fase 2 está a definição do mecanismo de administração, ou seja, o estabelecimento do procedimento operacional para o diagnóstico no nível de maturidade. Com foco no processo, buscando a criação de consciência, optou-se por colher respostas individuais, discutindo com os respondentes as motivações para suas pontuações e identificando pontos de melhoria. Nesse sentido, reconhece-se que o principal valor da matriz está em capturar a visão da própria organização a respeito do seu *status* atual em relação à integração da EC no PDP e utilizar as respostas dos participantes como fator motivacional para atingir maiores níveis de maturidade, fomentando a melhoria contínua.

3.3 Fase 3 - Avaliação

A Fase 3 do roteiro para a elaboração de matriz de maturidade ilustrado na Figura 11 visa cumprir os objetivos específicos III e IV desta pesquisa (capítulo de Introdução). Trata-se de uma fase importante para obter *feedback* em relação ao cumprimento de requisitos e usabilidade da matriz quando aplicada na prática. Um conceito que pode auxiliar no entendimento da relevância desta etapa é o de Verificação e Validação (V&V), o qual tem sido debatido há bastante tempo no campo da engenharia computacional. Segundo Babuska e Oden (2004), a verificação diz respeito à qualidade do tratamento numérico de um modelo adotado para a realização de previsões, enquanto a validação corresponde à qualidade do modelo em si. Ainda de acordo com estes autores, o amplo interesse neste binômio levou ao surgimento de definições que se diferenciam segundo a área de interesse (BABUSKA; ODEN, 2004).

No âmbito do *design* de produtos, Maropoulos e Ceglarek (2010) estabelecem que a Verificação e Validação (V&V) é uma etapa do processo de desenvolvimento de novos produtos em que se avalia o cumprimento de especificações técnicas e funções requeridas, ou seja, busca-se a confirmação de que o produto, serviço ou sistema desenvolvido atende ao propósito prescrito. Trata-se de uma atividade relevante, dada a sua influência no desempenho da produção, na funcionalidade do produto e, consequentemente, na percepção do consumidor (MAROPOULOS; CEGLAREK, 2010). Nesse sentido, englobando atividades de teste, simulação e redesenho, o esforço do V&V está em aumentar a confiabilidade do novo produto ainda nos estágios iniciais de seu desenvolvimento (MOBIN et al., 2019).

Dessa forma, buscou-se incorporar estes conceitos nesta fase do desenvolvimento da matriz de maturidade, que pode ser entendida como o produto final deste estudo. Primeiramente, visando colocar em prática a Verificação, a matriz inicialmente proposta foi

avaliada por especialistas da academia nos temas, com o objetivo de colher sugestões de melhoria. A heterogeneidade foi adotada como critério norteador para a escolha dos especialistas, ou seja, optou-se por entrar em contato com pesquisadores cuja área de atuação primária ou secundária fosse engenharia de produto; pesquisadores já experientes e pesquisadores em formação, e pesquisadores atuando no Brasil e no exterior.

Para isso, foi obtida a participação de seis especialistas. Quatro deles são doutores e dois são doutorandos. Os doutores possuem reconhecida experiência, são professores em reconhecidas instituições de ensino superior e contam com diversas publicações e citações na área de estudo. Destaca-se que os doutorandos são também mestres e realizam pesquisa fora do Brasil, em Portugal e no Japão, na área de desenvolvimento de produtos e economia circular. O Quadro 11 apresenta as informações de cada especialista, com referência à titulação, posição atual e áreas de interesse e experiência.

Quadro 11 – Informações gerais dos especialistas

	Posição atual	Áreas de interesse e experiência
Especialista 1 Doutor	Professor adjunto do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade de Brasília	Engenharia Eletrônica, Processos de Fabricação, Gerência da Produção e em Desenvolvimento de Produto
Especialista 2 Doutora	Professora titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná	Melhoria de desempenho de processo de desenvolvimento de produto industrial (projeto e fabricação).
Especialista 3 Doutor	Professor Assistente Doutor na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho	Engenharia do Ciclo de Vida de produtos tecnológicos, com foco principal em: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Produção Mais Limpa (P+L); Ecodesign; e Estratégias de fim de vida do produto.
Especialista 4 Doutor	Atua na área de <i>customer service</i> em multinacional do setor alimentício e é professor de graduação na Faculdade de Agudos	Profissional com mais de 15 anos de experiência no meio corporativo, realiza pesquisa em tecnologias da indústria 4.0, desenvolvimento de produtos circulares e desempenho das empresas
Especialista 5 Doutorando	Gerente de projetos no Japão, em multinacional do setor de aviação e aeroespacial	Profissional com mais de 20 anos de experiência em indústria brasileira de aviação, realiza pesquisa em economia circular na Universidade Estadual Paulista
Especialista 6 Doutoranda	Engenheira de testes de campo e operações em centro de pesquisa em Portugal, realiza pesquisa em ecossistemas circulares na Universidade da Beira Interior	Economia Circular aplicada ao Desenvolvimento de Produtos, com ênfase na indústria aeroespacial

Fonte: Elaborado pela autora.

Os especialistas foram contatados por *e-mail*, o qual continha informações a respeito da experiência da pesquisadora, da motivação para o desenvolvimento da pesquisa e da proposta de avaliação. A carta convite enviada, que se encontra no Apêndice A, solicitava a análise dos pontos fortes e oportunidades de melhoria da matriz, englobando seu conteúdo, apresentação visual e aplicabilidade (potencial contribuição para a academia e para as organizações).

Na sequência, para cumprir o objetivo específico IV, sob a perspectiva conceitual da Validação, foram selecionadas quatro empresas envolvidas em atividades frequentes de desenvolvimento de novos produtos e que ao mesmo tempo demonstrassem preocupações ambientais, para análise da eficácia da matriz elaborada. Visando a aplicação da matriz em diferentes contextos, optou-se por contatar empresas de diferentes portes, que utilizassem diferentes tecnologias e atendessem diferentes mercados. O contato com os profissionais foi feito primeiramente por meio do envio de uma mensagem no *LinkedIn*, a maior rede profissional do mundo, com mais de 750 milhões de usuários em mais de 200 países (LINKEDIN CORPORATION, 2021). A mensagem enviada consta no Apêndice B deste trabalho. Novamente, adotou-se como critério norteador para a escolha das empresas a heterogeneidade, com base nos aspectos relacionados a setor industrial, porte, estratégia comercial e certificações.

- *Caracterização das empresas*

O Quadro 12 apresenta as características principais relativas às quatro empresas analisadas. Em relação à quantidade de entrevistados, na Empresa A e na Empresa B, um profissional disponibilizou-se a representar o time liderado por eles. Na empresa C, dois profissionais de diferentes funções e departamentos foram entrevistados. Já na empresa D, foram também entrevistados dois profissionais, envolvidos em atividades diferentes.

Quadro 12 – Caracterização das empresas

	Setor industrial	Número de funcionários	Estratégia comercial	Certificações
Empresa A	Alimentício	600	B2C	ISO 9001 e ISO 14001
Empresa B	Químico e petroquímico	8000	B2B	ISO 9001 e ISO 14001
Empresa C	Automotivo/metalmecânico	3000	B2B	ISO 9001
Empresa D	Moda (vestuário, calçadista e acessórios)	16	B2C	Não apresenta

Fonte: elaborado pela autora.

- *Empresa A*

A empresa A é uma unidade de negócio de uma multinacional do setor alimentício, atuante no ramo de café. Com sede e centros de produção na Suíça, atua há quinze anos no Brasil, onde conta com aproximadamente 600 funcionários e possui um centro de reciclagem na região metropolitana de São Paulo (SP). A empresa atende ao mercado interno e externo, operando em mais de oitenta países, sendo o continente europeu seu maior mercado. Seu portfólio de produtos é composto por cápsulas de café e máquinas de café. Além disso, a empresa possui certificações ISO 14001 e ISO 9001.

- *Empresa B*

Fundada em 2002, a empresa B atua no setor químico e petroquímico, com foco na produção de resinas e plásticos. Assim, trata-se de uma fornecedora de matéria-prima para outras indústrias, chamadas transformadoras, que, por sua vez, são fornecedoras de indústrias de bens de consumo que utilizam plástico nas embalagens. Com cerca de oito mil funcionários, a empresa possui 40 unidades industriais; a maioria delas no Brasil e o restante nos Estados Unidos, Alemanha e México. Sua sede administrativa está localizada em São Paulo e duas das três unidades do seu Centro de Inovação e Tecnologia também estão em território brasileiro. Atualmente, a empresa possui clientes em todos os continentes, em mais de setenta países. Além disso, a empresa possui diversas certificações, incluindo a ISO 9001 e a ISO 14001.

- *Empresa C*

A empresa C atua há 75 anos no setor automotivo. Trata-se de uma encarroçadora de ônibus que possui um amplo portfólio, incluindo ônibus urbanos, articulados, rodoviários, escolares, micros e minis. Seu polo industrial está localizado no interior do estado de São Paulo, onde conta com 3000 colaboradores em empregos diretos na fábrica, e seu escritório central está localizado na cidade de São Paulo. A empresa faz parte de um conglomerado formado por outras seis empresas, abrangendo centros de tratamento do alumínio, fábrica de vidros, entre outras, em um modelo de integração vertical. Atualmente, atende todo o Brasil, com foco na região sudeste, e o mercado internacional, estando presente em mais de 50 países. Desde 1996, a empresa possui a certificação ISO 9001.

- *Empresa D*

A empresa D é uma *startup* que iniciou suas operações em 2016, no interior do estado do Rio Grande do Sul, na região metropolitana de Porto Alegre (RS). A empresa possui 16 funcionários e não adota a estrutura organizacional composta por cargos, ou seja, todos os funcionários pertencem ao mesmo nível hierárquico. A comercialização de seus produtos ocorre através do modelo *e-commerce*, enviando seus produtos para todo o Brasil por meio do sistema de correios. Seu portfólio de produtos, produzidos sob demanda, inclui carteiras coladas, carteiras costuradas, cachepôs, tênis, camisetas com bolso trocável, quadros, luminárias, bolsas, porta moedas e porta passaporte, fabricados utilizando fibra de polietileno de alta densidade, que tem em sua composição 30% de material reciclado e é 100% reciclável. Por meio da combinação de diferentes estampas, a empresa conta com 26 mil variáveis de produtos, sendo as carteiras seu principal atrativo. Além do mercado interno, a empresa D também possui parcerias no Canadá e na Austrália. A empresa D não possui certificações internacionais, entretanto, possui o selo “eureciclo”, referente à logística reversa de embalagens pós consumo.

- *Perfil dos entrevistados*

Os entrevistados foram selecionados conforme a definição da audiência estabelecida na Fase 1 para a construção da matriz, representando um amplo conjunto de perspectivas e diferentes experiências. Em relação à quantidade de entrevistados, na Empresa A e na Empresa B, um profissional disponibilizou-se a representar o time liderado por eles. Na empresa C, dois profissionais de diferentes funções e departamentos foram entrevistados. Já na empresa D, foram também entrevistados dois profissionais, envolvidos em atividades diferentes, como é possível observar no Quadro 13.

Quadro 13 – Perfil dos entrevistados

Empresas	Perfil dos entrevistados
Empresa A	A entrevistada é formada em Engenharia de Alimentos e mestre em Administração. Foi coordenadora de sustentabilidade e atualmente é gerente de sustentabilidade na empresa A. Anteriormente, foi consultora em sustentabilidade durante sete anos.
Empresa B	O entrevistado é formado em Desenho Industrial e possui pós-graduação em Marketing. Com mais de quinze anos de experiência em desenvolvimento de produto, lidera a plataforma de embalagens na empresa B, com foco em EC.
Empresa C	O primeiro entrevistado é mestre e doutor em Engenharia de Produção e ocupa o cargo de analista de vendas na empresa C. Foi durante doze anos analista de estrutura do produto na mesma empresa. O segundo entrevistado é coordenador de qualidade na empresa C.
Empresa D	O primeiro entrevistado é formado em Administração e é cofundador da empresa D. A segunda pessoa entrevistada é formada em Moda. Atua na empresa D há 3 anos e é responsável pela gestão da rede de costureiras, pela criação, desenvolvimento e aprimoramento de produtos e pela modelagem e prototipação de acessórios.

Fonte: elaborado pela autora.

Seguindo os protocolos de segurança recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para combate à pandemia de COVID-19, optou-se por adotar para as entrevistas as ferramentas de comunicação *online*, por meio de videoconferência, sem prejuízo dos resultados. Assim, as entrevistas foram conduzidas em três momentos. Primeiramente, foi realizada uma breve introdução ao tema da pesquisa, seu objetivo e justificativa. O propósito desta primeira etapa consistiu em uma contextualização, para que os entrevistados pudessem compreender o *status* em que a pesquisa se encontrava e sua real finalidade. Em seguida, com o objetivo de levantar as características-chave da empresa, aplicou-se o questionário que consta no Apêndice C deste trabalho, verificando informações referentes ao setor, porte, tempo de atuação, estratégia comercial e também à adoção de práticas e projetos de sustentabilidade ambiental e/ou de economia circular, quais os principais estímulos para caminhar nessa direção e principais dificuldades enfrentadas.

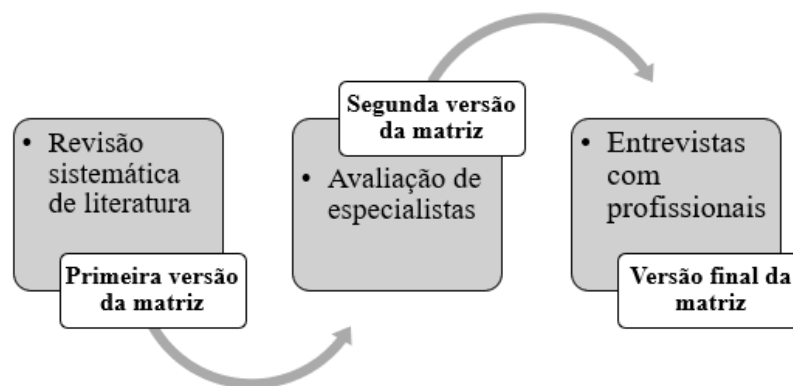
Na sequência, foi feita uma apresentação geral da matriz de maturidade desenvolvida, explicando detalhadamente suas dimensões, seus níveis e o método de aplicação proposto. Dessa forma, os entrevistados foram convidados a apresentar suas impressões, diagnosticando o nível de maturidade da empresa em cada uma das onze dimensões. Solicitou-se que as respostas fossem justificadas, adicionando comentários a cada dimensão analisada. Além disso, buscou-se enfatizar a total abertura à sugestão de alterações textuais, sem prejuízo do conteúdo, para facilitar o entendimento. A duração média das entrevistas foi de 80 minutos. Mediante o

consentimento dos entrevistados, as entrevistas foram gravadas para posterior análise, garantindo credibilidade à apresentação dos resultados.

Assim, o foco esteve em avaliar a robustez da matriz em um contexto real e seu potencial como facilitadora da verificação da aplicação do desenvolvimento de produtos circulares na organização. Como *output* dessa etapa, obteve-se a versão final da matriz, integrando as melhorias sugeridas pelos pesquisadores e pelos profissionais, além da identificação do nível de maturidade da empresa no que se refere ao desenvolvimento circular de produtos. Ademais, destaca-se que este procedimento de pesquisa já foi adotado com êxito em outros trabalhos em *ecodesign* (PINHEIRO et al., 2018) e também em EC (SINCLAIR et al., 2018; DIAS, 2019).

Em resumo, foram elaboradas três versões da matriz. Como mostra a Figura 21, a primeira versão resulta da revisão sistemática e de conteúdo de literatura. Em seguida, após a incorporação das melhorias sugeridas pelos especialistas, obteve-se a segunda versão. Por fim, após a realização das entrevistas com os profissionais, obteve-se a versão final.

Figura 21 – Fluxo metodológico para aprimoramento da matriz



Fonte: Elaborada pela autora.

Devido aos objetivos e escopo dessa pesquisa e mesmo considerando o limite de tempo para a conclusão deste mestrado, a Fase 4 da proposta de Maier, Moultrie e Clarkson (2012), a qual propõe a realização de *benchmarkings*, não foi realizada. Destaca-se também que a matriz relaciona níveis de maturidade, e não de capacidade, dada a interface do PDP com diversas áreas organizacionais, que envolvem diferentes processos. Assim, intenciona-se avaliar a maturidade organizacional em desenvolver produtos circulares, mediante o cumprimento dos requisitos mínimos de cada nível de maturidade.

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na realização desta pesquisa. O capítulo foi organizado em quatro partes. Inicialmente, são expostos os resultados da revisão sistemática realizada, identificando as tendências de pesquisa e as principais práticas e métodos do DPC investigados pela literatura. A segunda parte destina-se à proposição da versão inicial da matriz da maturidade. Na terceira parte, são apresentadas as sugestões de melhoria advindas da avaliação pelos especialistas no tema e profissionais das empresas selecionadas, culminando com a versão final da matriz. Por fim, encerra-se esta seção com a apresentação dos resultados obtidos na aplicação da matriz nas quatro empresas e o nível de maturidade atingido por cada uma.

4.1 Resultados da revisão sistemática de literatura

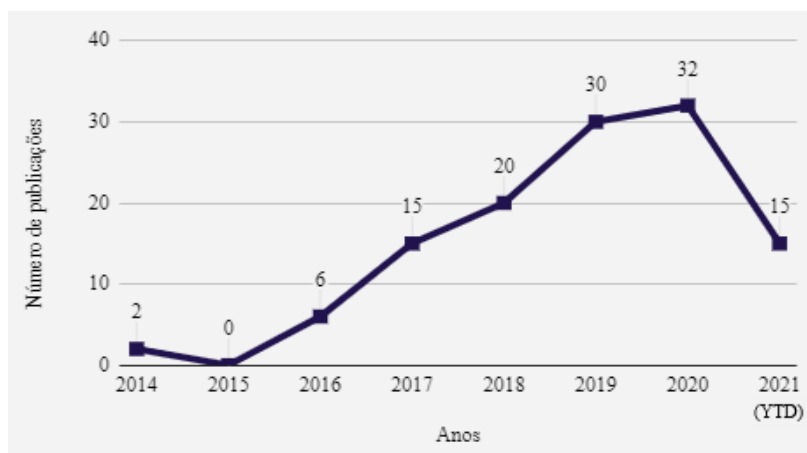
A seguir são apresentados os resultados da revisão sistemática de literatura a partir de três tópicos. Primeiramente, os resultados bibliométricos fornecem um panorama geral do estado da arte, mostrando o interesse da academia no tema e englobando a evolução temporal das publicações, os principais periódicos identificados na amostra, as abordagens metodológicas e as origens das publicações de acordo com a afiliação do primeiro autor. Em um segundo momento, a análise de redes de coocorrência de palavras-chave ilustra as tendências de publicação e de que maneira os diferentes subtemas se interrelacionam. Por fim, encerra-se esta primeira subseção do capítulo 4 com os resultados do levantamento de práticas, métodos e ferramentas propostas pela EC e que sejam aplicadas no PDP, as quais irão compor a matriz de maturidade.

4.1.1 *Panorama de pesquisa*

A Figura 22 mostra a evolução temporal dos artigos da amostra analisada, relacionando o número de publicações no tema para cada ano. Percebe-se o DPC é um tema recente, com as primeiras publicações em 2014, e com clara tendência de crescimento. Enquanto em 2016 somente seis artigos foram encontrados, apenas quatro anos depois, em 2020, essa quantidade aumentou significativamente, com 32 artigos encontrados. É notório também que, em apenas dois anos (de 2017 a 2019), o número de publicações dobrou. Ademais, vale ressaltar que a

quantidade de artigos em 2021 é menos expressiva que a dos anos anteriores pois as buscas foram atualizadas até o mês de maio de 2021.

Figura 22 – Evolução temporal das publicações



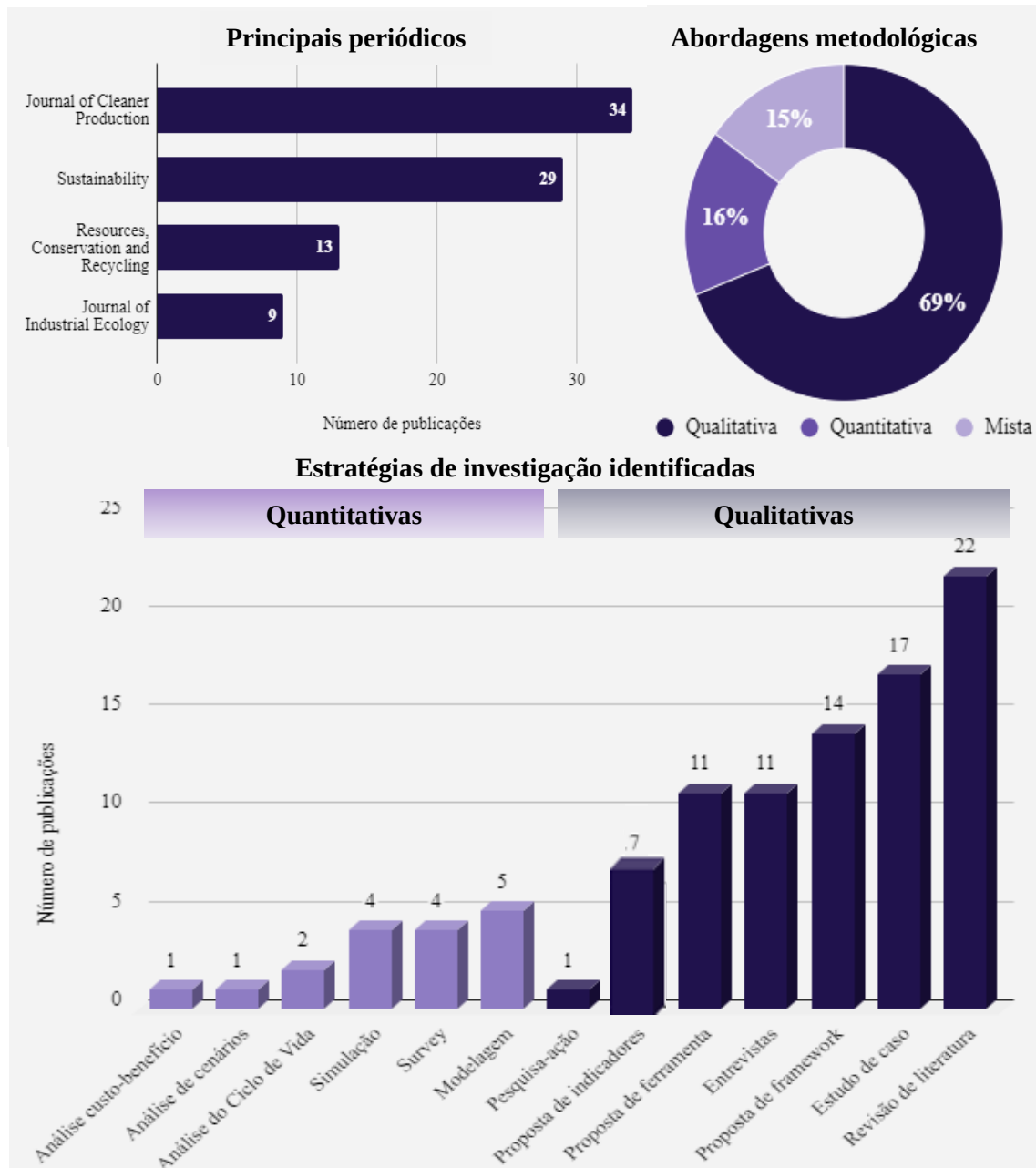
Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 23 fornece uma visão holística das informações bibliométricas, agrupando as informações referentes aos principais periódicos em que os artigos da amostra foram publicados, as abordagens metodológicas e as estratégias de investigação identificadas.

