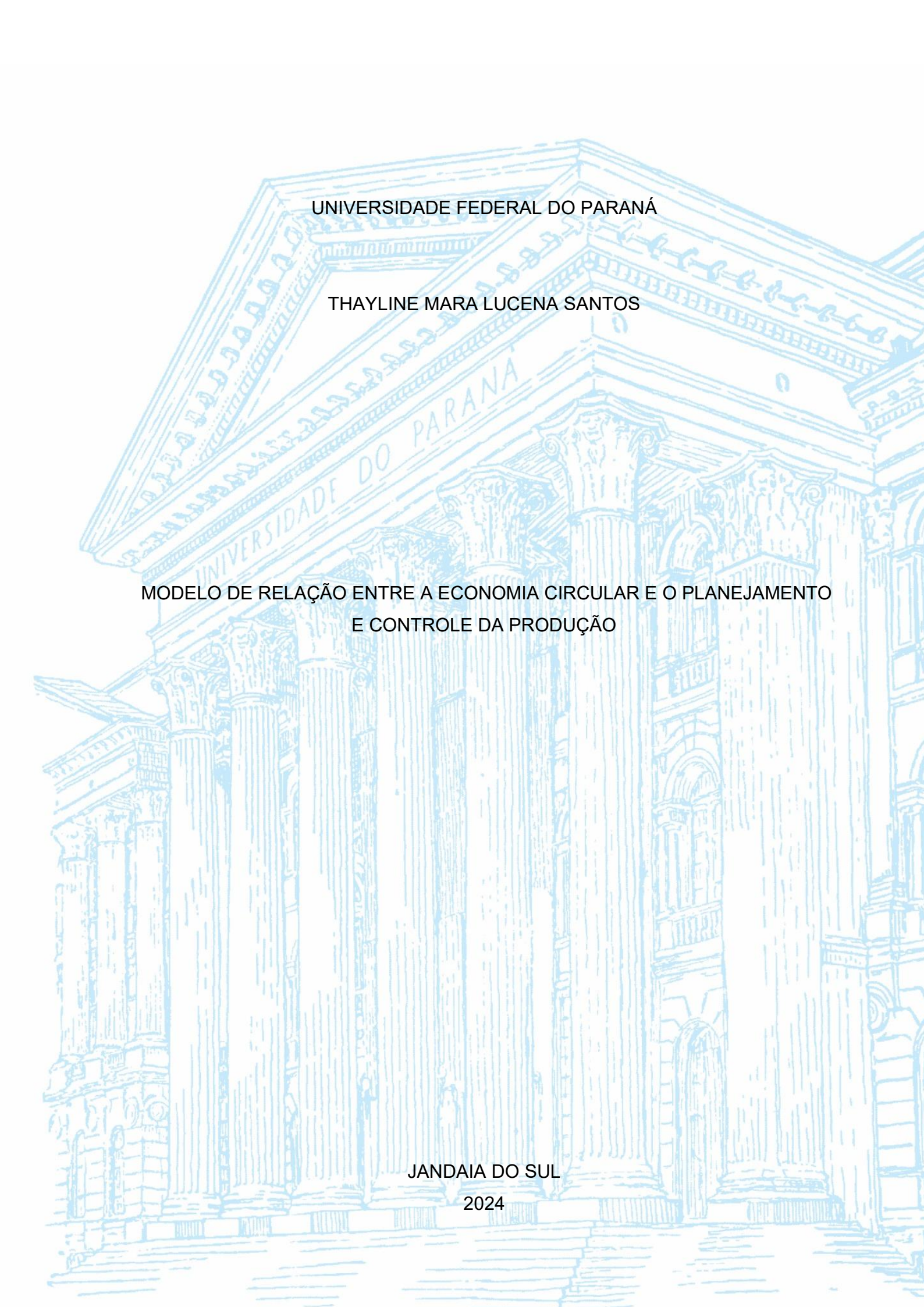




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THAYLINE MARA LUCENA SANTOS

MODELO DE RELAÇÃO ENTRE A ECONOMIA CIRCULAR E O PLANEJAMENTO
E CONTROLE DA PRODUÇÃO

JANDAIA DO SUL

2024

THAYLINE MARA LUCENA SANTOS

MODELO DE RELAÇÃO ENTRE A ECONOMIA CIRCULAR E O PLANEJAMENTO
E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, Campus Jandaia do Sul, Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para qualificação a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Prof. Giancarlo Canchumani.