Em relação aos periódicos em que os artigos analisados foram veiculados, 31 foram identificados, dentre os quais quatro se destacaram com as maiores contribuições, conforme ilustra a Figura 23. É possível observar que apenas dois periódicos, o *Journal of Cleaner Production* e o *Sustainability (Switzerland)*, publicaram mais da metade dos artigos que compõem a amostra analisada.

Já quanto às abordagens metodológicas, a grande maioria dos artigos (69%) adotou a abordagem qualitativa, operacionalizada por meio de estratégias como revisão de literatura, estudo de caso, entrevistas, propostas de *framework*, entre outros. Dos 120 artigos analisados, apenas 16% utilizaram a abordagem quantitativa por meio da aplicação de *surveys*, simulação, modelos de otimização e outras estratégias. Somente uma pequena parcela da amostra analisada, correspondente a 15% do total, utilizou a abordagem mista, combinando dois ou mais métodos das abordagens quantitativa e qualitativa.

Figura 23 – Visão holística das informações bibliométricas

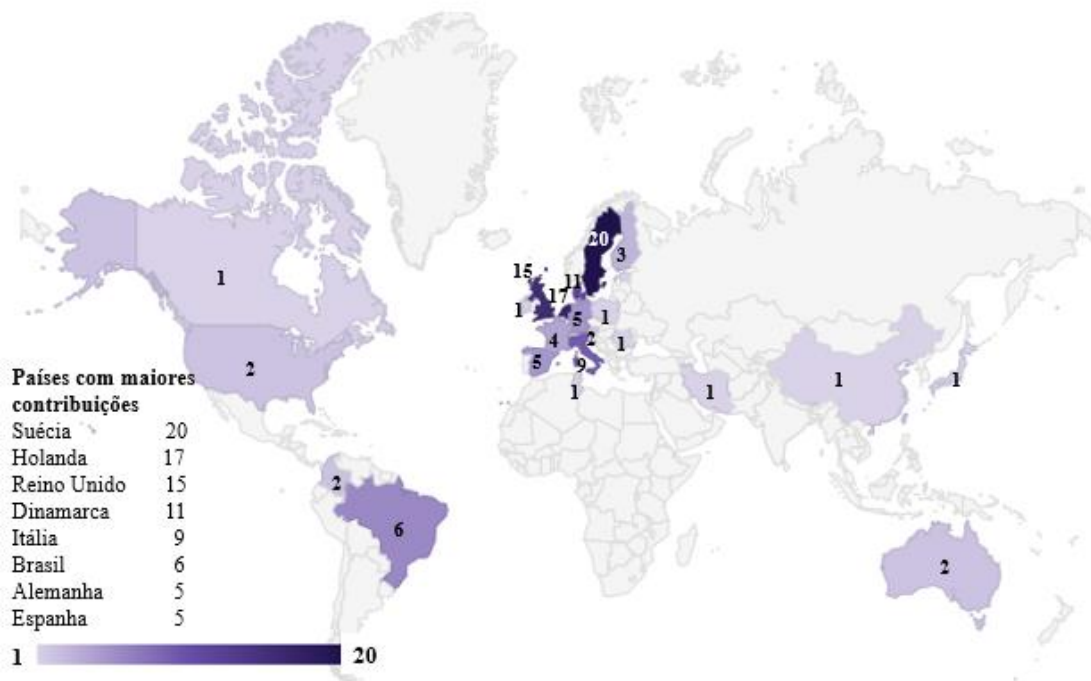


Fonte: Elaborada pela autora.

Nota-se pela análise da Figura 23 que apesar do aparente consenso da necessidade das empresas em incorporar o *design* circular, estudos quantitativos que buscam avaliar os efeitos mais abrangentes ou isolados de estratégias para a circularidade ainda não estão expressivamente disponíveis. A maior parte das pesquisas nessa área é, até então, qualitativa, o que se justifica pelo fato de que a EC ainda é um fenômeno novo, em crescente investigação (FRANCO, 2019).

A origem das publicações foi identificada por meio da análise da afiliação do primeiro autor dos artigos, indicando o número de documentos por país. A Figura 24 apresenta a localização geográfica das publicações identificadas, sendo que a variação na cor, do roxo para o lilás, e o número em destaque revelam o nível de contribuição de cada país.

Figura 24 – Distribuição geográfica das publicações selecionadas



Fonte: Elaborada pela autora.

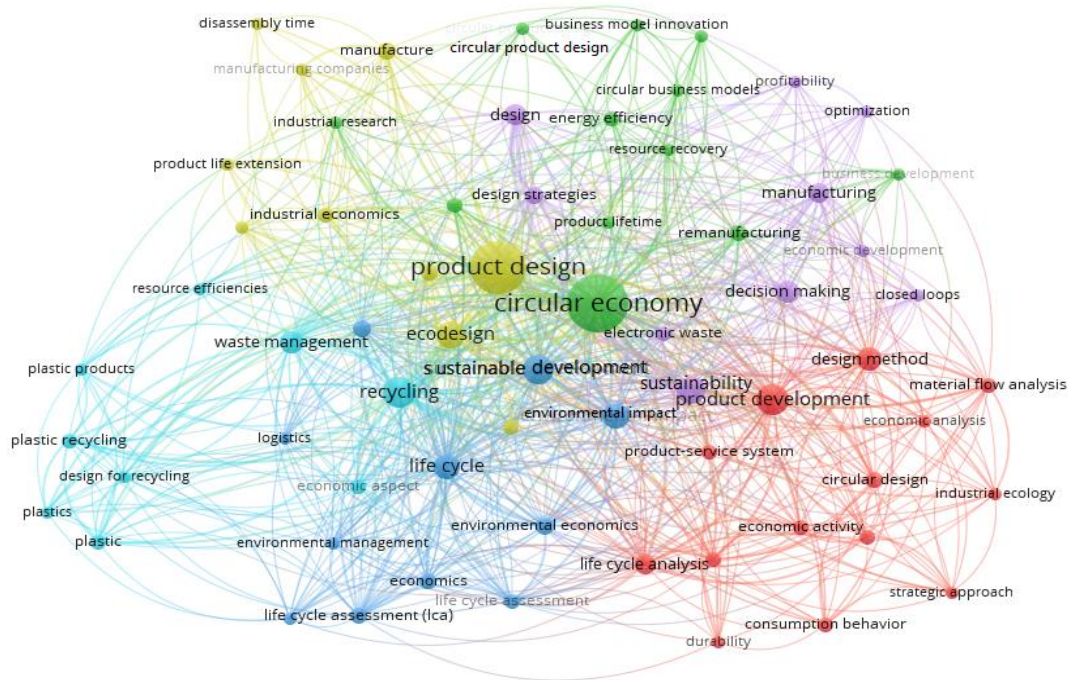
O mapa mostra a maior concentração de publicações na Europa, especialmente na Suécia, na Holanda, no Reino Unido e na Dinamarca. Há também uma quantidade significativa de trabalhos oriundos da América do Sul, sendo que o Brasil apresenta seis artigos sobre o tema e a Colômbia conta com dois artigos. Ademais, além da Europa e das Américas, outros continentes, como Ásia e Oceania começaram a investigar o assunto, confirmando que se trata de um tema de interesse global.

4.1.2 Análise de redes de coocorrência de palavras-chave

Com o objetivo de ilustrar as tendências de pesquisa, a amostra final de artigos foi submetida à análise de redes de coocorrência de palavras-chave utilizando o *software* VOSViewer. De acordo com Van Eck e Waltman (2017), nesta rede é possível observar o agrupamento das palavras-chave mais fortemente relacionadas nos chamados *clusters*. Cada

cluster é representado por uma cor diferente, e as palavras-chave são representadas por círculos, cujos tamanhos indicam a frequência com que aparecem na amostra (VAN ECK; WALTMAN, 2017). A Figura 25 ilustra a rede gerada pelo número de coocorrências de três palavras-chave, ou seja, o número de publicações em que três termos aparecem juntos. Do total de 785 palavras-chave da amostra, 66 seguem essa condição de número mínimo de ocorrências.

Figura 25 – Rede de palavras-chave com três coocorrências



Fonte: Elaborada pela autora.

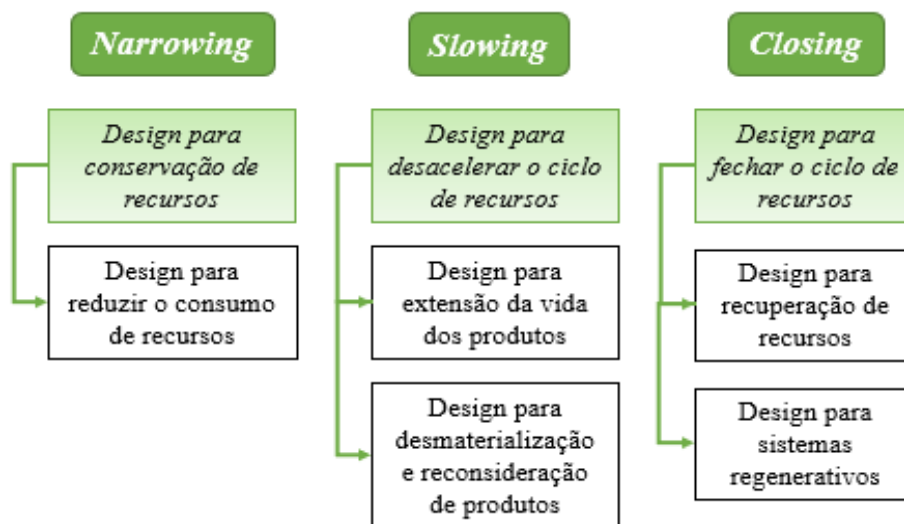
É possível identificar na Figura 25 que foram gerados cinco agrupamentos (*clusters*): verde, vermelho, azul, amarelo e roxo. Os termos mais comuns são “*product design*”, “*circular economy*”, “*product development*”, “*sustainability*”, “*sustainable development*” e “*recycling*”. O *cluster* verde está diretamente relacionado a modelos de negócio circulares, englobando abordagens como a eficiência energética, recuperação de recursos e remanufatura. Já o *cluster* azul revela que muitas pesquisas têm investigado o papel da reciclagem e do *design* para a reciclagem, com alternativas para a gestão de resíduos e eficiência de recursos.

Os *clusters* amarelo e vermelho mostram palavras-chave advindas de estudos que tratam do projeto e desenvolvimento de produto. Estão presentes termos como extensão da vida do produto, sistema produto-serviço e ecologia industrial, além de ferramentas como análise do ciclo de vida e análise do fluxo de material. No *cluster* roxo é possível identificar claramente a relação entre a estratégia organizacional, ilustrada pelos termos tomada de decisão, otimização

4.1.3 Estratégias e abordagens identificadas pela revisão sistemática

O Quadro 14 ilustra as principais abordagens compreendidas pelo Desenvolvimento de Produtos Circulares, identificadas após a leitura e análise qualitativa da amostra final de artigos da revisão sistemática de literatura. Foram identificadas 30 abordagens de *design*. Para fins de sistematização, essas abordagens foram agrupadas em três diferentes estratégias circulares, seguindo a proposta de Bocken et al. (2016): *Design* para a conservação de recursos (*narrowing*), *Design* para desacelerar o ciclo de recursos (*slowing*) e *Design* para fechar o ciclo de recursos (*closing*), conforme ilustra a Figura 27.

Figura 27 – Sistematização das estratégias de DPC



Fonte: Elaborada pela autora.

Dessa forma, a estratégia de *Design* para a conservação de recursos (*narrowing*) engloba a categoria de *Design* para reduzir o consumo de recursos. Na estratégia de *Design* para desacelerar o ciclo de recursos (*slowing*), foram agrupadas as categorias de *Design* para a extensão da vida do produto e *Design* para desmaterialização e reconsideração de produtos. Por fim, a estratégia de *Design* para fechar o ciclo de recursos (*closing*) engloba as abordagens de *Design* para a recuperação de recursos e *Design* para sistemas regenerativos.

Destaca-se que estas abordagens serão posteriormente utilizadas para a elaboração da matriz de maturidade proposta. A sistematização apresentada no Quadro 14 teve como base a taxonomia desenvolvida por Moreno et al. (2016), a categorização proposta por Potting et al. (2017), bem como as ações sobre a obsolescência e conceito de integridade de den Hollander, Bakker e Hultink (2017).

Quadro 14 – Principais abordagens do DPC (continua)

Abordagem	Design for X	Referências
Design para a conservação de recursos - NARROWING		
Design para reduzir o consumo de recursos	Design para o controle da qualidade de produção	Moreno et al. (2016), De los Rios e Charnley (2017), Mestre e Cooper (2017).
	Design para a redução do peso	Moreno et al. (2016), Stewart e Niero (2018).
	Design para diagnóstico de falha	Arcos et al. (2020); Kimita et al. (2020).
	Design para eficiência energética	Mestre e Cooper (2017), Mendoza et al. (2017), Sassanelli et al. (2020).
	Design para a modularidade	Mendoza et al. (2017), Talens Peiró et al. (2017), Halstenberg et al. (2019), Chen (2020), Sassanelli et al. (2020).
	Design a padronização e compatibilidade	Bocken et al. (2016), Mendoza et al. (2017), Mesa et al. (2018), Sassanelli et al. (2020).
	Design para a redução	Moreno et al. (2016), Mestre e Cooper (2017), Stewart e Niero (2018), Subramanian et al. (2019), Koszewska e Bielecki (2020).
Design para desacelerar os ciclos de recursos - SLOWING		
Design para extensão da vida do produto	Design para o reuso	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), Franco (2019), Holtström et al. (2019), Urbinati et al. (2019), Koszewska e Bielecki (2020), Parajuly et al. (2020), Shahbazi e Jönbrink (2020); Joustra et al. (2021).
	Design para a fácil manutenção e reparo	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), Halstenberg et al. (2019), Holtström et al. (2019), Jabbour et al. (2019), Arcos et al. (2020), Parajuly et al. (2020), Sassanelli et al. (2020), Shahbazi e Jönbrink (2020).
	Design para a durabilidade	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), Sousa-Zomer et al. (2018), Sumter et al. (2018), Selvefors et al. (2019), Singh et al. (2019), Ingemarsdotter et al. (2020), Mesa et al. (2020), Sassanelli et al. (2020), Stamminger et al. (2020), Stegmann et al. (2020), Cordella et al. (2021).
	Design para a confiabilidade	Bocken et al. (2016), De los Rios e Charnley (2017), Mesa et al. (2018); Sousa-Zomer et al. (2018), Sassanelli et al. (2020).
	Design para a atualização	Bocken et al. (2016), Moreno et al. (2016), De los Rios e Charnley (2017), den Hollander et al. (2017), Mestre e Cooper (2017), Haines-Gadd et al. (2018), Mesa et al. (2018), Shahbazi e Jönbrink (2020).

Quadro 14 – Principais abordagens do DPC (continua)

Abordagem	<i>Design for X</i>	Referências
<i>Design para desacelerar os ciclos de recursos - SLOWING</i>		
	<i>Design para o apego ao produto e confiança</i>	Bocken et al. (2016), Mesa et al. (2018).
	<i>Design para a durabilidade emocional</i>	Moreno et al. (2016), den Hollander et al. (2017), Haines-Gadd et al. (2018).
	<i>Design para múltiplos ciclos de uso</i>	Sinclair et al., (2018), Selvefors et al. (2019), Sassanelli et al. (2020), Sumter et al. (2020).
	<i>Design para a remanufatura</i>	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), Charnley et al. (2019), Haziri e Sundin (2019), Jabbour et al. (2019), Niu et al. (2019), Urbinati et al. (2019), Haziri and Sundin (2020), Sassanelli et al. (2020), Shahbazi e Jönbrink (2020).
	<i>Design para o Comportamento Circular</i>	Wastling et al. (2018)
<i>Design para desmaterialização e recontextualização de produtos</i>	<i>Design para sistemas produto-serviço (PSS)</i>	Moreno et al. (2016), Mendoza et al. (2017), Ackermann (2018), Bressanelli et al. (2018); Sinclair et al. (2018), Bech et al. (2019), Franco (2019), Halstenberg et al. (2019), Holtström et al. (2019), 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).
	<i>Design para a troca</i>	Selvefors et al. (2019).
	<i>Design para a adaptabilidade</i>	Sassanelli et al. (2020).
	<i>Design para a recontextualização</i>	den Hollander et al. (2017).
<i>Design para o fechamento de ciclos - CLOSING</i>		
<i>Design para recuperação de recursos</i>	<i>Design para a reciclagem</i>	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), Hildebrandt et al. (2017), Mestre e Cooper (2017), Mendoza et al. (2017), Bovea e Pérez-Belis (2018), Bovea et al. (2018a), Hannula et al. (2018), Milios et al. (2018), Ragaert et al. (2018), Stewart e Niero (2018), Subramanian et al. (2018), Eriksen e Astrup (2019), Ford e Fischer (2019), Franco (2019), Holtström et al. (2019), Leissner e Ryan-Fogarty (2019), Jabbour et al. (2019), Subramanian 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), Thompson et al. (2020).
	<i>Design para a desmontagem</i>	Bocken et al. (2016), Moreno et al. (2016), Almeida et al. (2017), De los Rios e Charnley (2017), Mendoza et al. (2017), Talens Peiró et al. (2017), Bovea e Pérez-Belis (2018), Mandolini et al. (2018), Mesa et al. (2018), Vanegas et al. (2018), Belhadj et al. (2019), Franco (2019), Halstenberg et al. (2019), Sousa Jabbour et al. (2019), Urbinati et al. (2019), Koszewska e Bielecki (2020), Sassanelli et al. (2020).
	<i>Design com materiais reciclados</i>	Leal et al. (2020); Veelaert et al. (2020)

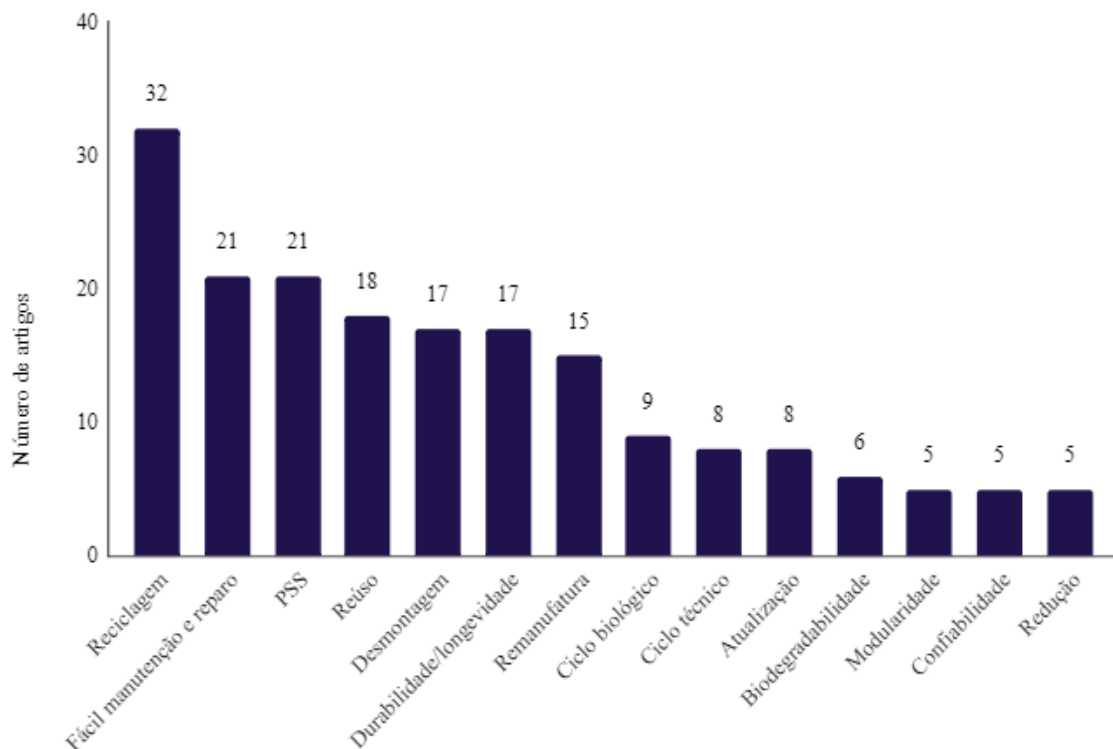
Quadro 14 – Principais abordagens do DPC

Abordagem	<i>Design for X</i>	Referências
<i>Design para o fechamento de ciclos - CLOSING</i>		
<i>Design para sistemas regenerativos</i>	<i>Design para a biomimética</i>	Moreno et al. (2016), Mendoza et al. (2017), Sauerwein et al. (2019).
	<i>Design para o ciclo biológico</i>	Bocken et al. (2016), Moreno et al. (2016), Franco (2017), Mestre e Cooper (2017), Mendonza et al. (2017), Mesa et al. (2018), Stewart e Niero (2018), Julianelli et al. (2020), Stegmann et al. (2020).
	<i>Design para o ciclo técnico</i>	Bocken et al. (2016), Moreno et al. (2016), Franco (2017), Mestre e Cooper (2017), Mendonza et al. (2017), Mesa et al. (2018), Stewart e Niero (2018), Julianelli et al. (2020).
	<i>Design para a biodegradabilidade</i>	Bocken et al. (2016), Moreno et al. (2016), Singh e Ordoñez (2016), Mendoza et al. (2017), Mesa et al. (2018).

Fonte: Elaborado pela autora.

Para destacar as abordagens mais relevantes, a Figura 28 ilustra a frequência de ocorrência apenas daquelas citadas por pelo menos cinco artigos. Nota-se que a maior parte das abordagens destacadas fazem parte da estratégia de *design* para desacelerar o ciclo de recursos (*slowing*).

Figura 28 – Abordagens do DPC mais enfatizadas pela literatura

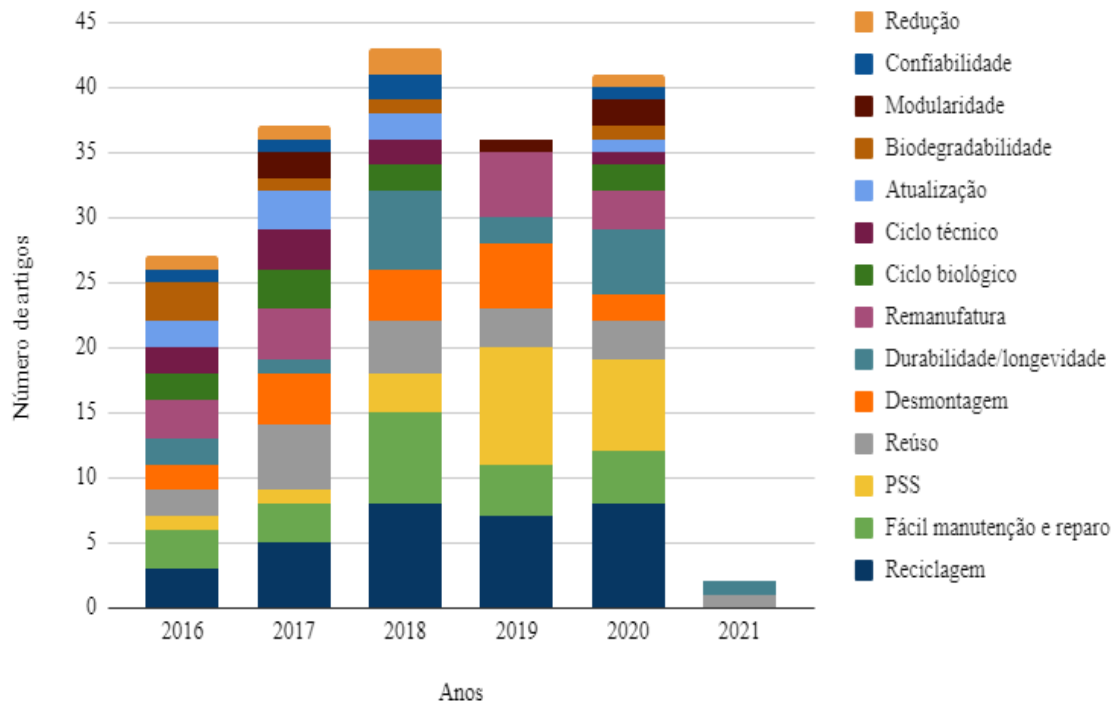


Fonte: Elaborada pela autora.

Apesar de essas abordagens serem as mais frequentemente analisadas, o Quadro 14 revela também que algumas outras abordagens têm tido um interesse crescente. Nesse sentido, destacam-se o *design* para a atualização, *design* para a durabilidade emocional, *design* para múltiplos ciclos de uso, *design* para a confiabilidade, *design* para a modularidade e *design* para os ciclos técnico e biológico.

Considerando os últimos cinco anos, a Figura 29 mostra a evolução das abordagens de DPC analisadas pela literatura. O *design* para a reciclagem aparece como a estratégia com maior número de estudos, majoritariamente em 2018, seguido pelo *design* para fácil manutenção e reparo. Destaca-se também que a estratégia do *design* para sistemas produto-serviço (PSS) vem ganhando notoriedade, com considerável aumento de interesse em 2019.

Figura 29 – Abordagens do DPC por ano



Fonte: Elaborada pela autora.

No que diz respeito às ferramentas utilizadas para a adoção do DPC, tem havido uma ênfase na avaliação do ciclo de vida – ACV (NIERO; OLSEN, 2016; STEWART; NIERO, 2018; BECH et al., 2019; KADDOURA et al., 2019). Além disso, a análise do custo do ciclo de vida (KADDOURA et al., 2019; RICHTER; TÄHKÄMÖ; DALHAMMAR, 2019) e a análise do fluxo de material (HALSTENBERG; LINDOW; STARK, 2019) também foram citadas em alguns estudos.

4.1.4 Indicadores para o Desenvolvimento de Produtos Circulares

Conforme ilustrado na Figura 23, foi possível identificar pela revisão sistemática de literatura sete artigos com propostas de indicadores relacionados ao desenvolvimento de produtos embasado nos princípios da EC. Após leitura completa desses sete artigos, o Quadro 15 foi elaborado, sintetizando as principais contribuições de cada trabalho.

Quadro 15 – Breve descrição dos trabalhos que abordam indicadores do DPC

Artigos	Breve descrição
<i>Cayzer, Griffiths, Beghetto (2017)</i>	<i>Prototype of CE indicators (CEIP)</i> Ferramenta para avaliar o desempenho do produto no contexto da EC. Consiste em um conjunto de questões divididas em cinco estágios do ciclo de vida.
<i>Hildebrandt, Bezama, Thrän (2017)</i>	Análise de tendências no <i>design</i> para a reciclagem de polímeros de base biológica, com recomendações de uso dos indicadores de avaliação do ciclo de vida para melhorar o diálogo entre <i>designers</i> e recicladores, incluindo: demanda de energia para as fases de reciclagem, recuperação de energia, recuperação de substâncias perigosas e fator de substituição de materiais virgens
<i>Mesa, Esparragoza, Maury (2018)</i>	Proposta de seis indicadores para medir a circularidade de famílias de produto em relação ao fluxo de material, reusabilidade, reconfiguração e desempenho funcional.
<i>Razza et al. (2020)</i>	Proposta e aplicação de abordagem metodológica para calcular a circularidade de produtos biodegradáveis e de base biológica.
<i>Mesa, González-Quiroga, Maury (2020)</i>	<i>Material durability indicator (MDI)</i> Proposta de indicador baseado na durabilidade e pegada ambiental para a seleção de materiais nas fases iniciais de projeto, com foco na extensão da vida do produto.
<i>Linder, Sarasini, van Loon (2017)</i>	<i>C - circularity indicator</i> Proposta de um indicador de circularidade baseado no valor econômico dos componentes reciclados de um produto dividido pelo valor econômico do produto como um todo.
<i>Leal et al. (2020)</i>	<i>Design for Recycling - R_p – índice de reciclabilidade do produto</i> A reciclabilidade de um produto é definida com base em três parâmetros: a compatibilidade química dos materiais, a variedade de materiais usados no produto e a reciclabilidade do material, englobando sua taxa de reciclagem e de pureza <i>Design from recycling</i> – Os autores definem três índices de avaliação da conveniência (técnica, econômica e ambiental) para o uso de materiais reciclados

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se pela análise do Quadro 15 que tem havido um esforço dos pesquisadores para que as propostas de indicadores possam abranger todo o ciclo de vida do produto, em vez de estarem direcionadas apenas às tratativas de fim de vida. Neste sentido, destacam-se os trabalhos de Linder, Sarasini e van Loon (2017), no qual os autores definem circularidade como a fração de um produto advinda de produtos usados; e o trabalho de Mesa, González-Quiroga, Maury (2020), com o estudo da durabilidade de materiais e sua influência na estratégia circular de extensão da vida do produto. Além disso, destacam-se as propostas de indicadores relacionados aos produtos biodegradáveis e de base biológica (RAZZA et al., 2020; HILDEBRANT et al., 2017) e relacionados à reciclagem e sua efetividade (LEAL et al., 2020).

4.2 Versão inicial da matriz de maturidade

A matriz de maturidade elaborada apresenta uma abordagem evolucionária para a integração da EC ao desenvolvimento de produtos, configurando-se como um mecanismo de avaliação do grau de entendimento e aplicação do DPC em uma organização.

A base conceitual para o seu desenvolvimento provém da leitura e interpretação da fundamentação teórica deste trabalho, composta pelos artigos selecionados na revisão sistemática e de conteúdo da literatura, por trabalhos que propuseram modelos e matrizes de maturidade em sustentabilidade ambiental, como, por exemplo, o de Pigosso (2012), além da consulta a modelos de maturidade consolidados na literatura empresarial, especialmente o CMMI.

Conforme mencionado na seção 2, de Revisão Teórica, o CMMI pode ser aplicado por meio de duas abordagens (ou representações). A representação contínua, em que são usados níveis de capacidade, permite à organização selecionar uma área específica para realizar melhorias individualmente. Já a representação por estágios faz uso de conjuntos de áreas de processo pré-definidas para estabelecer uma trajetória de melhorias, descrita por meio de níveis de maturidade. Dada a complexidade do processo de desenvolvimento de produtos e sua integração com diversas áreas funcionais, optou-se por utilizar a representação por estágios como inspiração para a proposição da matriz de maturidade em DPC. Em outras palavras, não foram considerados os níveis de capacidade para sua formulação, e sim os de maturidade.

Sabe-se que na abordagem por estágios, as matrizes se caracterizam pelo arranjo por meio de grade entre os níveis propostos, utilizando células para descrever as características do desempenho esperado para cada nível. Neste trabalho, seguindo as recomendações de Maier, Moultrie e Clarkson (2012), sua estrutura é composta por dois eixos: os níveis de maturidade propriamente ditos, que variam de 1 a 5, e as dimensões advindas da revisão de literatura. Dessa forma, a matriz inicialmente proposta é composta por cinco níveis (1 – Inerte, 2 – Consciente, 3 – Aplicado, 4 – Monitorado e 5 – Otimizado) e onze dimensões, divididas em duas categorias: “estratégias de *design*”, englobando aspectos relacionados às abordagens de *Design for X*, e “processo de *design*”, composto por aspectos gerenciais do PDP. Para facilitar o entendimento, foi também elaborado um quadro com a descrição detalhada e exemplificada de cada dimensão (Quadro 16).

Quadro 16 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

Dimensão	Descrição	Abordagens de Design	Descrição
Narrowing <i>Konietzko et al. (2020); De Los Rios; Charnley (2017); Moreno et al. (2016)</i>	• Usar menor quantidade de matéria-prima, englobando componentes, materiais e energia durante as etapas de projeto, produção, entrega, uso e recuperação	• <i>Design</i> de baixo impacto ambiental	<i>Design</i> de produtos com materiais que demandem menos recursos, como energia e água, durante a produção Avaliar as propriedades físicas e químicas dos materiais
		• <i>Design</i> de produtos de baixo peso	<i>Design</i> de produtos mais leves, exigindo menos material e menos energia para o transporte
		• <i>Design</i> para múltiplas funções	<i>Design</i> de produtos com múltiplas funções, que podem ser usados por diferentes grupos de usuários
		• <i>Design</i> para a padronização e compatibilidade	<i>Design</i> de produtos, componentes e interfaces que se adequam a outros produtos, componentes e interfaces
		• <i>Design</i> com foco em melhorias no processo produtivo	<i>Design</i> de produtos para se evitar falhas e perdas de material e componentes no processo produtivo.
Slowing <i>Konietzko et al. (2020) Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016) Dokter et al (2021)</i>	• Usar produtos, componentes e materiais por mais tempo; • <i>Design</i> para múltiplos ciclos, e não apenas orientado para o fim de vida; • <i>Design</i> para a extensão da vida do produto	• <i>Design</i> para a durabilidade física	<i>Design</i> de produtos que se degradam de forma mais lenta em relação à produtos substitutos
		• <i>Design</i> para a durabilidade emocional	<i>Design</i> de produtos que os usuários vão amar e confiar por um longo período de tempo
		• <i>Design</i> para a facilidade de manutenção e reparo	<i>Design</i> de produtos que possam ser facilmente conservados ou reparados
		• <i>Design</i> para a fácil desmontagem	<i>Design</i> de produtos que possam ser facilmente desmontados ou remontados
		• <i>Design</i> para a atualização	<i>Design</i> de produtos que possam ser atualizáveis ao longo do tempo, em função da demanda e novas necessidades de mercado

Quadro 16 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

Dimensão	Descrição	Abordagens de Design	Descrição
<i>Closing</i> <i>Konietzko et al. (2020)</i>	Atividade que incorpora os resíduos pós-consumo de volta ao ciclo econômico	• <i>Design</i> com materiais reciclados • <i>Design</i> com apenas um material • <i>Design</i> com materiais adequados para reciclagem primária • <i>Design</i> para fácil desmontagem no fim de vida dos produtos	<i>Design</i> de produtos considerando materiais reciclados de outros produtos ou componentes <i>Design</i> de produtos com apenas um material, aumentando a reciclabilidade (materiais compósitos não podem ser separados); <i>Design</i> de produtos com materiais que promovam a reciclagem primária (capaz de manter o material reciclado com propriedades equivalentes às do material original); <i>Design</i> de produtos pensando na fácil desmontagem (conceito que permite que os componentes possam ser mais facilmente separados e reciclados).
<i>Regenerating</i> <i>Konietzko et al. (2020)</i>	Atividade que gerencia e sustenta ecossistemas naturais, usa materiais renováveis e não tóxicos, e é movida a energia renovável	• <i>Design</i> com materiais renováveis • <i>Design</i> com materiais não tóxicos	• <i>Design</i> de produtos com materiais renováveis ou de baixo carbono; • <i>Design</i> de produtos sem materiais tóxicos
<i>Informing</i> <i>Konietzko et al. (2020)</i>	Uso de tecnologia da informação como estratégia de suporte à EC, por meio da aplicação da inteligência artificial, internet das coisas e <i>big data</i> .	• Uso da inteligência artificial (IA) para desenvolver novos materiais com propriedades circulares • Virtualizar • <i>Design</i> de produtos conectados • <i>Design</i> para o compartilhamento	• Uso da IA na análise de estruturas e propriedades de materiais para apoiar as decisões de <i>Design</i> com base em requisitos circulares • Entregar utilidade virtualmente, reduzindo a necessidade de uso de materiais, e promover a desmaterialização de documentos, como roteiros de operação e manuais de manutenção • Desenvolvimento de produtos com sensores que podem enviar e receber diferentes tipos de dados • Uso da tecnologia da informação para a criação de plataformas digitais, como os aplicativos de compartilhamento e troca

Quadro 16 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

Dimensão	Descrição	Abordagens de Design	Descrição
Uso de dados no processo de Design <i>Dokter et al. (2021);</i> <i>De Los Rios; Charnley (2017);</i> <i>Konietzko et al. (2020)</i>	Uso de dados relacionados aos impactos ambientais do produto e as formas com que é utilizado	Entender, desde o projeto de produtos, impactos causados pela experiência de uso e pela logística e sistema de distribuição	- Avaliação dos impactos ambientais antecipadamente; - Uso de dados para rastrear ciclos de vida e aprender sobre fase de uso, ajudando a prever quando um serviço será necessário - Uso de passaportes de materiais para documentar materiais utilizados
Avaliação do Impacto Circular dos Produtos <i>Sumter et al. (2021)</i> <i>Dokter et al. (2021);</i> <i>Moreno (2016)</i>	Estimar o impacto ambiental das soluções circulares em um nível sistêmico, apoiando a tomada de decisões durante o processo de <i>design</i>	Medição da circularidade das soluções de <i>design</i>, com o uso de indicadores como o “conteúdo reciclado” (percentual de material reciclado em um produto), o índice de reparabilidade ou o índice de revenda EOL (venda ao fim de vida de resíduos e/ou componentes para reaproveitamento).	- Uso de indicadores de impacto ambiental já existentes; - Criação de indicadores específicos para uso nos projetos de produto; <i>Design</i> sabendo a origem e o destino de cada material e componente
Adoção de modelos de negócios circulares <i>Sumter et al. (2021)</i> <i>Konietzko et al. (2020)</i> <i>Dokter et al. (2021)</i> <i>Moreno et al. (2021)</i>	Inserção da circularidade como critério essencial para a definição da entrega e captura de valor	- Identificar os novos modelos de negócio circulares para o qual o produto/serviço está sendo projetado <i>Design</i> de produtos que se encaixem em um modelo de negócio circular e vice-versa	- Fornecer o produto como um serviço; - Organizar serviços de reparo e manutenção, oferecidos pelo próprio fabricante ou por terceiros; - Prover serviços de atualização do produto; - Reusar e vender componentes e materiais de produtos descartados;

Quadro 16 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz

<i>Dimensão</i>	<i>Descrição</i>	<i>Abordagens de Design</i>	<i>Descrição</i>
<i>Engajamento Circular do Usuário</i> <i>Sumter et al. (2021)</i>	Engajar os usuários nos períodos de uso e fim de uso dos produtos	<i>Design</i> de produtos e serviços que engajam os usuários em relação à EC, permitindo, por exemplo, o uso do produto por maior período de tempo e o compartilhamento	• <i>Design</i> com experiências práticas e sistemas de recompensa, além do engajamento estimulado por participação, com <i>design</i> de produtos do tipo “faça você mesmo” • Promover o reconhecimento dos benefícios das soluções circulares por parte dos usuários
<i>Colaboração para a EC</i> <i>Sumter et al. (2021);</i> <i>Moreno et al. (2016)</i> <i>Konietzko et al. (2020)</i> <i>Dokter et al. (2021)</i>	Identificar, mapear, facilitar e gerenciar a colaboração ente <i>stakeholders</i> para a operacionalização do modelo de negócios circular	Engajamento e colaboração com diferentes <i>stakeholders</i> ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos	• Envolvimento de múltiplos parceiros nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto, promovendo sessões de <i>brainstorming</i> e co-criação; • <i>Design</i> com diferentes participantes da cadeia de valor, incluindo o usuário final, mantendo-o em mente; • Localização de fornecedores locais, os quais diminuem o total de energia necessária para o transporte de materiais
<i>Comunicação para a EC</i> <i>Sumter et al. (2021)</i>	Apresentar narrativas envolventes da aplicação bem-sucedida da economia circular, tornando-a uma ideia compartilhada para obter apoio de diferentes <i>stakeholders</i>	Uso de técnicas de comunicação, como o <i>storytelling</i> , para criar um vocabulário comum e compartilhado a respeito da EC	• Fornecer exemplos de aplicação bem-sucedida da EC, por meio de estudos de caso, e criar um entendimento comum de suas propostas

Fonte: Moreno et al. (2016); De Los Rios; Charnley (2017); Konietzko et al. (2020); Sumter et al. (2021); Dokter et al. (2021).

Dessa forma, ao elaborar o Quadro 17, correspondente à versão inicial da matriz, o foco esteve em representar os níveis de maturidade por meio de patamares que permitem o diagnóstico das forças e fraquezas do processo de desenvolvimento de produtos em relação à EC. No nível de maturidade 1 – Inerte, a organização conhece minimamente o conceito de EC, porém o DPC não é aplicado no desenvolvimento de novos produtos. Assim, não há nenhuma experiência com essa abordagem, estando alheia aos seus potenciais benefícios. Para avançar para o nível de maturidade 2, a organização precisa se capacitar em abordagens já presentes e tradicionais no *ecodesign*, passando a se preocupar em recuperar recursos por meio das abordagens de *design* para a reciclagem, *design* para a remanufatura e *design* para a desmontagem.

A organização começa a apresentar os primeiros passos em direção à circularidade no nível 2 – Consciente. Nesse nível, a empresa começa a se interessar e conhecer a EC, sendo familiar a alguns de seus princípios. Reconhece a importância e começa a analisar possibilidades de adotar iniciativas voltadas às estratégias circulares, porém, ainda motivada em solucionar problemas específicos e com foco em fases finais do ciclo de vida do produto. Ainda é bastante tímido o envolvimento de *stakeholders* para a colaboração do desenvolvimento de produtos e são feitos os primeiros esforços para criar um vocabulário compartilhado a respeito da EC. Para avançar para o nível de maturidade 3, é necessário que a organização passe a efetivamente aplicar as abordagens de *design* por meio das diferentes estratégias circulares, incluindo a extensão da vida do produto, colocando em prática, por exemplo, o *design* para reuso, fácil manutenção e reparo, atualização e *design* para a durabilidade emocional. Além disso, necessita também começar a perceber a utilidade dos dados para o desenvolvimento de produtos circulares e se esforçar em criar maneiras de fazer uso desses dados de forma proativa.

No nível de maturidade 3 – Aplicado, além de conhecer a EC, a organização reconhece sua importância e potenciais benefícios e aplica as estratégias circulares em projetos específicos, já considerando todas as fases do ciclo de vida do produto. Neste nível, há o reconhecimento da importância dos dados para o processo de *design*, com o uso da ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), por exemplo. Além disso, nota-se o início do desenvolvimento de uma linguagem comum do DPC, ou seja, a organização começa a integrá-lo em seu PDP de forma mais natural e conta com a colaboração de *stakeholders* em alguns projetos. Para avançar para o nível 4, a organização necessita estabelecer indicadores para o DPC, examinando o desempenho de cada estratégia circular adotada, além de estruturar o

envolvimento de consumidores e demais *stakeholders* para torná-los parte do processo de desenvolvimento.

Já no nível 4 – Monitorado, essa integração entre a EC e o PDP já é realizada de forma proativa e formalizada, com processos documentados e uma estrutura bem estabelecida. Assim, o DPC é incorporado sistematicamente no PDP, com a consideração de seus princípios nos projetos de produto desde as fases iniciais e considerando a maior parte das estratégias circulares. Neste nível, a organização se preocupa em medir e monitorar quão efetiva é a integração da EC ao desenvolvimento de novos produtos, utilizando indicadores de desempenho e métricas quantitativas. Dessa forma, os resultados obtidos com o uso de ferramentas como a ACV são usados de forma estratégica, impactando a tomada de decisões no desenvolvimento de produtos. Ademais, o processo colaborativo para envolvimento de consumidores e demais *stakeholders* já é consolidado. O avanço para o nível 5 está condicionado à busca por uma quebra de paradigma, formando um futuro em que os aspectos de circularidade passam a ser os atributos mais importantes para o desenvolvimento de produtos, com foco em toda a cadeia de valor.

O nível 5 – Otimizado, é caracterizado pela otimização desse processo, ou seja, a melhoria contínua do desempenho circular no PDP. Os resultados dos indicadores são usados como *inputs* para esse aprimoramento contínuo. O envolvimento de diferentes *stakeholders* é melhorado continuamente, cada vez mais envolvendo-os no processo de desenvolvimento. Busca-se, assim, a identificação de oportunidades circulares para o PDP responder às forças de mercado. Ressalta-se que o nível 5 não deve ser entendido como o estacionário, uma vez que o processo de melhoria dos produtos circulares deve ser continuamente aprimorado, corroborando a ideia de que a maturidade está em constante refinamento.

Quadro 17 – Versão inicial da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (continua)

	Dimensões	1 - Inerte	2 - Consciente	3 - Aplicado	4 - Monitorado	5 - Otimizado
Estratégias de Design	Slowing Konietzko et al. (2020); Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016); Dokter et al (2021)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas voltadas a “ <u>usar o produto por mais tempo</u> ”, ampliando seu valor para além do fim do ciclo de vida	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>slowing</i> , incluindo o <i>design</i> para a extensão da vida do produto e o <i>design</i> para múltiplos ciclos de vida	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>slowing</i> já são institucionalizados no processo de desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia e busca melhorar continuamente os resultados e desempenho em direção ao <i>slowing</i> no processo de desenvolvimento de produtos
	Narrowing e Regenerating Konietzko et al. (2020); De Los Rios; Charnley (2017); Moreno et al. (2016)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas voltadas a “ <u>usar menos</u> ”, demandando menos recursos, e a “ <u>produzir de forma mais limpa</u> ”, com materiais não tóxicos	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>narrowing</i> , incluindo o <i>design</i> com foco em melhorias no processo produtivo para diminuição dos impactos ambientais	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>narrowing</i> já são institucionalizados no processo de desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia e busca melhorar continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>narrowing</i> no processo de desenvolvimento de produtos
	Closing Konietzko et al. (2020)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas para fechar o ciclo dos produtos	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>closing</i> , recolocando os resíduos pós-consumo de volta ao ciclo econômico	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>closing</i> já são institucionalizados no desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>closing</i> no processo de desenvolvimento de produtos

Quadro 17 - Versão inicial da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (continua)

	<i>Dimensões</i>	<i>1 - Inerte</i>	<i>2 - Consciente</i>	<i>3 - Aplicado</i>	<i>4 - Monitorado</i>	<i>5 - Otimizado</i>
<i>Estratégias de Design</i>	Informing Konietzko et al. (2020)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância dessa estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar a tecnologia da informação em direção à EC no processo de desenvolvimento de produtos	Já aplica a tecnologia da informação em projetos de produto específicos, tais como o <i>design</i> de produtos conectados	Apresenta indicadores para examinar o desempenho desta estratégia, avaliando o potencial da tecnologia da informação em direção ao desenvolvimento de produtos alinhado à EC.	Avalia e busca melhorar continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>informing</i> no processo de desenvolvimento de produtos
<i>Processo de Design</i>	Uso de dados no processo de Design Dokter et al. (2021); De Los Rios; Chamley (2017); Konietzko et al. (2020)	Não apresenta experiência com o uso de dados para avaliar impactos ambientais dos produtos durante seu ciclo de vida	Reconhece a importância do uso de dados e inicia análises de possibilidades para utilizar dados relacionados aos impactos ambientais dos produtos em alguns projetos de <i>design</i> de produto	Mantém um histórico dos resultados das análises do ciclo de vida dos produtos e começa a analisar esses resultados para melhoria da circularidade em alguns projetos de <i>design</i> de produto	Incorpora de maneira sistemática os resultados da análise do ciclo de vida dos produtos à tomada de decisões no processo de desenvolvimento de produtos	Avalia e busca melhorar continuamente a utilização de dados relacionados ao ciclo de vida no processo de desenvolvimento de produtos
	Avaliação do Impacto Circular dos Produtos Sumter et al. (2021) Dokter et al. (2021); Moreno (2016)	Não apresenta experiência com o uso de métricas ou indicadores que permitam medir quão circular é o produto	Reconhece a importância e tem iniciativas isoladas para o desenvolvimento de indicadores para identificação da circularidade dos produtos	Possui indicadores em projetos específicos que permitem analisar a circularidade ao longo do ciclo de vida dos produtos	Utiliza de maneira sistemática indicadores de circularidade dos produtos ao longo de todo o ciclo de vida	Revisa e busca melhorar continuamente os indicadores utilizados para avaliar os aspectos de circularidade ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos

Quadro 17 - Versão inicial da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP)

Processo de Design	Dimensões	1 - Inerte	2 - Consciente	3 - Aplicado	4 - Monitorado	5 - Otimizado
	Adoção de modelos de negócios circulares Sumter et al. (2021) Konietzko et al. (2020) Dokter et al. (2021) Moreno et al. (2021)	Conhece minimamente os modelos de negócio circulares, mas não os aplica no processo de desenvolvimento de produtos	Reconhece a importância dos modelos de negócio circulares e começa a analisar meios de adoção de modelos voltados à recuperação de recursos	Reconhece e aplica modelos de negócio circulares voltados à recuperação de recursos e à extensão da vida útil, preocupando-se em enquadrar o <i>design</i> do produto ao modelo escolhido	A avaliação de novos modelos de negócio circulares para o produto que está sendo projetado ocorre de forma sistematizada	Melhora continuamente o desenvolvimento, ao mesmo tempo, do produto, serviço e modelo de negócio circular e analisa continuamente os efeitos e impactos de tais escolhas
	Engajamento Circular do Usuário/consumidor Sumter et al. (2021)	Não possui experiência sobre como engajar os consumidores/usuários nos projetos de produtos alinhados aos princípios da EC	Reconhece a importância e tem iniciativas isoladas em envolver os consumidores/usuários nos projetos de produtos alinhados aos princípios da EC	Engaja consumidores/usuários em projetos de desenvolvimento de produtos alinhados aos princípios da EC	É sistematizado na empresa o engajamento de consumidores/usuários nos projetos de desenvolvimento de produtos alinhados aos princípios da EC	Melhora continuamente o engajamento de consumidores nos projetos de produtos alinhados aos princípios da EC
	Colaboração para a EC Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016) Konietzko et al. (2020) Dokter et al. (2021)	Não possui experiência em como envolver <i>stakeholders</i> para colaborarem com o processo de desenvolvimento de produtos circulares	Reconhece a importância e apresenta iniciativas isoladas para o envolvimento de <i>stakeholders</i> para colaborarem com o processo de desenvolvimento de produtos circulares	Alguns projetos de desenvolvimento de produtos circulares contam com a colaboração de <i>stakeholders</i>	É sistematizada na empresa a colaboração com os <i>stakeholders</i> nos projetos de desenvolvimento de produtos circulares	Melhora continuamente as formas de colaboração com <i>stakeholders</i> para os projetos de desenvolvimento de produtos circulares
	Comunicação para a EC Sumter et al. (2021)	Não possui experiência em estratégias de comunicação em relação à EC, deixando de expor os benefícios de sua adoção	Reconhece a importância e possui iniciativas para a criação de um vocabulário compartilhado a respeito da EC entre os <i>stakeholders</i> envolvidos no processo de desenvolvimento de produtos circulares	Apresenta uma linguagem comum a respeito da EC, e fornece exemplos de sua aplicação bem-sucedida, por meio de estudos de caso	É sistematizada na empresa a comunicação para a EC, por meio do uso de <i>cases</i> como referências e reflexões de como adaptá-los para o contexto em que atua	Melhora continuamente as formas de comunicação para a EC, com uma linguagem visual incorporada à cultura organizacional

4.3 Versão final da matriz de maturidade

As melhorias sugeridas pelos especialistas, tanto em relação ao quadro com as dimensões (Quadro 18) e à matriz em si (Quadro 19), foram avaliadas para posterior inclusão na versão apresentada aos profissionais. Como critérios de análise, buscou-se verificar quão complementares e divergentes foram os comentários dos especialistas. Além disso, a viabilidade da incorporação das melhorias foi verificada, mantendo o escopo da pesquisa como aspecto norteador para a seleção das sugestões a serem implementadas. Dessa forma, as melhorias implementadas na segunda versão da matriz incluem:

- A tradução dos termos relacionados às cinco estratégias circulares, buscando facilitar o entendimento das questões chave tratadas em cada estratégia. Assim, elaborou-se um complemento simples, em português, para cada uma das dimensões: *narrowing* – usar menos, *regenerating* – produzir de forma limpa, *slowing* – usar por mais tempo, *closing* – usar de novo e *informing* - usar a TI para buscar a circularidade;
- No quadro das dimensões, na coluna de descrição das abordagens de *design*, optou-se por utilizar verbos no infinitivo no lugar dos substantivos, enfatizando as ações de cada abordagem. Destaca-se que a expressão “*Design de produtos*” foi substituída por “projetar produtos”;
- Com base nas sugestões dos especialistas, foram feitos alguns ajustes para evitar redundâncias e as descrições das dimensões foram revisadas, identificando possibilidades de sintetizá-las. Por exemplo, na dimensão “Colaboração para a EC”, os dois primeiros tópicos foram combinados em apenas um: “*Envolver múltiplos parceiros nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto, incluindo o usuário final, promovendo sessões de brainstorming e co-criação*”.
- Foram inseridas algumas abordagens de *design*, de acordo com os comentários dos especialistas. Na dimensão *Narrowing*, foi inserido o “*Design para a modularidade*”, uma vez que afeta positivamente a manutenção e a atualização por meio da intercambialidade. Na dimensão *Closing*, foi inserido o “*Design com materiais recicláveis*”, com base no seguinte comentário dos especialistas: “*Mesmo que abaixo tenha falado de reciclagem primária, muitas vezes o material original é reciclado e não mantém as propriedades originais, mas ainda pode ser utilizado para outras funções ou em outras indústrias*”. Na dimensão *Informing*, foi inserido o “*Design para a otimização*”, designando o uso da análise computacional como ferramenta de otimização de produto e de processo;

- A partir das sugestões dos especialistas, notou-se a necessidade de incluir exemplos das abordagens de *design* no nível 3 (Aplicado) da matriz. Por exemplo, na dimensão *Slowing*, foram inseridos, entre parênteses, exemplos das abordagens para a extensão da vida do produto para múltiplos ciclos de vida. Ademais, sendo o nível 3 a mediana da matriz, em que a empresa passa a utilizar de fato as práticas e começa a medir o desempenho deste processo, foram inseridas também explicações de alguns termos para facilitar o entendimento no momento da aplicação. Por exemplo, na dimensão *Informing*, no nível 3, foi inserido o conceito de produtos conectados e na dimensão *Avaliação do Impacto Circular dos Produtos* foi inserido o índice de revenda EoL (*end of life*), indicando a venda ao fim de vida de resíduos e/ou componentes para reaproveitamento por outras indústrias;
- Por fim, optou-se também pela alteração da ordem de apresentação das dimensões relacionadas às estratégias circulares, seguindo a lógica do ciclo do produto, primeiro pensando no papel do *design* em diminuir o uso de recursos no processo produtivo (*narrowing* – usar menos), além da preocupação em utilizar fontes renováveis e materiais não tóxicos (*regenerating* – produzir de forma limpa). Então, após o produto adentrar o ciclo do consumo, a próxima dimensão trata de estender seu uso (*slowing* – usar por mais tempo) e, ao chegar no fim de vida, são consideradas as abordagens para sua reinserção no ciclo econômico (*closing* – usar de novo). Por fim, como estratégia de suporte a essas etapas, tem-se o uso da TI buscando a otimização e digitalização (*informing*).

Assim, as melhorias acima descritas foram incorporadas à segunda versão da matriz, que foi apresentada aos profissionais. Para evitar a repetição do conteúdo, optou-se aqui por apresentar o conjunto de melhorias sugeridas de forma única e integrada na versão final. Dessa forma, após a realização das entrevistas, os *feedbacks* foram também analisados e as melhorias sugeridas foram avaliadas. Assim, as melhorias implementadas na versão final da matriz incluem:

- A divisão das dimensões *Narrowing* e *Regenerating*, que haviam sido agrupadas na matriz. Apesar de ambas tratarem da interação entre *design* do produto e processo produtivo, notou-se a diferença dos objetivos centrais de cada uma. Essa alteração foi sugerida na primeira entrevista e já adotada previamente às outras três entrevistas;

- Na entrevista com o profissional da empresa B, notou-se que a abordagem *Design* para a fácil desmontagem estava presente em duas dimensões: *Slowing* e *Closing*, o que causou certa dificuldade para o entrevistado. Tendo em vista o objetivo final da fácil desmontagem (tornar mais fácil a separação e reciclagem), optou-se por mantê-la somente na dimensão *Closing* na versão final da matriz;
- Após discussões sobre a necessidade de que o *design* influencie o descarte correto e sensibilize o consumidor para que a extensão da vida do produto seja possível, foi inserida na dimensão *Slowing* a abordagem *Design* para o comportamento circular (*Design for Circular Behavior*).

Quadro 18 – Versão final das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

<i>Dimensão</i>	<i>Descrição</i>	<i>Abordagens de Design</i>	<i>Descrição</i>
Narrowing - Usar menos  Konietzko et al. (2020); De Los Rios; Charnley (2017); Moreno et al. (2016)	• Usar menor quantidade de matéria-prima, englobando componentes, materiais e energia durante as etapas de projeto, produção, entrega, uso e recuperação	• <i>Design</i> de baixo impacto ambiental • <i>Design</i> de produtos de baixo peso • <i>Design</i> para a eficiência energética • <i>Design</i> para a padronização e compatibilidade • <i>Design</i> com foco em melhorias no processo produtivo • <i>Design</i> para a modularidade	Projetar produtos com materiais que demandem menos recursos, como energia e água, durante a produção Avaliar as propriedades físicas e químicas dos materiais Projetar produtos mais leves, exigindo menos material e menos energia para o transporte Projetar produtos considerando sua eficiência energética durante o uso Criar produtos, componentes e interfaces que se adequam a outros produtos, componentes e interfaces Projetar produtos para se evitar falhas e perdas de material e componentes no processo produtivo. <i>Design</i> de produtos que permite a subdivisão de um sistema em partes menores (módulos), que podem ser modificados ou substituídos de forma independente por outras partes.
Regenerating - Produzir de forma limpa  Konietzko et al. (2020)	Atividade que gerencia e sustenta ecossistemas naturais, usa materiais renováveis e não tóxicos, e é movida a energia renovável	• <i>Design</i> com materiais renováveis • <i>Design</i> com materiais não tóxicos	• Projetar produtos com materiais renováveis ou de baixo carbono, como os naturais e biodegradáveis • Projetar produtos sem materiais tóxicos

Quadro 18 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

Dimensão	Descrição	Abordagens de Design	Descrição
Slowing - Usar por mais tempo  Konietzko et al. (2020) Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016) Dokter et al (2021)	• Usar produtos, componentes e materiais por mais tempo; • <i>Design</i> para múltiplos ciclos, e não apenas orientado para o fim de vida; • <i>Design</i> para a extensão da vida do produto	• <i>Design</i> para múltiplas funções • <i>Design</i> para a durabilidade física • <i>Design</i> para a durabilidade emocional • <i>Design</i> para a facilidade de manutenção e reparo • <i>Design</i> para o comportamento circular • <i>Design</i> para a atualização • <i>Design</i> para a confiabilidade • <i>Design</i> para o reuso • <i>Design</i> para a remanufatura • <i>Design</i> para a sistemas produto-serviço • <i>Design</i> para a recontextualização	Projetar produtos com múltiplas funções, que podem ser usados por diferentes grupos de usuários Projetar produtos que se degradam de forma mais lenta em relação à produtos substitutos Projetar produtos que os usuários vão amar e confiar por um longo período de tempo Projetar produtos que possam ser facilmente conservados ou reparados Projetar produtos que encorajem consumidores a adotarem comportamentos circulares Projetar produtos que possam ser atualizáveis ao longo do tempo, em função da demanda e novas necessidades de mercado Projetar produtos considerando uma alta probabilidade de funcionamento sem quebras ou falhas técnicas Projetar produtos para serem reusados após o fim de vida Projetar produtos para serem remanufaturados ao final do primeiro ciclo de vida Projetar produtos considerando o valor do serviço incorporado àquele produto Projetar produtos que possam ser usados em um contexto diferente do qual foram originalmente projetados, evitando a obsolescência

Quadro 18 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

Dimensão	Descrição	Abordagens de Design	Descrição
Closing - Usar de novo  Konietzko et al. (2020)	Atividade que incorpora os resíduos pós-consumo de volta ao ciclo econômico	• <i>Design</i> com materiais reciclados	Projetar produtos considerando materiais reciclados de outros produtos ou componentes
		• <i>Design</i> com apenas um material	Projetar produtos com apenas um material, aumentando a reciclabilidade (materiais compósitos não podem ser separados);
		• <i>Design</i> com materiais adequados para reciclagem primária	Projetar produtos com materiais que promovam a reciclagem primária (capaz de manter o material reciclado com propriedades equivalentes às do material original);
		• <i>Design</i> para fácil desmontagem no fim de vida dos produtos	Projetar produtos pensando na fácil desmontagem (conceito que permite que os componentes possam ser mais facilmente separados e reciclados).
		• <i>Design</i> com materiais recicláveis	Projetar produtos com materiais que possam ser reciclados e utilizados para outras funções ou em outras indústrias
		• <i>Design</i> para a biodegradabilidade	Projetar produtos considerando a capacidade de, ao fim de vida, serem degradados por atividade biológica
Informing - Usar a tecnologia da informação para buscar a circularidade  Konietzko et al. (2020)	Uso de tecnologia da informação como estratégia de suporte à EC, por meio da aplicação da inteligência artificial, internet das coisas e <i>big data</i> .	• Uso da inteligência artificial (IA) para desenvolver novos materiais com propriedades circulares	• Utilizar a IA na análise de estruturas e propriedades de materiais para apoiar as decisões de <i>Design</i> com base em requisitos circulares
		• Virtualizar	• Entregar utilidade virtualmente, reduzindo a necessidade de uso de materiais, e promover a desmaterialização de documentos, como roteiros de operação e manuais de manutenção
		• <i>Design</i> de produtos conectados	• Desenvolver produtos com sensores que podem enviar e receber diferentes tipos de dados
		• <i>Design</i> para a otimização	• Utilização de análise computacional como ferramenta de otimização de produto e de processo, como o uso do <i>Digital Mockup – DMU</i> e a validação de performance reduzindo testes com protótipo físico
		• <i>Design</i> para o compartilhamento	• Uso da tecnologia da informação para a criação de plataformas digitais, como os aplicativos de compartilhamento e troca

Quadro 18 – Versão inicial das dimensões para desenvolvimento da matriz (continua)

<i>Dimensão</i>	<i>Descrição</i>	<i>Abordagens de Design</i>	<i>Descrição</i>
<i>Uso de dados no processo de Design</i>  <i>Dokter et al. (2021); De Los Rios; Charnley (2017); Konietzko et al. (2020)</i>	Uso de dados relacionados aos impactos ambientais do produto e as formas com que é utilizado	• Entender, desde o projeto de produtos, impactos causados pela experiência de uso e pela logística e sistema de distribuição	• Avaliar os impactos ambientais antecipadamente; • Usar dados para rastrear ciclos de vida e aprender sobre fase de uso, ajudando a prever quando um serviço será necessário • Usar passaportes de materiais para documentar materiais utilizados
<i>Avaliação do Impacto Circular dos Produtos</i>  <i>Sumter et al. (2021) Dokter et al. (2021); Moreno (2016)</i>	Estimar o impacto ambiental das soluções circulares em um nível sistêmico, apoiando a tomada de decisões durante o processo de <i>Design</i>	• Medição da circularidade das soluções de <i>Design</i>, com o uso de indicadores como o “conteúdo reciclado” (percentual de material reciclado em um produto), o índice de reparabilidade ou o índice de revenda EOL (venda ao fim de vida de resíduos e/ou componentes para reaproveitamento).	• Usar indicadores de impacto ambiental já existentes; • Criar indicadores específicos para uso nos projetos de produto; • Projetar sabendo a origem e o destino de cada material e componente
<i>Adoção de modelos de negócios circulares</i>  <i>Sumter et al. (2021) Konietzko et al. (2020) Dokter et al. (2021) Moreno et al. (2021)</i>	Inserção da circularidade como critério essencial para a definição da entrega e captura de valor	• Identificar os novos modelos de negócio circulares para o qual o produto/serviço está sendo projetado • <i>Design</i> de produtos que se encaixem em um modelo de negócio circular e vice-versa	• Fornecer o produto como um serviço; • Organizar serviços de reparo e manutenção, oferecidos pelo próprio fabricante ou por terceiros; • Prover serviços de atualização do produto; • Reusar e vender componentes e materiais de produtos descartados;

Quadro 18 – Versão final das dimensões para desenvolvimento da matriz

<i>Dimensão</i>	<i>Descrição</i>	<i>Abordagens de Design</i>	<i>Descrição</i>
Engajamento Circular do Usuário  <i>Sumter et al. (2021)</i>	Engajar os usuários nos períodos de uso e fim de uso dos produtos	<i>Design</i> de produtos e serviços que engajam os usuários em relação à EC, permitindo, por exemplo, o uso do produto por maior período de tempo e o compartilhamento	• Projetar com experiências práticas e sistemas de recompensa, além do engajamento estimulado por participação, com <i>Design</i> de produtos do tipo “faça você mesmo” • Promover o reconhecimento dos benefícios das soluções circulares por parte dos usuários
Colaboração para a EC  <i>Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016) Konietzko et al. (2020) Dokter et al. (2021)</i>	Identificar, mapear, facilitar e gerenciar a colaboração ente <i>stakeholders</i> para a operacionalização do modelo de negócios circular	Engajamento e colaboração com diferentes <i>stakeholders</i> ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos	• Envolver múltiplos parceiros nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto, incluindo o usuário final, promovendo sessões de <i>brainstorming</i> e co-criação • Quando possível, localizar fornecedores locais, os quais diminuem o total de energia necessária para o transporte de materiais
Comunicação para a EC  <i>Sumter et al. (2021)</i>	Apresentar narrativas envolventes da aplicação bem-sucedida da economia circular, tornando-a uma ideia compartilhada para obter apoio de diferentes <i>stakeholders</i>	Uso de técnicas de comunicação, como o <i>storytelling</i> , para criar um vocabulário comum e compartilhado a respeito da EC	• Fornecer exemplos de aplicação bem-sucedida da EC, por meio de estudos de caso, e criar um entendimento comum de suas propostas • Criar plataformas digitais/observatórios para participação e entendimento da comunidade

Assim, o Quadro 18 funciona como embasamento teórico prévio à matriz (Quadro 19), com as referências utilizadas, as explicações das dimensões analisadas e exemplos de sua adoção. Vale ressaltar que, no momento das entrevistas com os profissionais, foram elaborados *slides* combinando ambos os quadros, ou seja, primeiramente era apresentada a descrição da dimensão e seus exemplos de abordagens e, logo em seguida, era apresentada a linha da matriz correspondente, solicitando que o entrevistado fornecesse sua visão e sua pontuação.

Na versão final da matriz, optou-se por realçar as duas categorias de dimensões (estratégias de *design* e processo de *design*) usando as cores azul e laranja. Esse padrão foi mantido na representação gráfica, tanto no gráfico de barras, quanto no gráfico radar.

Quadro 19 - Versão final da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (continua)

	Dimensões	1 - Inerte	2 - Consciente	3 - Aplicado	4 - Monitorado	5 - Otimizado
Estratégias de Design	Design para a conservação de recursos (Narrowing) De Los Rios; Charnley (2017); Moreno et al. (2016)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas voltadas a “usar menos”, demandando menos recursos, como o <i>design</i> de produtos mais leves	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>narrowing</i> , incluindo o <i>design</i> com foco em melhorias no processo produtivo para diminuição dos impactos ambientais, como, por exemplo, o <i>design</i> para o controle da qualidade de produção e <i>design</i> para diagnóstico de falha	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>narrowing</i> já são institucionalizados no processo de desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia e busca melhorar continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>narrowing</i> no processo de desenvolvimento de produtos
	Design para sistemas regenerativos (Regenerating) Konietzko et al. (2020);	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas voltadas a “produzir de forma mais limpa”, com energia renovável	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>regenerating</i> , preocupando-se com os ecossistemas naturais e incluindo o <i>design</i> com matérias renováveis, usando energia renovável neste processo	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>regenerating</i> já são institucionalizados no processo de desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia e busca melhorar continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>regenerating</i> no processo de desenvolvimento de produtos
	Design para desacelerar o ciclo de recursos (Slowing) Konietzko et al. (2020); Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016); Dokter et al (2021)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas voltadas a “ <u>usar o produto por mais tempo</u> ”, ampliando seu valor para além do fim do ciclo de vida	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>slowing</i> , incluindo o <i>design</i> para a extensão da vida do produto (por exemplo, o <i>design</i> para a durabilidade física e durabilidade emocional) e o <i>design</i> para múltiplos ciclos de vida (por exemplo, o <i>design</i> para a fácil desmontagem)	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>slowing</i> já são institucionalizados no processo de desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia e busca melhorar continuamente os resultados e desempenho em direção ao <i>slowing</i> no processo de desenvolvimento de produtos

Quadro 19 - Versão final da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (continua)

	Dimensões	1 - Inerte	2 - Consciente	3 - Aplicado	4 - Monitorado	5 - Otimizado
Estratégias de Design	Design para o fechamento de ciclo de recursos (Closing) Konietzko et al. (2020)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância desta estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar iniciativas para fechar o ciclo dos produtos, preocupando-se em recolocar os resíduos pós-consumo de volta ao ciclo econômico	Já aplica em projetos específicos estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>closing</i> , incluindo, por exemplo, o <i>design</i> com materiais reciclados e o <i>design</i> para fácil desmontagem no fim de vida dos produtos	As estratégias de <i>design</i> em direção ao <i>closing</i> já são institucionalizados no desenvolvimento de produtos, com o uso de indicadores para examinar o desempenho desta estratégia	Avalia continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>closing</i> no processo de desenvolvimento de produtos
	Uso da tecnologia da informação como estratégia de apoio ao Design circular (Informing) Konietzko et al. (2020)	Não apresenta experiência com esta abordagem, conhecendo-a minimamente	Reconhece a importância dessa estratégia e começa a analisar a possibilidade de adotar a tecnologia da informação em direção à EC no processo de desenvolvimento de produtos	Já aplica a tecnologia da informação em projetos de produto específicos, tais como o <i>design</i> de produtos conectados, que informam a necessidade de manutenção e reparo e que permitem a rastreabilidade dos produtos ao longo do seu ciclo de vida	Apresenta indicadores para examinar o desempenho desta estratégia, avaliando o potencial da tecnologia da informação em direção ao desenvolvimento de produtos alinhado à EC	Avalia e busca melhorar continuamente as estratégias e resultados em direção ao <i>informing</i> no processo de desenvolvimento de produtos
Processo de Design	Uso de dados no processo de Design Dokter et al. (2021); De Los Rios; Charnley (2017); Konietzko et al. (2020)	Não apresenta experiência com o uso de dados para avaliar impactos ambientais dos produtos durante seu ciclo de vida	Reconhece a importância do uso de dados e inicia análises de possibilidades para utilizar dados relacionados aos impactos ambientais dos produtos em alguns projetos de <i>design</i> de produto	Mantém um histórico dos resultados das análises do ciclo de vida dos produtos e começa a analisar esses resultados para melhoria da circularidade em alguns projetos de <i>design</i> de produto	Incorpora de maneira sistemática os resultados da análise do ciclo de vida dos produtos à tomada de decisões no processo de desenvolvimento de produtos	Avalia e busca melhorar continuamente a utilização de dados relacionados ao ciclo de vida no processo de desenvolvimento de produtos

Quadro 19 - Versão final da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (continua)

	<i>Dimensões</i>	<i>1 - Inerte</i>	<i>2 - Consciente</i>	<i>3 - Aplicado</i>	<i>4 - Monitorado</i>	<i>5 - Otimizado</i>
Processo de Design	<i>Avaliação do Impacto Circular dos Produtos</i> Sumter et al. (2021) Dokter et al. (2021); Moreno (2016)	Não apresenta experiência com o uso de métricas ou indicadores que permitam medir quão circular é o produto	Reconhece a importância e tem iniciativas isoladas para o desenvolvimento de indicadores para identificação da circularidade dos produtos	Possui indicadores em projetos específicos que permitem analisar a circularidade ao longo do ciclo de vida dos produtos	Utiliza de maneira sistemática indicadores de circularidade dos produtos ao longo de todo o ciclo de vida	Revisa e busca melhorar continuamente os indicadores utilizados para avaliar os aspectos de circularidade ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos
	<i>Adoção de modelos de negócios circulares</i> Sumter et al. (2021) Konietzko et al. (2020) Dokter et al. (2021) Moreno et al. (2021)	Conhece minimamente os modelos de negócio circulares, mas não os aplica no processo de desenvolvimento de produtos	Reconhece a importância dos modelos de negócio circulares e começa a analisar meios de adoção de modelos voltados à recuperação de recursos	Reconhece e aplica modelos de negócio circulares voltados à recuperação de recursos e à extensão da vida útil, preocupando-se em enquadrar o <i>design</i> do produto ao modelo escolhido	A avaliação de novos modelos de negócio circulares para o produto que está sendo projetado ocorre de forma sistematizada	Melhora continuamente o desenvolvimento, ao mesmo tempo, do produto, serviço e modelo de negócio circular e analisa continuamente os efeitos e impactos de tais escolhas
	<i>Engajamento Circular do Usuário/consumidor</i> Sumter et al. (2021)	Não possui experiência sobre como engajar os consumidores/usuários nos projetos de produtos alinhados aos princípios da EC	Reconhece a importância e tem iniciativas isoladas em envolver os consumidores/usuários nos projetos de produtos alinhados aos princípios da EC	Engaja consumidores/usuários em projetos de desenvolvimento de produtos alinhados aos princípios da EC	É sistematizado na empresa o engajamento de consumidores/usuários nos projetos de desenvolvimento de produtos alinhados aos princípios da EC	Melhora continuamente o engajamento de consumidores nos projetos de produtos alinhados aos princípios da EC

Quadro 19 - Versão final da Matriz de Maturidade para a Avaliação da Integração da Economia Circular (EC) no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (continua)

	<i>Dimensões</i>	<i>1 - Inerte</i>	<i>2 - Consciente</i>	<i>3 - Aplicado</i>	<i>4 - Monitorado</i>	<i>5 - Otimizado</i>
<i>Processo de Design</i>	<i>Colaboração para a EC</i> <i>Sumter et al. (2021); Moreno et al. (2016) Konietzko et al. (2020) Dokter et al. (2021)</i>	Não possui experiência em como envolver <i>stakeholders</i> para colaborarem com o processo de desenvolvimento de produtos circulares	Reconhece a importância e apresenta iniciativas isoladas para o envolvimento de <i>stakeholders</i> para colaborarem com o processo de desenvolvimento de produtos circulares	Alguns projetos de desenvolvimento de produtos circulares contam com a colaboração de <i>stakeholders</i>	É sistematizada na empresa a colaboração com os <i>stakeholders</i> nos projetos de desenvolvimento de produtos circulares	Melhora continuamente as formas de colaboração com <i>stakeholders</i> para os projetos de desenvolvimento de produtos circulares
	<i>Comunicação para a EC</i> <i>Sumter et al. (2021)</i>	Não possui experiência em estratégias de comunicação em relação à EC, deixando de expor os benefícios de sua adoção	Reconhece a importância e possui iniciativas para a criação de um vocabulário compartilhado a respeito da EC entre os <i>stakeholders</i> envolvidos no processo de desenvolvimento de produtos circulares	Apresenta uma linguagem comum a respeito da EC, e fornece exemplos de sua aplicação bem-sucedida, por meio de estudos de caso	É sistematizada na empresa a comunicação para a EC, por meio do uso de <i>cases</i> como referências e reflexões de como adaptá-los para o contexto em que atua	Melhora continuamente as formas de comunicação para a EC, com uma linguagem visual incorporada à cultura organizacional

Para a análise global do nível de maturidade da integração da EC no PDP, buscou-se adotar procedimentos semelhantes aos apresentados nos estudos de Poltronieri (2014) e Golev, Corder e Giurco (2015). Assim, após a pontuação das onze dimensões pelos entrevistados, foi possível identificar o nível de maturidade em que a empresa se encontra e estabelecer caminhos para avançar na maturidade com base nas dimensões com menores pontuações.

Com o objetivo de ilustrar o raciocínio utilizado, a Tabela 1 apresenta um exemplo de uma organização fictícia. A primeira coluna corresponde aos níveis de maturidade, de 1 a 5. A segunda coluna indica a quantidade de dimensões que o entrevistado selecionou para cada nível de maturidade, ou seja, a frequência com que cada nível foi selecionado como aquele que melhor descrevia a situação atual da organização. A terceira coluna, denominada progressão, está relacionada ao somatório das pontuações, ou seja, a pontuação do nível anterior adicionada ao nível atual. Já a última coluna, referente ao percentual, indica a porcentagem relativa do desempenho em cada nível, sendo obtida pela razão entre a coluna anterior e o total de dimensões (onze).

Tabela 1 – Obtenção do nível de maturidade conforme pontuação das dimensões

Nível de maturidade	Quantidade de dimensões pontuadas	Progressão	Percentual
1	0	11	11/11 = 100%
2	0	11	11/11 = 100%
3	4	11	11/11 = 100%
4	4	7	7/11 = 63%
5	3	3	3/11 = 27%

Fonte: Elaborada pela autora.

O nível de maturidade em que a empresa se encontra é facilmente identificado, ao verificar o primeiro percentual inferior a 100%, como sugere Poltronieri (2014). Assim, ao analisar a Tabela 1, nota-se que a empresa em questão atua no nível de maturidade 4, com um percentual de 63%. Na apresentação dos resultados, uma representação gráfica da Tabela 1, com gráfico de barras e gráfico radar, auxilia na visualização das pontuações das dimensões, bem como na identificação das diferenças entre as dimensões de estratégias de *design* e processo de *design*. Ademais, é importante ressaltar que nos casos em que houve a participação de dois entrevistados, obteve-se a pontuação final das dimensões por meio da média aritmética dos resultados de cada dimensão, tal como realizado no estudo de Golev, Corder e Giurco (2015).

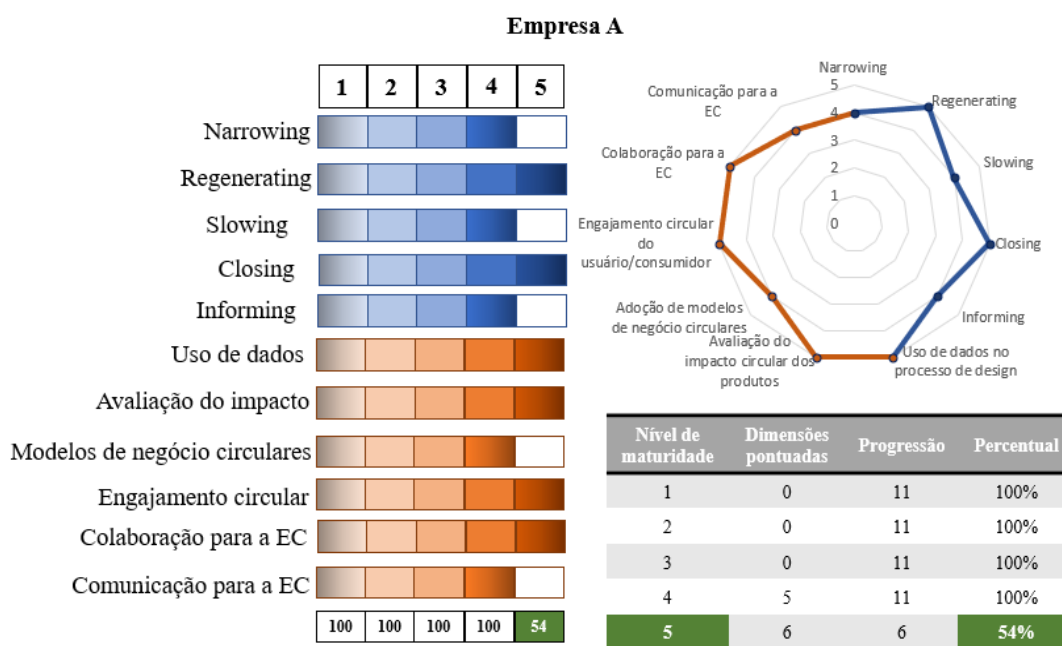
4.4 Análise dos resultados

Neste subtópico são apresentados os resultados obtidos pelas quatro empresas analisadas. O uso das representações gráficas, com o gráfico de barras e o gráfico radar, visa facilitar a visualização das forças e fraquezas das empresas nas onze dimensões, bem como permitir a verificação de direcionamentos futuros a partir do diagnóstico obtido. Assim, as onze dimensões foram posicionadas no sentido horário nos vértices do polígono gerado no gráfico radar, e os níveis de maturidade foram organizados sequencialmente nos polígonos interiores. As dimensões relacionadas às estratégias de *design* foram representadas em azul, enquanto as relacionadas ao processo de *design* foram representadas na cor laranja. Adicionou-se também a tabela indicando o percentual obtido em cada nível e a análise global do nível de maturidade da integração da EC no PDP das empresas analisadas. Além disso, os comentários dos entrevistados (*quotes*), com as justificativas de suas pontuações, foram também adicionados.

- **Análise da maturidade da empresa A**

A empresa A, uma unidade de negócio de uma multinacional do setor alimentício, possui em seu portfólio de produtos cápsulas de café e máquinas de café. A empresa atingiu o nível mais alto de maturidade (5 – Otimizado) em seis das onze dimensões analisadas, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Resultados da Empresa A



Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação às estratégias de *design*, nas dimensões Narrowing e Slowing, a entrevistada frizou que a máquina de café, um dos produtos da empresa, é feita para durar 10 anos e “*hoje pesam muito menos do que há algum tempo*”. Já as dimensões Regenerating e Closing foram as que a empresa obteve maior pontuação. Isso se justifica pelo fato de que a empresa possui a meta global para que sua principal linha de produtos seja feita com 80% de material reciclado e conta com o desenvolvimento de uma nova linha de produtos em que pretende utilizar 85% de material reciclado nos próximos dois anos. Nesse sentido, a entrevistada justificou a escolha da empresa em atuar tão fortemente neste campo, apesar de reconhecer que não é o foco principal da EC:

Eu sei que reciclagem não é o foco da Economia Circular. É um dos caminhos, mas não deve ser o principal. Mas a gente dá bastante foco nisso porque a gente entende a responsabilidade que a gente tem na geração de resíduos, mostrando que o alumínio é infinitamente reciclável.

Quanto à estratégia de *design* Informing, a entrevistada recordou que a empresa A lançou recentemente uma “cafeteira *smart*”, equipada com conexão *Wi-fi* e *Bluetooth*, possibilitando a atualização automática do *software*. A máquina lê o código de barras das cápsulas de café e ajusta automaticamente os parâmetros, otimizando as quantidades de água e energia necessárias.

Em relação às dimensões de processo de *design*, a entrevistada destacou principalmente as duas primeiras (Uso de dados no processo de design e Avaliação do impacto circular dos produtos), alegando:

Isso é muito ‘na unha’, mesmo, de buscar dados, de saber o quanto a gente recicla. A gente faz amostragem de todos os caminhões que chegam. E todo ano esses critérios podem ser atualizados.

Para mensurar o impacto de seus produtos, a empresa A utiliza a abordagem de avaliação do ciclo de vida (ACV) e reconhece as fases responsáveis pelos maiores impactos (cultivo do café e utilização da máquina). Já sobre a dimensão Adoção de modelos de negócios circulares, a entrevistada relatou que desde a fundação da empresa há um forte alinhamento entre o modelo adotado e o produto desenvolvido e esse aspecto permeia também a cultura organizacional da empresa, estando presente em seus valores.

No que se refere ao Engajamento Circular, foi enfatizado que a empresa A desenvolveu uma solução de reciclagem para a totalidade de seus consumidores, por meio de diferentes

estratégias de devolução das cápsulas usadas: pelo sistema dos correios, nas próprias lojas, em pontos de coleta ou por meio da chamada “entrega verde”, válida para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, em que o cliente faz o pedido, entregue utilizando bicicletas e carros elétricos, e no recebimento, já pode também entregar suas cápsulas usadas para reciclagem. Nas palavras da entrevistada:

A gente já trabalha esse engajamento, oferece serviços... Tem muito o que melhorar, mas digamos que não é uma coisa que a gente sistematizou e é isso. A gente tá sempre tentando melhorar, principalmente a experiência do usuário.

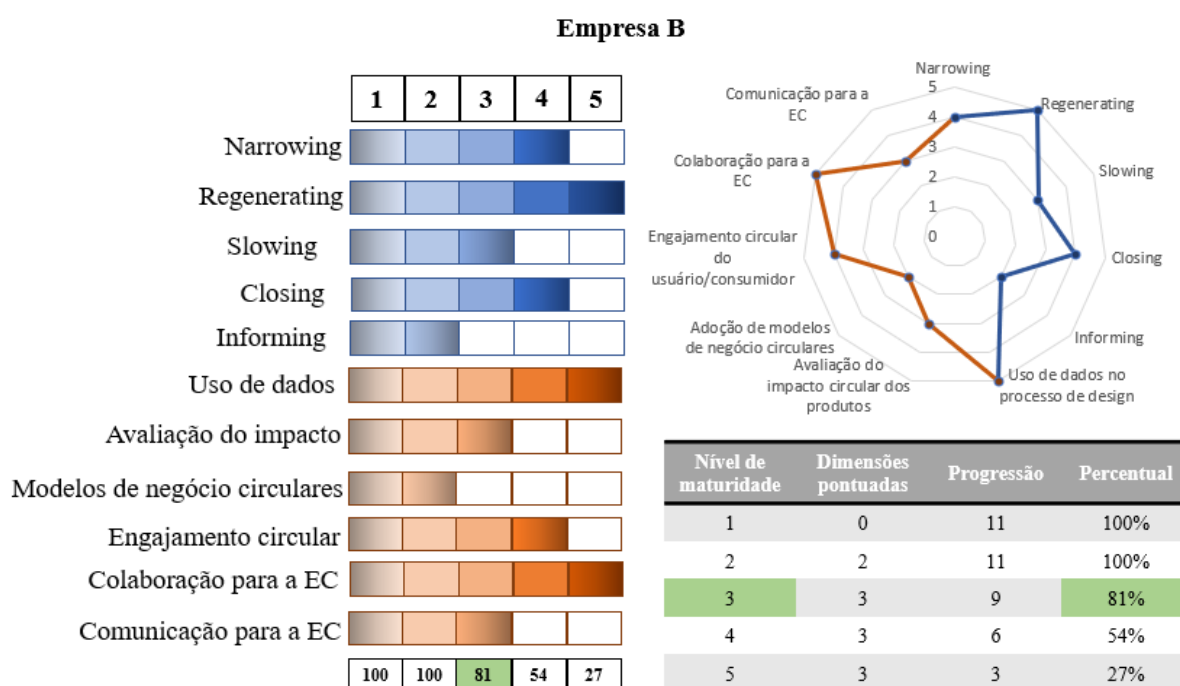
Quanto às duas dimensões finais – Colaboração e Comunicação para a EC – a entrevistada citou três iniciativas. Primeiramente, citou que a empresa possui desde 2003 um robusto projeto para a promoção de práticas sustentáveis nas fazendas de café, trabalhando em colaboração com agricultores, agrônomos e cooperativas. Além disso, a entrevistada mencionou também um outro projeto para a segunda vida dos materiais advindos da reciclagem: o alumínio é destinado à indústria siderúrgica e o café é doado para agricultores que produzem alimentos orgânicos na zona sul de São Paulo para utilização como adubo e cobertura de solo. Já com o intuito de comunicação, mostrando que o material utilizado tem valor mesmo depois de reciclado, a empresa A criou produtos, como canetas e canivetes, feitos a partir de cápsulas recicladas.

Dessa forma, a partir das pontuações em cada dimensão, obteve-se que a empresa A atua no nível de maturidade 5 – Otimizado, com uma porcentagem relativa a 54%. Como próximos passos para manter-se neste mais alto nível de maturidade, a partir dos comentários da entrevistada, foram observadas como oportunidades para a empresa A o investimento em produtos conectados, após a análise do desempenho de seu recente lançamento da cafeteira *smart*, além do fortalecimento da Comunicação, evidenciando as diversas frentes em que atua e servindo como referência para outras empresas, não só do mesmo setor industrial, mas que busquem inspirações para serem mais circulares. Nas palavras da entrevistada: “*temos o desafio de ir além de neutralizar os nossos impactos, mas também oferecer soluções para regenerar*”.

• Análise da maturidade da empresa B

A empresa B atua no início da cadeia produtiva do setor químico e petroquímico produzindo resinas e plásticos. Trata-se de uma fornecedora de matéria-prima para outras indústrias. A empresa B atingiu o nível mais alto de maturidade (5 – Otimizado) em três das onze dimensões analisadas, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Resultados da Empresa B



Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação às estratégias de *design*, na dimensão *Narrowing*, o profissional utilizou como exemplo o detergente para explicar os conceitos de embalagem primária, secundária e terciária. Segundo ele, a embalagem primária é a que tem contato com o produto, ou seja, o plástico que reveste o conteúdo. O pacote com três detergentes constitui a embalagem secundária, a “embalagem da embalagem” e o *pallet* envolvido com filme plástico configura uma embalagem terciária. Assim, o entrevistado ressaltou que atualmente na empresa B há uma reflexão sobre “*como resolver a situação sem ter primária, secundária e terciária, porque é muita embalagem*”. Discute-se, assim, a otimização da embalagem, pensando em “*como fazer um produto ‘ready to ship’, pronto para o envio*”.

As outras dimensões de estratégias de *design* com maiores pontuações foram *Regenerating* e *Closing*. O profissional enfatizou que a empresa B é a maior produtora de biopolímero do mundo e está expandindo sua capacidade para ser ainda mais relevante nesse

mercado. Além disso, desenvolveu uma embalagem flexível monomaterial que facilita a reciclagem. Quanto à estratégia de extensão da vida útil dos produtos (*Slowing*), o entrevistado afirmou que a empresa está direcionando esforços para ser mais madura: - “*A gente só não tá no 4 porque ainda não deu tempo, porque a gente tem premissas do quanto aumentou a vida útil, mas a confirmação a gente só vai ter nos próximos meses.*”

Nas dimensões relacionadas ao processo de *design*, o entrevistado apontou o Uso de dados no processo de design como a mais significativa e ressaltou a já consolidada experiência da empresa com a ferramenta de análise do ciclo de vida (ACV). Segundo o profissional: “*a empresa é uma das que mais desenvolveu ACV mundialmente. A gente tem mais de 150 estudos feitos (...) A nossa metodologia para o desenvolvimento de produto usa como uma das bases a ACV*”.

Outra dimensão que recebeu a maior pontuação foi a de Colaboração para a EC. Ao analisar esta dimensão, o entrevistado foi categórico ao citar que “*não adianta nada você desenhar para a reciclabilidade se você não atuar no pós consumo*”. Ademais, o profissional também citou a conexão da empresa B com uma *startup* de coleta de resíduos que promove um sistema de recompensa por meio de gamificação: a devolução da embalagem gera pontos que garantem desconto na compra da próxima embalagem.

Esta iniciativa está fortemente ligada à dimensão anterior – Engajamento circular – em que o entrevistado enfatizou o reconhecimento de que “*em algum momento o produto vai sair da mão do consumidor. Em algum momento ele quebra, ou o consumidor perde o interesse, ou fica desatualizado. Ele vai virar resíduo, é inevitável.*” A partir desse reconhecimento, a empresa B desenvolveu sua metodologia de desenvolvimento de produtos voltada à circularidade pensando em como engajar o consumidor. Nas palavras do entrevistado:

Na nossa metodologia, a gente estruturou que esse processo tem uma veia de *design* de produto e uma veia de comportamento e ao final do processo, eu junto as duas coisas. Eu obrigatoriamente tenho que juntar como eu faço a jornada do produto e a jornada do consumidor e que elas tenham a circularidade integrada.

Essa preocupação também é identificada na dimensão Modelo de negócio circulares, em que o entrevistado atribuiu uma menor pontuação, justificando que produz um material que será *input* para outro processo do qual se obtém o produto final:

Numa empresa B2B, eu não consigo avaliar todo o ciclo do produto; ele é uma matéria-prima que vai ser transformada. Como produto final, eu não tenho isso aqui. Talvez aqui eu precise avaliar sem olhar o ciclo do consumo (...) Minha pontuação tem que estar dentro do meu ambiente.

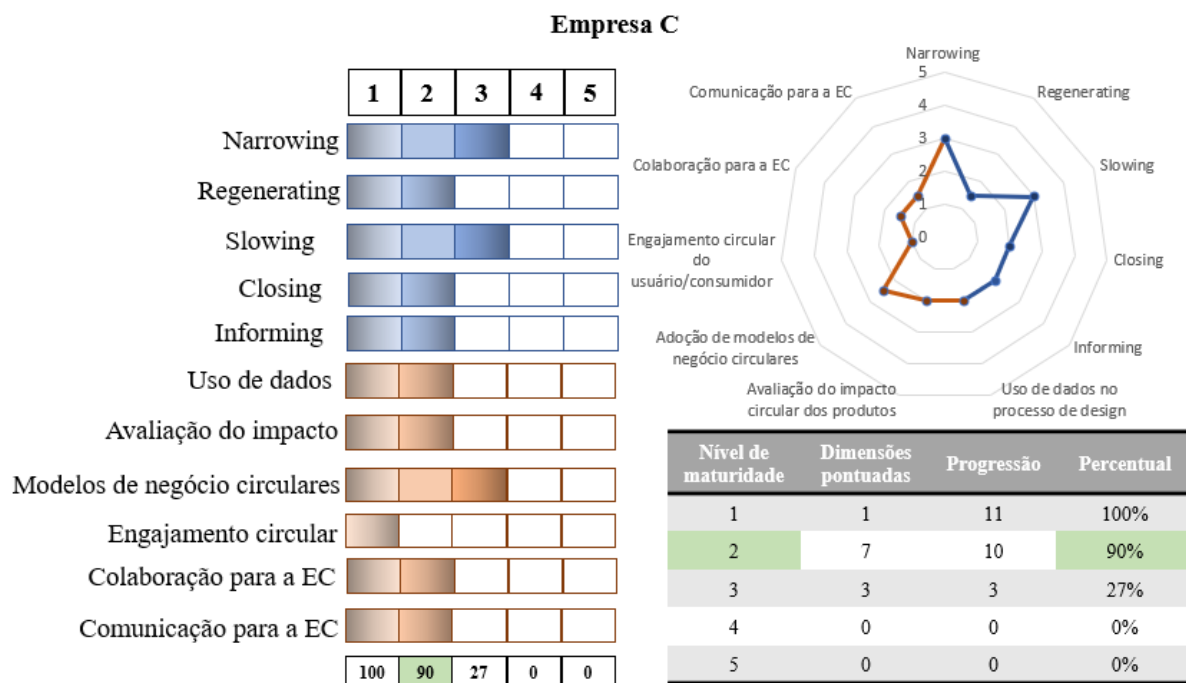
Dessa forma, a partir das pontuações em cada dimensão, obteve-se que a empresa B atua no nível de maturidade 3 – Aplicado, com uma porcentagem relativa a 81%. De acordo com os comentários do entrevistado, foi possível observar como próximos passos para a empresa B uma maior atuação na Comunicação para a EC. Ao pontuar que *“por mais que a empresa esteja voltada para a economia circular, não quer dizer que todos os funcionários, todos os integrantes, entendam o que é economia circular”*, o entrevistado deixou claro que o vocabulário comum a respeito da EC ainda não é uma realidade na empresa B. Mas esse é um esforço reconhecido, em que a empresa se mostra disposta a atuar, dada a fala do profissional: *“A gente fala que a gente tem que ir catequizando as pessoas, porque realmente é um termo muito novo.”*

Também foi possível notar que a empresa inclui nesse processo de catequização o consumidor. Segundo o entrevistado, *“o consumidor não sabe bem o que é economia circular. O que ele quer é ser mais sustentável”*. Nesse sentido, reiterou que *“a empresa tem metas ousadas em atuação do reciclado, como uma ressignificação de matéria-prima (...) O ponto é como você muda as aplicações, como que você ressignifica o uso”*. Dessa forma, notou-se que na empresa B há a consciência de que é necessário engajar o consumidor para a EC e há o comprometimento em tornar esse processo real. Em síntese, de acordo com o entrevistado, *“a gente sabe que não adianta você desenhar para a circularidade se você não trazer o consumidor junto”*.

- **Análise da maturidade da empresa C**

A empresa C é uma encarroçadora de ônibus que faz parte de um conglomerado formado por mais outras seis empresas, abrangendo centros de tratamento de alumínio, fábrica de vidros, entre outras, em um modelo de integração vertical. O mais alto nível de maturidade atingido foi o 3 – Aplicado, em somente três das onze dimensões analisadas, como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Resultados da Empresa C



Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação às dimensões que englobam as estratégias de *design*, *Narrowing* e *Slowing* foram as que obtiveram maiores pontuações (3 - Aplicado). Um dos produtos mais importantes da empresa C foi projetado considerando a facilidade de manutenção e reparo de itens, além da inclusão de materiais mais leves e elementos intercambiáveis com outros modelos. O profissional também destacou o uso de faróis LED, que possibilita uma maior durabilidade, e o fato de que houve a redução do peso do veículo, sem comprometer aspectos como durabilidade e resistência. Contudo, o entrevistado destacou o apelo comercial para a tomada de tais decisões, dado que o peso das carrocerias é um critério do cliente. Nas demais dimensões de estratégias de *design* (*Regenerating*, *Closing* e *Informing*), foi atribuída a pontuação 2 com destaque para a sua colocação de que “*Eu estou mais numa posição de reagir a necessidades impostas por órgãos de regulamentação*”.

Em relação à dimensão *Uso de dados no processo de design*, foi apontado que atualmente o pós-venda é a principal entrada de dados, mas não focado em monitoramento do ciclo de vida do produto: “*tem o monitoramento se tiver reclamação*”. Entretanto, com foco na digitalização de seus processos, recentemente a empresa C firmou uma parceria com uma empresa da área de *softwares* de gerenciamento de operações de manufatura e serviços de gerenciamento do ciclo de vida do produto. Buscando obter flexibilidade de customização de

seus produtos, a parceria permitirá à empresa C elaborar os projetos de engenharia, manufatura e tecnologia em conjunto, criando e implementando gêmeos digitais.

Quanto à dimensão *Modelos de negócio circulares*, observou-se o alinhamento entre o *design* do produto e o modelo de negócios de seu cliente, frisando a necessidade de haver flexibilidade para o atendimento de diferentes requisitos. Segundo o entrevistado:

Durante o desenvolvimento de produto, a gente avalia muito o modelo de negócio da empresa, mas também muito o modelo de negócio do nosso cliente (...) O meu produto precisa ter flexibilidade para atender os diferentes modelos de negócio dos meus clientes.

Na dimensão do *Engajamento Circular*, destacou-se o recente desenvolvimento de uma parceria da empresa C com uma empresa especializada para a coleta dos veículos articulados em fim de vida, que não têm mais possibilidade de revenda. Há uma recompensa ao cliente pelo correto descarte, com oferecimento de desconto na compra de um novo produto. Já na dimensão de *Colaboração*, observou-se que a empresa C considerou o desenvolvimento de fornecedores uma nova oportunidade de negócio e uma forma de se proteger dos concorrentes. Assim, a partir desta preocupação mercadológica, formou fornecedores próprios dos componentes de seu produto, se cercando de um ecossistema. Além disso, a empresa C possui algumas parcerias com empresas que produzem tecnologias de transporte, com baixa emissão de poluentes, com destaque para a produção de ônibus elétricos e ônibus híbridos.

Dessa forma, a partir das pontuações em cada dimensão, obteve-se que a empresa C atua no nível de maturidade 2 – Consciente, com uma porcentagem relativa a 90%. Como próximos passos para a empresa C alcançar maiores níveis de maturidade, nota-se a necessidade de incorporar às preocupações mercadológicas os atributos de circularidade, reconhecendo que essa integração pode trazer também resultados econômicos favoráveis. O entrevistado pontuou que:

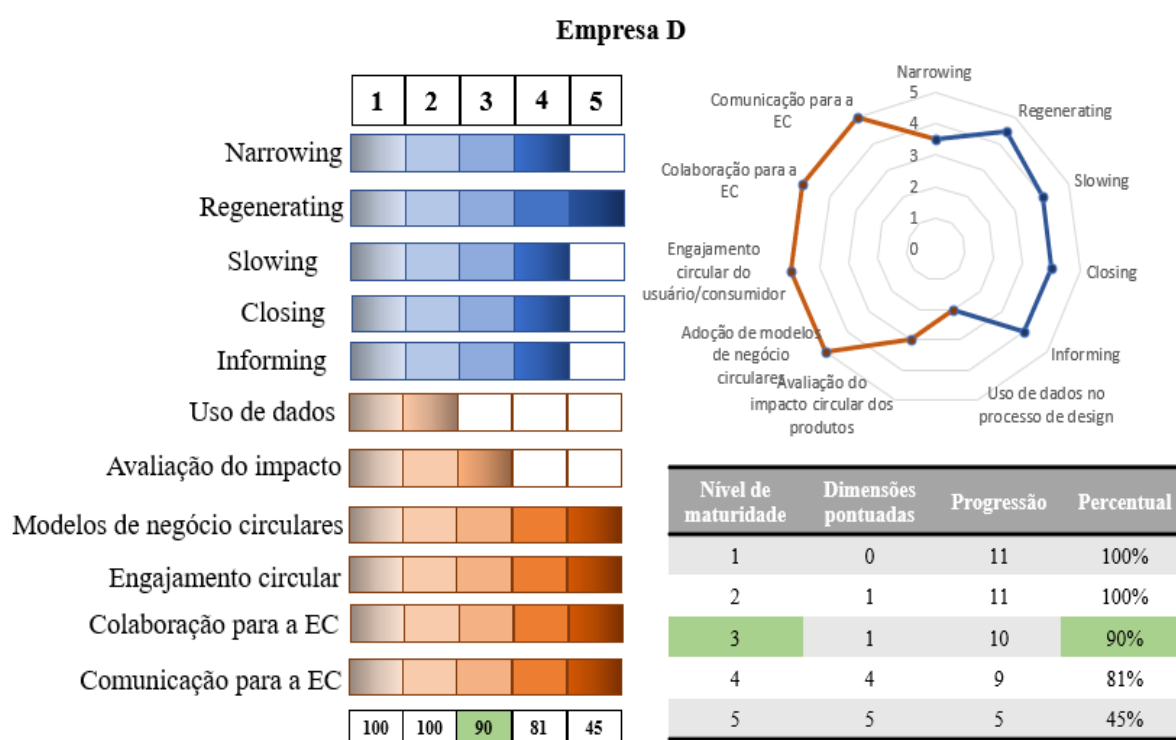
O cliente quer cada vez mais carrocerias mais leves, porque carroceria mais leve tem um menor consumo de combustível. Mas por mais que eu pense em reduzir peso de carroceria, eu tenho que substituir por uma outra matéria-prima que vai garantir que o meu produto tenha pelo menos a plenitude da vida útil dele, que seria de 10 anos.

Nota-se, assim, uma oportunidade no estabelecimento de parcerias com *stakeholders* não apenas para tratativas para o fim de vida dos produtos, mas também para a investigação de uso de materiais mais circulares, que mantenham a durabilidade do produto.

• Análise da maturidade da empresa D

A empresa D, uma *startup* que desenvolve produtos para comercializá-los no modelo *e-commerce*, possui em seu portfólio uma ampla variedade de produtos: carteiras coladas, carteiras costuradas, cachepôs, tênis, camisetas com bolso trocável, quadros, luminárias, bolsas, porta moedas e porta passaporte, fabricados utilizando fibra de polietileno. A empresa atingiu o nível mais alto de maturidade (5 – Otimizado) em cinco das onze dimensões analisadas, como mostra a Figura 33.

Figura 33 – Resultados da Empresa D



Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação às estratégias de *design*, na dimensão *Narrowing*, um ponto destacado foi o de que a produção que antes era artesanal e resultava em muita perda de material passou a ser automatizada depois da aquisição de uma máquina de corte e vinco, a qual possui um *software* que permite um melhor aproveitamento de material. Quanto à dimensão *Regenerating*, foi apontado que o processo de fabricação utiliza energia solar e há o reaproveitamento da água em todo o arranjo fabril. O profissional pontuou que “100% da energia que consumimos é gerada por nós mesmos”. Além disso, as tintas utilizadas para estampar os produtos da empresa D são à base d’água e não tóxicas e o algodão utilizado na fabricação das camisetas é orgânico.

Em relação à dimensão *Closing*, a empresa D possui um já consolidado programa de reciclagem. Ao enviarem de volta à empresa os produtos em fim de vida, os consumidores ganham um desconto para uma nova compra, e há também uma parceria com uma outra empresa da mesma região, que faz a reciclagem desses produtos e os transformam na matéria-prima base para a produção de linha de costura de novos produtos da empresa D: *“as linhas de costura dos nossos produtos, até o final desse ano, devem ser linhas de costura feitas a partir dos resíduos da nossa produção”*.

Na dimensão *Slowing*, foi possível identificar diferentes iniciativas da empresa D, que impactam também nas dimensões de processo de *design*. Os clientes enviam os produtos para reciclagem em média nove meses depois da compra. Com essa informação, a empresa desenvolveu um mecanismo para incentivá-lo: após nove meses, o cliente é lembrado, via *e-mail*, sobre o programa de reciclagem. Mas os produtos podem durar muito mais e muitas pessoas os mantêm em uso devido ao apego emocional. Nas palavras do entrevistado:

O produto tem um apego emocional. O cliente compra por causa daquela estampa que o representa naquele momento, aí ele envia para a reciclagem para atualizar para outra estampa que representa ele mais ainda naquele momento.

Além deste projeto da reciclagem das carteiras, a empresa conta com outros produtos em seu portfólio desenvolvidos com foco na extensão da vida útil, como a camiseta com bolso trocável, que possui a demarcação em velcro e o cliente troca apenas a estampa do bolso: *“são várias camisetas em uma camiseta só”*. A empresa D leva essa preocupação em conta também no desenvolvimento da embalagem que protege o produto durante o envio, que é reutilizável e assume outras funções. Assim, a embalagem da carteira se torna um cofre, a embalagem do tênis se torna uma mochila feita com rede de pesca retirada do oceano por pescadores aposentados e a embalagem da camiseta se torna um copo.

No que diz respeito ao uso de tecnologias da informação para buscar a circularidade – *Informing* – o entrevistado apontou que utiliza *mock ups* digitais para a apresentação do catálogo de produtos, evitando a necessidade de protótipos físicos:

No início (...) a gente tinha que imprimir uma unidade de cada novo produto, tirar foto e colocar no site. Mesmo com a produção sob demanda, a gente tinha que ter ali pelo menos um produto pronto. E aí com o tempo, a gente desenvolveu o *mock up* digital, um *mock up* 3D (...) que faz com que a gente não precise mais produzir só para tirar foto.

Em relação às dimensões relacionadas ao processo de *design*, pode-se dizer que a empresa D possui uma ampla iniciativa de cocriação, envolvendo muito as partes interessadas no desenvolvimento de produtos e permitindo-as influenciar as tomadas de decisão da empresa. Foi citado que:

A gente envolve muito as pessoas na criação dos produtos (...) A gente tem um espaço exclusivo para o pessoal que interage mais com a gente. Essas pessoas tomam decisões relacionadas a produtos, a lançamento de produtos, elas influenciam em qual produto a gente vai lançar antes ou depois, elas influenciam na modelagem dos produtos, a gente manda protótipos para elas testarem antes de a gente lançar isso no mercado. Antes de prototipar a gente faz pesquisa para entender quais seriam os benefícios que gostariam num produto desse.

Quanto à Comunicação, foi possível notar que a empresa utiliza *cases* como referência e busca também se tornar referência para outras empresas:

Além de a gente usar *cases* como referência e adaptar isso pro contexto que a gente tá, a gente também abre o que a gente faz para que seja exemplo (...) A gente absorve os *cases*, mas a gente também coloca pra fora, pra que outras pessoas também possam beber dessa fonte.

Dessa forma, a partir das pontuações em cada dimensão, obteve-se que a empresa D atua no nível de maturidade 3 – Aplicado, com uma porcentagem relativa a 90%. Como próximos passos para a empresa D atingir um maior nível de maturidade, destacam-se os esforços nas dimensões de Uso de dados no processo de design e Avaliação do Impacto circular dos produtos.

Quanto ao uso de dados, o entrevistado destacou que a empresa analisa possibilidades de incluir mecanismos para rastreabilidade no próprio desenho do produto: “*a gente até comenta aqui de colocar um QR code de alguma forma dentro da carteira que não prejudique a estampa e que a gente possa ter uma rastreabilidade maior dela*”. Já em relação à avaliação do impacto, o entrevistado ressalta que se trata de uma questão de tempo: “*eu colocaria Monitorado se a gente já estivesse operando com a linha de costura. A gente ainda não sabe quanto que essa tonelada do nosso material vai gerar de linha de costura.*”

Por fim, nota-se que a empresa D tem consciência de que direcionamentos deve tomar e adota uma postura inconformista: “*A gente sabe que a gente não vai ser perfeito nunca, mas o importante é a gente vislumbrar esse cenário ideal (...) e usar a força que a empresa tem para poder ser um agente transformador.*”

Feita a apresentação dos resultados teóricos e empíricos, o próximo capítulo desta dissertação é dedicado a discuti-los, mediante a análise comparativa com a literatura.

5 DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas as discussões dos resultados expostos na seção anterior à luz da literatura. Primeiramente, discute-se a relevância da matriz desenvolvida e suas diferenciações frente às ferramentas propostas por outros autores. Na sequência, são debatidos os achados de sua aplicação nas quatro empresas analisadas.

5.1 Análise comparativa com os modelos anteriores

Para a elaboração da matriz de maturidade deste trabalho, aqui denominada Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP, foram considerados diferentes aspectos, como a perspectiva do ciclo de vida de produtos na sequência das dimensões, a divisão das dimensões analisadas em duas categorias: estratégias de *design* e processo de *design*, o uso de representações gráficas, tanto pelo gráfico de barras, quanto pelo gráfico radar, para facilitar a visualização, a avaliação empírica em empresas brasileiras de setores diversos e a verificação de direcionamentos futuros a partir do diagnóstico obtido. Para fins de comparação, o Quadro 20 foi elaborado, mapeando os modelos e matrizes de maturidade levantados na revisão de literatura, em ordem cronológica, que apresentam essas características.

Quadro 20 – Comparativo entre os modelos e matrizes de maturidade

Características	Pigosso, Rozenfeld e McAloone (2013)	Hynds et al. (2014)	Gouvinhas et al. (2016)	Moultrie, Sutcliffe e Maier (2016)	Teixeira e Canciglieri Junior (2019)	Sehnm et al. (2019)
Perspectiva do ciclo de vida de produtos				X		
Divisão das dimensões analisadas	X	X		X	X	X
Representação gráfica	X	X			X	
Avaliação empírica da ferramenta	X	X	X	X	X	X
Prescrições para o direcionamento de esforços	X		X		X	X

Fonte: elaborado pela autora.

Pigosso, Rozenfeld e McAloone (2013) desenvolveram um modelo de maturidade para auxiliar organizações no processo de implementação do *ecodesign*, propondo as práticas e melhorias a serem aplicadas. Uma característica que diferencia este modelo é a formação dos níveis de maturidade pela combinação dos níveis de evolução e dos níveis de capacidade, que avaliam quão bem a organização aplica uma prática de *ecodesign*. Além disso, nota-se que o modelo foca em melhorias de processo sob uma ótica gerencial, e não em melhorias de produto, sob um olhar técnico. Esta premissa também foi considerada para a Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP elaborada neste trabalho. Assim, diferentemente do “*Grid de Maturidade para o design de dispositivos médicos*”, elaborado por Moultrie, Sutcliffe e Maier (2016), o qual busca analisar as características do produto, a Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP aqui elaborada visou a incorporação dos aspectos de gestão, avaliando o processo de desenvolvimento do produto, e não apenas seus atributos e especificações de projeto.

Entretanto, uma semelhança entre a Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP e a proposta de Moultrie, Sutcliffe e Maier (2016) é a busca por atrelar a perspectiva do ciclo de vida do produto à ferramenta. O “*Grid de Maturidade para o design de dispositivos médicos*” na verdade é composto por cinco *grids*, um para cada fase do ciclo de vida do produto: abastecimento de matéria-prima, manufatura e montagem, embalagem e distribuição, uso do produto e fim de vida. Pensando na simplicidade e agilidade de aplicação da matriz de maturidade, neste trabalho optou-se por utilizar somente uma estrutura (um *grid*), mas mantendo a lógica do ciclo do produto na apresentação das dimensões relacionadas às estratégias de *design*, destacando a relevância das decisões tomadas no desenvolvimento do produto para cada fase do ciclo de vida.

Desta forma, na Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP, as duas primeiras dimensões (*narrowing* e *regenerating*) estão associadas às decisões feitas nas fases iniciais, estando relacionadas aos limites fabris. Já a terceira dimensão – *slowing* – engloba as decisões de *design* considerando a fase em que o produto já se encontra no ciclo do consumo, e a quarta dimensão – *closing* – está relacionada à incorporação de preocupações relacionadas ao fim de vida e reinserção no ciclo econômico. A quinta dimensão – *informing* – funciona como suporte às demais, destacando o papel da TI como apoio à circularidade nos diferentes momentos do ciclo de vida do produto.

Similarmente ao modelo desenvolvido por Hynds et al. (2014), o “*IRI Sustainability Maturity Model*”, em que os autores dividiram as dimensões analisadas em duas estratégias

(estratégia e ferramentas de *design*), a Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP também subdivide as dimensões analisadas em duas categorias: estratégias de *design*, englobando aspectos relacionados às abordagens de *Design for X*, e processo de *design*, composta por aspectos gerenciais. Ademais, Hynds et al. (2014) destacam que a ferramenta que desenvolveram abrange aspectos relacionados aos comportamentos, processos e ferramentas utilizadas no desenvolvimento de novos produtos. Na matriz de maturidade proposta, também é possível notar o uso destes três pilares, sendo que as cinco dimensões de estratégia de *design* estão relacionadas às ferramentas e as seis dimensões de processo de *design* estão relacionadas aos procedimentos e às pessoas.

Já no estudo de Sehnem et al. (2019), o foco esteve em analisar os modelos de negócio da EC adotados por empresas brasileiras, identificando as práticas sustentáveis adotadas e o nível de maturidade das empresas. Também foi adotada uma divisão para análise da maturidade, seguindo a tipologia proposta pela Fundação Ellen MacArthur, que separa os ciclos de materiais em técnicos e biológicos. Além disso, na matriz proposta por Sehnem et al. (2019), foram adotados seis níveis de maturidade, do zero ao cinco. Apesar desta diferença, a lógica usada para diferenciar os níveis é semelhante à utilizada na Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP, com destaque para a utilização de indicadores sugerindo uma maior maturidade.

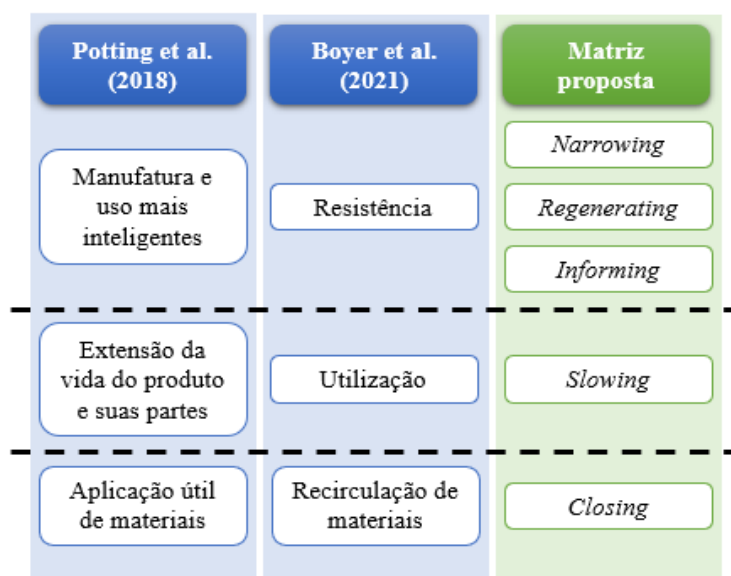
Uma característica interessante do estudo de Sehnem et al. (2019) é a elaboração de uma matriz de correlação entre os níveis de maturidade com as dificuldades, possíveis soluções e *stakeholders* envolvidos na operacionalização da EC, indicando possíveis caminhos a serem traçados pelas empresas para atingir maiores níveis de maturidade. Essa preocupação em destacar quais esforços devem ser priorizados a partir do diagnóstico do nível de maturidade também esteve presente no *framework* proposto por Gouvinhas et al. (2016) para avaliação da maturidade de empresas ao implementarem ferramentas do *ecodesign*, em que os autores discutem os requisitos mínimos que necessitam ser atendidos para a mudança de um nível a outro. Na Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP, optou-se por não acrescentar estas informações, mas sim promover a discussão dos próximos passos a serem tomados pela empresa para atingir maiores níveis de maturidade a partir da identificação das dimensões que obtiveram as menores pontuações.

Essa sistemática está de acordo com a proposta de Teixeira e Cancigliieri Junior (2019), em seu método para guiar e facilitar a integração da sustentabilidade ao PDP. Além da fase de diagnóstico do nível de maturidade (reconhecimento), há também um estágio prescritivo, com a elaboração e comunicação de um plano de ação. Entretanto, destaca-se que, apesar de

promover a reflexão dos pontos que necessitam de atenção e quais dimensões devem ser priorizadas, a Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP não compreende o acompanhamento dos resultados, correspondente à Fase IV do *roadmap* para desenvolvimento de matrizes de maturidade proposto por Maier, Moultrie e Clarkson (2012), relativa à manutenção de um banco de dados dos resultados e sua utilização para *benchmarking*.

Dessa forma, buscou-se evidenciar na matriz elaborada as principais distinções entre o *design* de produtos circulares (DPC) e as propostas anteriores, como o *ecodesign*. Anteriormente, as abordagens que tratavam do *design* para a sustentabilidade consideravam o desenvolvimento de produtos como parte de um sistema linear de manufatura. O DPC, por sua vez, apresenta o princípio chave de manter o valor dos produtos ao longo do tempo, com a preservação do capital natural e evitando ao máximo a extração de matéria-prima virgem da natureza. Assim, as cinco dimensões de estratégias de *design* que compõem a matriz de maturidade estão alinhadas com as propostas de Potting et al. (2018) (Figura 10) e Boyer et al. (2021) (Figura 8), enfatizando tais particularidades do DPC, conforme ilustra a Figura 34.

Figura 34 – Alinhamento das dimensões propostas com as particularidades do DPC



Fonte: elaborada pela autora.

Ainda em relação aos aspectos que distinguem o DPC, de acordo com McAloone e Pigosso (2017), o nível operacional concentra as decisões tomadas para a implementação do *ecodesign*. Já no contexto da EC, as decisões para sua adoção permeiam o nível estratégico. Essa distinção também ficou clara na Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP,

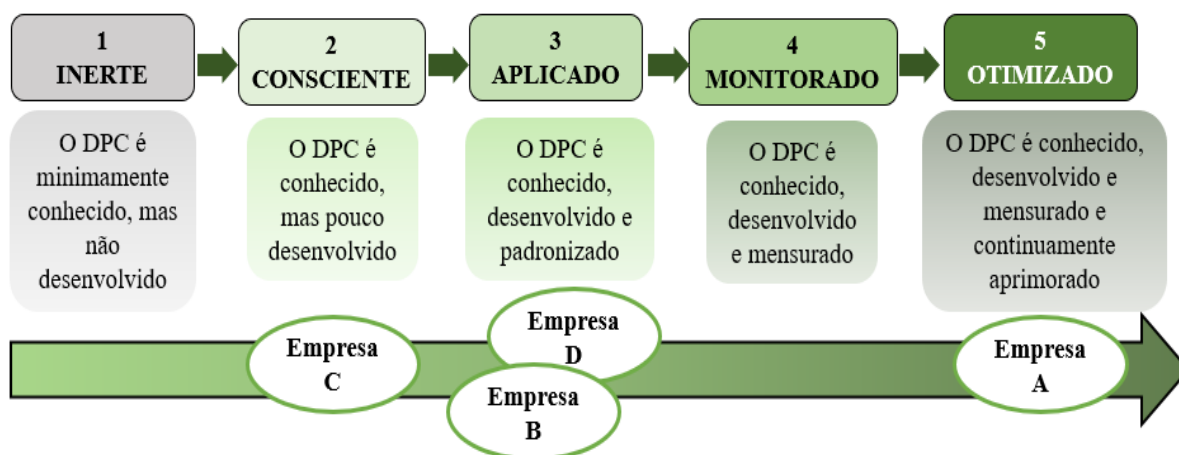
especialmente com relação às dimensões de Adoção de modelos de negócios circulares e Colaboração para a EC.

Além disso, um outro aspecto que diferencia o DPC do *ecodesign* é a premissa de que os consumidores se sensibilizam com o conceito de EC, como defendem Selvfors et al. (2019). Andrews (2015) também chama a atenção para o elo entre o comportamento do consumidor e as práticas de extensão da vida útil dos produtos. Essa consideração foi incorporada à matriz nas dimensões Engajamento Circular do usuário e Comunicação para a EC, levando em conta o direcionamento apontado por Wastling, Charnley e Moreno (2018) de que cada vez mais é necessário projetar produtos que atendam, ao mesmo tempo, requisitos circulares e desejos do consumidor.

5.2 Análise e interpretação dos resultados empíricos

Dentre as empresas analisadas, a classificação em relação aos maiores níveis de maturidade obtidos é dada por $A > D > B > C$, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Classificação geral das empresas em relação aos níveis de maturidade



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da análise das respostas dos entrevistados, o Quadro 21 foi elaborado, sintetizando as principais abordagens de *design* apontadas por cada empresa. Nota-se uma predominância das estratégias Slowing e Closing, em consonância com os resultados obtidos na revisão sistemática de literatura.

Quadro 21 – Principais abordagens de *Design* apontadas pelas empresas

	Abordagens	Empresa A	Empresa B	Empresa C	Empresa D
<i>Narrowing</i>	<i>Design</i> de produtos de baixo peso	X		X	
	<i>Design</i> com foco em melhorias no processo produtivo				X
<i>Regenerating</i>	<i>Design</i> com materiais não tóxicos				X
<i>Slowing</i>	<i>Design</i> para a durabilidade física	X		X	
	<i>Design</i> para a durabilidade emocional				X
	<i>Design</i> para a facilidade de manutenção e reparo			X	
	<i>Design</i> para a padronização e compatibilidade			X	
<i>Closing</i>	<i>Design</i> com materiais reciclados	X	X		X
	<i>Design</i> com materiais recicláveis	X			X
	<i>Design</i> com apenas um material		X		
<i>Informing</i>	<i>Design</i> de produtos conectados	X			
	<i>Design</i> para a otimização				X

Fonte: elaborado pela autora.

Notou-se que na empresa A, ranqueada no nível de maturidade 5, a busca por ser mais circular está intrinsicamente atrelada à cultura organizacional da empresa, sendo um critério que guiou a elaboração de sua estratégia de posicionamento desde sua fundação. Nesse sentido, observa-se um alinhamento com os achados de Sehnem et al. (2019) de que a consolidação da EC tende a ser facilitada no contexto organizacional que desde o nascimento integra a sustentabilidade aos seus valores e forma de atuação.

Uma percepção encontrada na pesquisa é a de que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi a principal ferramenta citada na análise das dimensões relacionadas ao uso de dados e avaliação do impacto circular. Na empresa A, uma empresa parceira realiza as análises, por meio das quais consegue reconhecer as fases responsáveis pelos maiores impactos. Já a empresa B se destacou com uma consolidada e reconhecida experiência com a ferramenta, adotando-a como uma das bases de sua própria metodologia de desenvolvimento de produtos.

Outro ponto significativo encontrado é o de que as quatro empresas analisadas apresentam projetos para a gestão dos produtos em fim de vida atrelada a um sistema de recompensa, geralmente correspondente a descontos em próximas compras. As empresas A e

D utilizam o sistema de correios para a devolução dos produtos, enquanto as empresas B e C possuem parcerias com outras empresas.

Em relação à adoção de modelos de negócio circulares, o estudo mostrou que as empresas B e C, que operam no modelo *business to business* (B2B), tiveram certa dificuldade na classificação desta dimensão, fazendo ponderações relacionadas aos limites de seus modelos de negócio e os modelos de negócio de seus clientes. A empresa B, fornecedora de matéria-prima para outras empresas, pontuou que a análise da congruência entre seu modelo de negócio e o *design* de seu produto não é algo trivial justamente pelo fato de que o produto que fabrica ainda é uma matéria-prima que será transformada. Já a empresa C citou a necessidade de atribuir certa flexibilidade no processo de desenvolvimento de seu produto para se adequar aos diferentes modelos de negócio de seus clientes.

Essa necessidade de contemporização está de acordo com a posição adotada por Panizzolo, Biazzo e Garengo (2010), ao defenderem que a elaboração de uma ferramenta de avaliação do PDP deve seguir uma lógica de coerência, estando relacionada à avaliação do alinhamento de práticas e sendo flexível mediante as condições do contexto. Dessa forma, ao analisar o *framework* proposto por estes autores (Quadro 10), é possível afirmar que a Matriz de Maturidade da Integração da EC no PDP pode ser classificada como pertencente à Abordagem Contingencial, tendo em vista que se configura como um guia para análise das relações entre os aspectos circunstanciais e os atributos da organização. Quanto ao nível de abstração, nota-se que a matriz desenvolvida pressupõe o julgamento dos avaliadores, com subjetividade moderada.

Finalmente, foi possível observar que cada vez mais o comportamento do consumidor tem adentrado as discussões de desenvolvimento do produto. Na empresa B, por exemplo, há a preocupação em engajar o consumidor desde o início, tendo em vista que a metodologia de desenvolvimento de produtos da empresa integra a jornada do produto à jornada do consumidor. Já na empresa D, o *design* para a durabilidade contempla tanto a esfera física quanto a emocional, e a solução desenvolvida para os produtos em fim de vida visa gerar consciência no consumidor de que a empresa se responsabiliza e está atenta ao que acontece com o seu produto após o ciclo do consumo.

6 CONCLUSÕES

Esta seção encerra este trabalho com a síntese dos principais resultados obtidos, bem como suas implicações teóricas e gerenciais. Por fim, as limitações inerentes a este estudo são apresentadas, juntamente com os direcionamentos e sugestões para pesquisas futuras.

6.1 Principais resultados obtidos

Em resposta às questões de pesquisa (i) “*Como empresas podem incorporar gradativamente as práticas, métodos e ferramentas da EC em seu PDP?*” e ii) “*Como avaliar a intensidade dessa integração da EC no PDP destas empresas?*”, o propósito deste trabalho foi propor uma matriz de maturidade para avaliar a integração de práticas, métodos e ferramentas da EC no PDP de empresas. Para alcançar esse objetivo, o desenvolvimento teórico foi combinado ao empírico, em um aprimoramento iterativo da ferramenta.

Inicialmente, o primeiro objetivo específico desta pesquisa, relacionado à sistematização do conhecimento sobre o assunto e identificação das estratégias de *design* propostas pelo DPC, foi satisfeito a partir da revisão sistemática de literatura conduzida, a qual permitiu o mapeamento de 30 abordagens de *design* classificadas de acordo com a respectiva estratégia circular identificada. Esse agrupamento foi então utilizado para formar a versão inicial da matriz, a partir da correlação entre os níveis de maturidade estabelecidos e as dimensões de análise levantadas, cumprindo o segundo objetivo específico.

Na sequência, visando atingir o terceiro objetivo específico, correspondente à verificação da consistência e robustez da ferramenta desenvolvida, a matriz foi avaliada por seis acadêmicos especialistas, que examinaram atributos como a coerência, a abrangência, a clareza e a robustez, indicando as oportunidades de melhoria. Com base no *feedback* dos especialistas, a matriz foi novamente aprimorada. Entre as sugestões implementadas, destacam-se a ordem de apresentação das dimensões, na tentativa de incorporar uma perspectiva do ciclo de vida do produto e a inclusão de exemplos de abordagens de *design* no nível 3, mediana da escala desenvolvida.

Dessa forma, para finalmente cumprir o quarto objetivo específico, relacionado à avaliação da utilidade e usabilidade da ferramenta, essa segunda versão da matriz foi apresentada a profissionais de quatro empresas brasileiras de diferentes setores, verificando sua

utilidade em contextos empresariais reais. Além de realizar o diagnóstico da maturidade das empresas analisadas, com a compreensão do modo como estas organizações estão estrategicamente articuladas para a integração da EC ao PDP, solicitou-se aos entrevistados o apontamento de incrementos na matriz, de acordo com suas percepções. Como alterações, as duas primeiras dimensões da matriz (*Narrowing* e *Regenerating*) foram desvinculadas. Além disso, foram verificadas possíveis redundâncias, buscando pela objetividade. Por fim, incluiu-se a abordagem de *design* para o comportamento circular, indicando a tendência de atenção cada vez maior ao comportamento do consumidor atrelado às premissas circulares.

6.2 Implicações teóricas e gerenciais

Este estudo traz implicações teóricas e gerenciais. Para a academia, preenche uma importante lacuna na literatura, sendo o primeiro estudo que apresenta uma matriz de maturidade para a integração da EC ao PDP, com aplicações práticas em empresas do Brasil. A revisão sistemática de literatura conduzida permitiu a sistematização e categorização de abordagens de *design* em diferentes estratégias circulares, incorporando também aspectos relacionados ao gerenciamento deste processo. Foi possível identificar cinco dimensões de estratégias de *design*: *narrowing* – usar menos, *regenerating* – produzir de forma limpa, *slowing* – usar por mais tempo, *closing* – usar de novo e *informing* - usar a TI para buscar a circularidade. Já em relação às dimensões relacionadas ao processo de *design*, foram considerados o uso de dados, a avaliação do impacto circular, a adoção do modelo de negócio circular, o engajamento dos usuários e a comunicação e colaboração para a EC.

Além disso, buscou-se destacar na matriz os avanços propostos pelo DPC em relação a abordagens anteriores, como o *ecodesign*. Como principais distinções, é possível salientar a busca pelo distanciamento do modelo linear, ao se optar por evitar ao máximo utilizar matéria-prima virgem e estender o valor dos produtos ao longo do tempo. Destaca-se também a concentração das decisões a nível estratégico, englobando não apenas um departamento, mas sim demandando a adoção de uma visão mais abrangente e congruente ao modelo de negócios adotado. Por fim, buscou-se ressaltar na matriz, nas dimensões referentes ao engajamento circular e nas abordagens de *design* para a durabilidade emocional e *design* para o comportamento circular, a particularidade do DPC relativa à consideração de que os consumidores estão cada vez mais atentos à necessidade de desacoplar o crescimento econômico do consumo desenfreado de recursos.

A aplicação prática da matriz nas quatro empresas permitiu identificar que as estratégias *Slowing* e *Closing* estão mais consolidadas, em consonância com os resultados obtidos na revisão sistemática de literatura. Ademais, apesar das citadas diferenças entre o DPC e o *ecodesign*, foi possível notar a continuidade da ACV, comum no *ecodesign*, como a principal ferramenta adotada pelas empresas para avaliação do impacto de seus produtos. Nesse sentido, nota-se a necessidade de incorporar no PDP das empresas novos indicadores que a literatura tem se esforçado em propor, tais como fator de substituição de materiais virgens e o indicador de durabilidade do material, por exemplo. Esta iniciativa pode auxiliar as organizações a alcançarem maiores níveis de maturidade, além de colocar em prática o Princípio da Inércia, em que se apoia o DPC.

Em termos práticos, os resultados obtidos neste trabalho podem auxiliar diferentes profissionais, como gerentes de produto, analistas de produto, gerentes de portfólio, coordenadores de P&D, gerentes de sustentabilidade e *designers* a compreenderem de que maneira é possível incorporar a EC ao PDP de forma gradativa. A matriz proposta pode ser entendida como uma ferramenta analítica, tendo como objetivo primeiro possibilitar que a organização possa identificar o *status* atual em que se encontra e utilizar esse diagnóstico como motivação para buscar maiores níveis de maturidade, por meio de uma perspectiva de melhoria contínua. Assim, é possível concluir que a aplicação da matriz de maturidade pode fornecer às organizações o reconhecimento do nível de maturidade em que atua, a verificação das forças e fraquezas em relação à integração da EC ao PDP e aumento da consciência em relação à EC dos profissionais envolvidos com o desenvolvimento de produtos, promovendo reflexões e discussões e fomentando o aprendizado organizacional.

6.3 Limitações da pesquisa e direcionamentos futuros

Esta pesquisa também apresenta limitações inerentes aos métodos empregados. Em relação à revisão sistemática de literatura, as palavras-chave escolhidas e o banco de dados selecionado limitam moderadamente os resultados encontrados. Além disso, nota-se que os resultados obtidos não podem ser generalizados, pois estão baseados nas perspectivas de quatro empresas de determinados setores industriais, em apenas um país (*single-country*). Quanto à aplicação nas empresas, é possível observar que em duas empresas as entrevistas foram realizadas com apenas um profissional, enquanto nas outras duas, dois profissionais de diferentes setores foram consultados. Ademais, ressalta-se que a Fase 4 do roteiro adotado como

guia para a elaboração da matriz, conforme proposto por Maier, Moutrie e Clarkson (2012), que pressupõe o acompanhamento de resultados e *benchmarking*, não foi contemplada nesta pesquisa de mestrado.

Como consequências das limitações citadas, entende-se que pesquisas futuras podem contribuir para o aprimoramento da matriz, tanto na fase teórica, quanto na prática. Para o aprimoramento teórico, sugere-se a atualização da revisão de literatura, incluindo a consulta a outras bases de dados, como a *Web of Science* e o *Google Scholar*, visando expandir o número de dimensões analisadas ou até mesmo examinando a possibilidade de incluir novos exemplos de abordagens, ainda que prezando pela objetividade e simplicidade da matriz. Já sob a ótica empírica, uma sugestão é a tentativa de investigar como se dá a implementação de melhorias a partir do diagnóstico do nível de maturidade, colocando em prática a Fase 4 do roteiro. Uma possível abordagem metodológica para isso poderia ser a pesquisa-ação. Além disso, recomenda-se que pesquisas futuras conduzam a aplicação da matriz em outros setores industriais e em outros países, adotando uma perspectiva *cross-country*. Por fim, recomenda-se para pesquisas futuras a verificação de quais modificações poderiam ser feitas na matriz para torná-la uma ferramenta autoavaliativa, ou seja, podendo ser aplicada pelas próprias empresas. Esse esforço poderia abrir caminhos para a realização de pesquisas multi-método, englobando as abordagens qualitativa e quantitativa.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, L. Design for Product Care: Enhancing Consumers' Repair and Maintenance Activities. **The Design Journal**, v. 21, n. 4, p. 543-551, 2018.
- ALBÆK, J. et al. Circularity evaluation of alternative concepts during early product design and development. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9353, 2020.
- ALMEIDA, S.; BORSATO, M.; UGAYA, C. Application of exergy-based approach for implementing design for reuse: The case of microwave oven. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 876-892, 2017.
- ANDREWS, D. The circular economy, design thinking and education for sustainability. **Local Economy**, v. 30, n. 3, p. 305-315, 2015.
- ARCOS, B. et al. Practices of fault diagnosis in household appliances: Insights for Design. **Journal of Cleaner Production**, p. 121812, 2020.
- ASIF, F. et al. A methodological approach to Design products for multiple lifecycles in the context of circular manufacturing systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, p. 126534, 2021.
- ATLASON, R.; 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**, v. 168, p. 1059-1069, 2017.
- BABUSKA, I.; ODEN, J. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 193, n. 36, p. 4057-4066, 2004.
- BAKKER, C. et al. Products that go round: exploring product life extension through Design. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 10-16, 2014.
- BAKKER, C.; BALKENENDEAND, R.; POPPELAARS, F. Design for product integrity in a Circular Economy. In: CHARTER, M. (Ed.). **Designing for the circular economy**. Routledge, 2018.
- BECH, N. et al. Evaluating the environmental performance of a product/service-system business model for Merino Wool Next-to-Skin Garments: The case of Armadillo Merino®. **Sustainability**, v. 11, n. 20, p. 5854, 2019.
- BELHADJ, I. et al. Time computing technique for wear parts dismantling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 9-12, p. 3513-3527, 2019.
- BITITCI, U. et al. Value of maturity models in performance measurement. **International journal of production research**, v. 53, n. 10, p. 3062-3085, 2015.
- BOCKEN, N. et al. Product Design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BOCKEN, N. et al. Taking the circularity to the next level: a special issue on the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 476-482, 2017.

BOVEA, M. et al. Options for labelling circular products: Icon Design and consumer preferences. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1253-1263, 2018a.

BOVEA, M. et al. Incorporation of circular aspects into product Design and labelling: consumer preferences. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2311, 2018b.

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

BOYER, R. et al. Three-dimensional product circularity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, p. 824-833, 2021.

BRUNDAGE, M. et al. Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 877-892, 2018.

CARVALHO, M. Maturidade em gestão de projetos. In: JUGEND, D.; BARBALHO, S.; SILVA, S. (Org.) **Gestão de Projetos: teoria, prática e tendências**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

CASTELO-BRANCO, I.; CRUZ-JESUS, F.; OLIVEIRA, T. Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. **Computers in Industry**, v. 107, p. 22-32, 2019.

CAYZER, S; GRIFFITHS, P.; BEGHETTO, V. Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 10, n. 4-5, p. 289-298, 2017.

CHEN, C. Improving Circular Economy Business Models: Opportunities for Business and Innovation. **Johnson Matthey Technology Review**, 2020.

CHRISSIS, M.; KONRAD, M.; SHRUM, S. CMMI: **Guidelines for Process Integration and Product Improvement**. Pensilvânia, EUA: SEI Software Engineering Institute Addison-Wesley, 2003.

COOPER, D. et al. The potential for material circularity and independence in the US steel sector. **Journal of Industrial Ecology**, 2020.

CROSBY, P. **Qualidade é investimento**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1994.

DANGELICO, R. What drives green product development and how do different antecedents affect market performance? A survey of Italian companies with eco-labels. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, n. 8, p. 1144-1161, 2017.

DANGELICO, R.; PONTRANDOLFO, P. From green product definitions and classifications to the Green Option Matrix. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 16-17, p. 1608-1628, 2010.

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

den HOLLANDER, M.; BAKKER, C.; HULTINK, E. Product Design in a circular economy: Development of a typology of key concepts and terms. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 517-525, 2017.

DESING, H.; BRAUN, G.; HISCHIER, R. Resource pressure—a circular Design method. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105179, 2021.

DIAS, V. Práticas de Economia Circular aplicáveis no processo de desenvolvimento de produtos aeronáuticos: proposição teórica e avaliações em empresas. **Dissertação (Mestrado em Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP**, Bauru, 2019.

DIAZ, A. et al. Sustainable product development in a circular economy: implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. **Sustainable Production and Consumption**, 2021.

DOKTER, G.; THUVANDER, L.; RAHE, U. How circular is current Design practice? Investigating perspectives across industrial Design and architecture in the transition towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 692-708, 2021.

ELIA, V.; GNONI, M.; TORNESE, F. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2741-2751, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe, 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition. **Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK**, 2013.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up Across Global Supply Chains—Executive summary (No. vol. 3). **World Economic Forum; McKinsey & Company**, 2014.

EPPINGER, S.; ULRICH, K. **Product Design and development**. McGraw-Hill Higher Education, 2015.

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

FERNANDES, S. et al. Towards product-service system oriented to circular economy: A systematic review of value proposition Design approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120507, 2020

- FERRADAZ, C. et al. Organizational Maturity Models: Trends for the Future. In: **Occupational and Environmental Safety and Health II**. Springer, Cham, 2020. p. 667-675.
- FLOOD, M. et al. Glass Fines: A review of cleaning and up-cycling possibilities. **Journal of Cleaner Production**, p. 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.
- FRANCO, M. A system dynamics approach to product Design and business model strategies for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118327, 2019.
- FRANCO, M. Circular economy at the micro level: A dynamic view of incumbents' struggles and challenges in the textile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 833-845, 2017.
- FRANZOSI, L.; ESTORILIO, C. Relationship between PDP maturity and ISO certification in the food industry. **Gestão & Produção**, v. 26, n. 4, 2019.
- GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017.
- GENG, Y. et al. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, n. 1, p. 216-224, 2012.
- GENG, Y.; DOBERSTEIN, B. Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development'. **The International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 15, n. 3, p. 231-239, 2008.
- 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**, v. 114, p. 11-32, 2016.
- GHISELLINI, P.; ULGIATI, S. Circular economy transition in Italy. Achievements, perspectives and constraints. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118360, 2020.
- GOLEV, A.; CORDER, G.; GIURCO, D. Barriers to industrial symbiosis: Insights from the use of a maturity grid. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 1, p. 141-153, 2015.
- GOUVINHAS, R. et al. A proposed framework of sustainable self-evaluation maturity within companies: an exploratory study. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 10, n. 3, p. 319-327, 2016.
- 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, 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**, v. 60, n. 5, p. 729-740, 2018.

GUSMEROTTI, N. et al. Drivers and approaches to the circular economy in manufacturing firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 314-327, 2019.

HAINES-GADD, M. et al. Emotional durability Design nine—A tool for product longevity. **Sustainability**, v. 10, n. 6, p. 1948, 2018.

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

HANNULA, J. et al. Property-based modelling and simulation of mechanical separation processes using dynamic binning and neural networks. **Minerals Engineering**, v. 126, p. 52-63, 2018.

HARZING, A.; ALAKANGAS, S. Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. **Scientometrics**, v. 106, n. 2, p. 787-804, 2016.

HAZIRI, L.; SUNDIN, E. Supporting Design for remanufacturing-A framework for implementing information feedback from remanufacturing to product Design. **Journal of Remanufacturing**, p. 1-20, 2019.

HELGESSION, Y.; HÖST, M.; WEYNS, K. A review of methods for evaluation of maturity models for process improvement. **Journal of Software: Evolution and Process**, v. 24, n. 4, p. 436-454, 2012.

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**, v. 35, n. 4, p. 367-378, 2017.

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

HOMRICH, A. et al. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 525-543, 2018.

HOWARD, M.; HOPKINSON, P.; MIEMCZYK, J. The regenerative supply chain: a framework for developing circular economy indicators. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 23, p. 7300-7318, 2019.

HYNDS, E. et al. A maturity model for sustainability in new product development. **Research-Technology Management**, v. 57, n. 1, p. 50-57, 2014.

JABBOUR, A. et al. Circular economy business models and operations management. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 1525-1539, 2019.

JABBOUR, C. et al. Stakeholders, innovative business models for the circular economy and sustainable performance of firms in an emerging economy facing institutional voids. **Journal of Environmental Management**, v. 264, p. 110416, 2020.

JUGEND, D. et al. Building Circular Products in an Emerging Economy: An Initial Exploration Regarding Practices, Drivers and Barriers. **Johnson Matthey Technology Review**, 2020.

JULIANELLI, V. et al. Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 158, p. 104784, 2020.

KADDOURA, M. et al. Is Prolonging the Lifetime of Passive Durable Products a Low-Hanging Fruit of a Circular Economy? A Multiple Case Study. **Sustainability**, v. 11, n. 18, p. 4819, 2019.

KANE, G.; BAKKER, C.; BALKENENDE, A. R. Towards Design strategies for circular medical products. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 38-47, 2018.

KHOSHGOFTAR, M.; OSMAN, O. Comparison of maturity models. In: **2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology**. IEEE, p. 297-301, 2009.

KJAER, L. et al. Product/service-systems for a circular economy: the route to decoupling economic growth from resource consumption?. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 22-35, 2019.

KONIETZKO, J.; BOCKEN, N.; HULTINK, E. A tool to analyze, ideate and develop circular innovation ecosystems. **Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 417, 2020.

KORHONEN, J. et al. Circular economy as an essentially contested concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 544-552, 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**, v. 7, n. 3, p. 1688-1707, 2020.

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

KUWAMOTO, P. et al. Modelos de Maturidade em Gerenciamento de Projetos - uma análise crítica. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2009, Salvador. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2009. v. 1.

LEAL, J. et al. Design for and from recycling: A circular ecoDesign approach to improve the circular economy. **Sustainability**, v. 12, n. 23, p. 9861, 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**, v. 151, p. 104462, 2019.

LINDER, M.; SARASINI, S.; VAN LOON, P. A metric for quantifying product-level circularity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 545-558, 2017.

LINDER, M.; WILLIANDER, M. Circular business model innovation: inherent uncertainties. **Business strategy and the environment**, v. 26, n. 2, p. 182-196, 2017.

LINKEDIN CORPORATION. **Sobre o LinkedIn**. Disponível em: <https://about.linkedin.com/pt-br?lr=1>. Acesso em 12 ago. 2021

LU, Y. et al. Internet of Things: A systematic review of the business literature from the user and organisational perspectives. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 136, p. 285-297, 2018.

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

LUIZ, J. et al. EcoDesign field of research throughout the world: mapping the territory by using an evolutionary lens. **Scientometrics**, v. 109, n. 1, p. 241-259, 2016.

MAIER, A.; MOULTRIE, J.; CLARKSON, J. Assessing Organizational Capabilities: Reviewing and Guiding the Development of Maturity Grids. **IEEE Transactions on Engineering Management**. v 59, n 1, 2012.

MANDOLINI, M. et al. 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**, v. 95, n. 1-4, p. 409-430, 2018.

MAROPOULOS, P.; CEGLAREK, D. Design verification and validation in product lifecycle. **CIRP annals**, v. 59, n. 2, p. 740-759, 2010.

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

MCDOWALL, W. et al. Circular economy policies in China and Europe. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 651-661, 2017.

MENDONÇA, A. et al. Hierarchical modeling of the 50 largest economies to verify the impact of GDP, population and renewable energy generation in CO2 emissions. **Sustainable Production and Consumption**, v. 22, p 58-67, 2020.

MENDOZA, J. et al. Integrating backcasting and eco-Design for the circular economy: The BECE framework. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 526-544, 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**, v. 196, p. 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**, v. 160, p. 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.

MILIOS, L. et al. Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis. **Waste Management**, v. 76, p. 180-189, 2018.

MOBIN, M. et al. An approach for design Verification and Validation planning and optimization for new product reliability improvement. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 190, p. 106518, 2019.

MORENO, M. et al. A conceptual framework for circular Design. **Sustainability**, v. 8, n. 9, p. 937, 2016.

MOULTRIE, J.; SUTCLIFFE, L.; MAIER, A. A maturity grid assessment tool for environmentally conscious Design in the medical device industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 122, p. 252-265, 2016.

NASCIMENTO, T. et al. Fatores que contribuem para a maturidade em gerenciamento de projetos: o caso de um governo estadual. **R. Adm.**, São Paulo, v.49, n.2, p.415-428, 2014.

NASR, N. et al. Re-defining Value—The Manufacturing Revolution. Remanufacturing, Refurbishment, Repair and Direct Reuse in the Circular Economy. **International Resource Panel**: Nairobi, Kenya, 2018.

NIERO, M.; OLSEN, S. Circular economy: to be or not to be in a closed product loop? A Life cycle assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 114, p. 18-31, 2016.

NIU, S.; ZHUO, H.; XUE, K. DfRem-driven closed-loop supply chain decision-making: A systematic framework for modeling research. **Sustainability**, v. 11, n. 12, p. 3299, 2019.

OHDE, C. (Org.). **Economia circular: um modelo que dá impulso à economia, gera empregos e protege o meio ambiente**. Editora Netpress Books, São Paulo – SP, Brasil, 2018.

PACCHINI, A. et al. The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. **Computers in Industry**, v. 113, p. 103125, 2019.

PANIZZOLO, R.; BIAZZO, S.; GARENGO, P. New product development assessment: towards a normative-contingent audit. **Benchmarking: An International Journal**, 2010.

PARAJULY, K. et al. Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU. **Resources, Conservation & Recycling**: X, p. 100035, 2020.

PARAJULY, K.; WENZEL, H. Product family approach in e-waste management: a conceptual framework for circular economy. **Sustainability**, v. 9, n. 5, p. 768, 2017.

PIGOSSO, D. EcoDesign maturity model: a framework to support companies in the selection and implementation of ecoDesign practices. **Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, São Carlos, 2012.

PIGOSSO, D.; ROZENFELD, H.; MCALOONE, T. EcoDesign maturity model: a management framework to support ecoDesign implementation into manufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 160-173, 2013.

PINHEIRO, M. et al. Framework proposal for ecoDesign integration on product portfolio management. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 176-186, 2018.

PINHEIRO, M. et al. The role of new product development in underpinning the circular economy: a systematic review and integrative framework. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 840-862, 2019.

POLTRONIERI, C. Relação entre maturidade dos sistemas de gestão integrados e desempenho sustentável. **Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, São Carlos, 2018

POTTING, J. et al. Circular economy: measuring innovation in the product chain. Policy report. **PBL Netherlands Environmental Assessment agency**, 2017.

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605-615, 2018.

RABECHINI JR, R.; PESSÔA, M. Um modelo estruturado de competências e maturidade em gerenciamento de projetos. **Production**, v. 15, n. 1, p. 34-43, 2005.

RAGAERT, K. et al. Upcycling of contaminated post-industrial polypropylene waste: A Design from recycling case study. **Polymer Engineering & Science**, v. 58, n. 4, p. 528-534, 2018.

RAZZA, F. et al. Metrics for quantifying the circularity of bioplastics: The case of bio-based and biodegradable mulch films. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 159, p. 104753, 2020.

REIS, T. Proposta de matriz de maturidade para avaliação de elementos relativos à gestão ambiental em empresas industriais. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP**, Guaratinguetá, 2016.

RICHTER, J.; TÄHKÄMÖ, L.; DALHAMMAR, C. Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 195-209, 2019.

RITZÉN, S.; SANDSTRÖM, G. Barriers to the Circular Economy—integration of perspectives and domains. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 7-12, 2017.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

RUIZ-PASTOR, L. et al. Effect of the application of circularity requirements as guided questions on the creativity and the circularity of the Design outcomes. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 124758, 2021.

SARKIS, J.; DOU, Y. **Green supply chain management: A concise introduction**. Routledge, 2017.

SASSANELLI, C. et al. Circular Economy performance assessment methods: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 440-453, 2019.

SASSANELLI, C. et al. Addressing circular economy through Design for X approaches: A systematic literature review. **Computers in industry**, v. 120, p. 103245, 2020.

SAUERWEIN, M. et al. Exploring the potential of additive manufacturing for product Design in a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 1138-1149, 2019.

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

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia Cirp**, v. 52, p. 161-166, 2016.

SEHNEM, S. et al. Circular business models: level of maturity. **Management Decision**, 2019.

SELVEFORS, A. et al. Use to use—A user perspective on product circularity. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 1014-1028, 2019.

SENAI-SP – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Design e economia circular = Diseño y economía circular. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2020.

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

SIHVONEN, S.; PARTANEN, J. Eco-Design practices with a focus on quantitative environmental targets: An exploratory content analysis within ICT sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 769-783, 2017.

SINCLAIR, M. et al. Consumer intervention mapping—A tool for Designing future product strategies within circular product service systems. **Sustainability**, v. 10, n. 6, p. 2088, 2018.

SINGH, J. et al. Evaluating approaches to resource management in consumer product sectors—An overview of global practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 218-237, 2019.

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.

SOUSA-ZOMER, T. et al. Cleaner production as an antecedent for circular economy paradigm shift at the micro-level: evidence from a home appliance manufacturer. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 740-748, 2018.

STAMMINGER, R. et al. Durability of washing machines under real life conditions: Definition and application of a testing procedure. **Journal of Cleaner Production**, p. 121222, 2020.

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGINGER, M. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. **Resources, Conservation & Recycling: X**, v. 6, p. 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**, v. 27, n. 7, p. 1005-1022, 2018.

SU, B. et al. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 215-227, 2013.

SUBRAMANIAN, N. et al. Role of traditional Chinese philosophies and new product development under circular economy in private manufacturing enterprise performance. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 23, p. 7219-7234, 2019.

SUMTER, D. et al. Key competencies for Design in a circular economy: Exploring gaps in Design knowledge and skills for a circular economy. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 776, 2021.

SUMTER, D. et al. Circular economy competencies for Design. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1561, 2020.

SUMTER, D.; BAKKER, C.; BALKENENDE, R. The role of product Design in creating circular business models: A case study on the lease and refurbishment of baby strollers. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2415, 2018.

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**, v. 21, n. 3, p. 731-741, 2017.

TEIXEIRA, G.; CANCELIERI JUNIOR, O. How to make strategic planning for corporate sustainability?. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 1421-1431, 2019.

TOLEDO, J.; SIMÕES, J. Gestão do desenvolvimento de produto em empresas de pequeno e médio porte do setor de máquinas e implementos agrícolas do Estado de SP. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 2, p. 257-269, 2010.

TUNN, V. et al. Making Ours Mine: Increasing Consumer Acceptance of Access-Based PSS through Temporary Product Customisation. **Sustainability**, v. 11, n. 1, p. 274, 2019.

UNITED NATIONS (UN), Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2013). World Population Prospects: **The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables**. Working Paper No. ESA/P/WP.228. Disponível em https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2012_HIGHLIGHTS.pdf
Acesso em: 19 jan. 2020

URBINATI, A; CHIARONI, D.; TOLETTI, G. Managing the Introduction of Circular Products: Evidence from the Beverage Industry. **Sustainability**, v. 11, n. 13, p. 3650, 2019.

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

VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. **Scientometrics**, v. 111, n. 2, p. 1053-1070, 2017.

VANEGAS, P. et al. Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 323-334, 2018.

WASTLING, T.; CHARNLEY, F.; MORENO, M. Design for circular behaviour: Considering users in a circular economy. **Sustainability**, v. 10, n. 6, p. 1743, 2018.

WEETMAN, C. **Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa**. Tradução de Afonso Celso da Cunha Serra. 1. ed. São Paulo: Autêntica Business, 2019.

YUAN, Z.; BI, J.; MORIGUICHI, Y. The circular economy: A new development strategy in China. **Journal of Industrial Ecology**, v. 10, n. 1-2, p. 4-8, 2006.

ZOUBEK, M. et al. Industry 4.0 Maturity Model Assessing Environmental Attributes of Manufacturing Company. **Applied Sciences**, v. 11, n. 11, p. 5151, 2021.

APÊNDICE A - Carta convite enviada aos especialistas por e-mail

Olá! Primeiramente, deixe-me fazer uma breve apresentação. Meu nome é Marina Fernandes Aguiar, sou graduada em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual Paulista (UNESP, *campus* Bauru), e atualmente sou aluna de mestrado em Engenharia de Produção nesta mesma universidade. Meu orientador é o professor Daniel Jugend.

Durante nosso processo de pesquisa, notamos que na literatura existem modelos e matrizes de maturidade em áreas como a gestão do processo de desenvolvimento de produtos (PDP), gestão de projetos, *ecodesign*, *green products* e sustentabilidade ambiental. Entretanto, apesar do reconhecimento da importância da integração das questões relativas à economia circular em um estágio inicial do PDP, poucos estudos têm focado em propostas de incorporação gradual de práticas em direção à circularidade neste processo.

Neste contexto, nossa pesquisa foi motivada pelas seguintes questões: (i) “*Como as empresas de manufatura podem incorporar gradativamente as práticas, métodos e ferramentas da EC em seu PDP?*”; ii) “*Como avaliar a intensidade dessa integração da EC no PDP em empresas de manufatura?*”

Assim, o objetivo geral do trabalho consiste em propor uma matriz de maturidade para avaliar de que maneira ocorre a integração das práticas, métodos e ferramentas da EC no PDP, identificando o nível de sistematização adotado por organizações que desenvolvem produtos e apresentam preocupações relativas à sua pegada ambiental.

Após a revisão de literatura e proposta inicial, nossa tarefa agora é avaliar a matriz com acadêmicos da área, a fim de identificar pontos de melhoria. Uma vez que você realiza pesquisas relevantes nessa área, agregaria muito ao nosso trabalho ter a oportunidade de apresentar-lhe a matriz e colher suas impressões e sugestões, para que possamos aprimorá-la e então seguirmos para a fase empírica.

A matriz é composta por cinco níveis (1 – Não reconhecido, 2 – Esforços Iniciais, 3 – Ativo, 4 – Proativo e 5 – Formando o futuro) e onze dimensões, advindas de nossa revisão de literatura, divididas em duas categorias: “estratégias de *Design*”, englobando aspectos relacionados às abordagens de *Design for X*, e “processo de *Design*”, composto por aspectos gerenciais do PDP. Para facilitar o entendimento, foi também elaborado um quadro com a descrição detalhada e exemplificada de cada dimensão.

Gostaria então de convidá-lo a apoiar esta etapa da nossa pesquisa. Como sistemática, propomos que analise o documento enviado em anexo ao longo dos próximos dez dias. Fique à vontade para usar o modo de Revisão do *Microsoft Word* ou outra estratégia que preferir, editando o próprio documento. Como aspectos a serem levados em conta em sua avaliação, solicitamos que por favor pondere a coerência, a abrangência, a clareza, a objetividade, a utilidade, a robustez e outros pontos que considere relevantes.

Fico à disposição para qualquer informação adicional que necessite, via e-mail ou WhatsApp. Meu contato é o (14) 99605 - 9405.

Muito obrigada pela sua atenção.

Atenciosamente,

Marina Fernandes Aguiar

APÊNDICE B – Mensagem enviada aos profissionais

Olá! Tudo bem?

Meu nome é Marina Aguiar, sou aluna de mestrado em Engenharia de Produção na UNESP de Bauru. Eu e meu orientador, o prof. Daniel Jugend, estamos propondo uma matriz de maturidade para avaliar o grau de integração das práticas de economia circular ao processo de desenvolvimento de produtos.

Sendo a (nome da empresa) tão engajada nessa área, agregaria muito ao nosso trabalho ter a oportunidade de apresentar-lhes a matriz para juntos avaliarmos o nível de maturidade da empresa, gerando *insights*.

Para isso, propomos o agendamento de uma videoconferência com você e sua equipe, envolvendo profissionais da área de *design* de produto e, se possível, também da área de sustentabilidade. Caso prefiram, também seria possível o envio do material previamente a esta reunião, para torná-la mais dinâmica e não lhes tomar muito tempo. Você aceita nos ajudar, por favor?

Fico à disposição para qualquer informação adicional que necessite.

Muito obrigada pela sua atenção!

Marina Aguiar

APÊNDICE C – Questionário para caracterização da empresa

- Data:
- Nome dos entrevistados:
- Cargos:
- Quantos funcionários a empresa possui?
- Qual a idade da empresa (tempo de atuação no mercado)?
- Quais os principais ramos de atuação da empresa?
- A empresa atende mercados internacionais (exportação de produtos)? Em caso afirmativo, quais os principais países?
- A empresa possui certificações (ISO 14001, ISO 9001? Outras?)
- Quais práticas e projetos de sustentabilidade ambiental e/ou de economia circular adotados pela empresa você destacaria? Poderia comentar, por favor?
- O que tem estimulado a empresa a adotar práticas e projetos de sustentabilidade ambiental e/ou de economia circular? Poderia comentar, por favor?
- Quais as principais dificuldades e desafios para a adoção da sustentabilidade ambiental e/ou economia circular para a empresa hoje?