JANDAIA DO SUL

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Thayline Mara Lucena
S237m Modelo de relação entre a economia circular e o planejamento e controle da produção. / Thayline Mara Lucena. – Jandaia do Sul, 2025. 99 f.

Orientador: Prof. Dr. Giancarlo Canchumani.
Trabalho de Conclusão do Curso (graduação) – Universidade Federal do Paraná. Campus Jandaia do Sul. Engenharia de Produção.

1. Economia circular. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Planejamento da Produção. I. Canchumani, Giancarlo. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 658.56

TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: MODELO DE RELAÇÃO ENTRE A ECONOMIA CIRCULAR E O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Autor(a): THAYLINE MARA LUCENA SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau no curso de Engenharia de Produção, aprovado pela seguinte banca examinadora.

GIANCARLO ALFONSO LOVON CANCHUMANI (Orientador)

WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS

ISADORA MARCELA DE CAMPOS

ANDRÉ LUIZ GAZOLI DE OLIVEIRA



Documento assinado eletronicamente por **GIANCARLO ALFONSO LOVON CANCHUMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/01/2025, às 15:30, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ANDRE LUIZ GAZOLI DE OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/01/2025, às 16:47, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/01/2025, às 10:15, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Isadora Marcela de Campos, Usuário Externo**, em 11/02/2025, às 16:23, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela força e saúde para me sustentar e ajudar nesta caminhada.

À minha família, em especial à minha mãe, Ana Maria de Lucena Santos, ao meu pai, Marcos Antônio Alves dos Santos, e à minha irmã, Thalita Mileury Lucena Santos, por todo o carinho, dedicação, amparo e pelas experiências compartilhadas ao longo de toda a minha vida.

Ao meu namorado, Braem Taumaturgo Bardaquim, por todo o apoio, ajuda e companheirismo, sempre me incentivando a continuar buscando meu propósito.

Aos meus colegas de turma e a todos os que conheci durante essa jornada, em especial à minha amiga e companheira de apartamento, Ana Helena Martinez Belizário da Silva, que sempre guardarei em meu coração.

Ao meu orientador, Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani, pela paciência, dedicação e pelos ensinamentos transmitidos durante este trabalho e ao longo dos anos da faculdade.

Aos professores da UFPR, pelos conhecimentos adquiridos e pelas experiências vividas, que foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

Os desafios socioambientais decorrentes do modelo econômico linear, baseados na extração, produção e descarte, resultam na exploração intensiva de recursos naturais e no aumento do volume de resíduos. As questões relacionadas à remoção e ao processamento de materiais primários, assim como os impactos imprevistos dessas atividades, estão gerando uma pressão significativa sobre a tomada de decisões nas indústrias. Essas operações industriais intensificam a gestão dos recursos naturais do planeta e acarretam consequências negativas para a sociedade como um todo. Nesse cenário, as empresas estão sendo incentivadas a adotar a economia circular (EC) como uma solução, promovendo práticas sustentáveis no planejamento e controle de produção (PCP). Neste sentido, o objetivo do estudo é propor um modelo de relação entre a EC e o PCP, visando o uso eficiente de recursos e a reciclagem de materiais ao longo da cadeia produtiva. Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), analisando artigos publicados entre 2019 a 2023. Ao todo, 11 artigos foram incluídos na revisão, sendo submetidos a análises quantitativas e qualitativas, como sugestões de autores de alguns estudos que podem apoiar o processo de tomada de decisão de empresas interessadas em implementar a EC em suas operações. Os artigos foram selecionados em três etapas, seguindo uma metodologia estruturada. Entre os resultados, destacou-se o crescimento expressivo no número de publicações nos últimos oito anos, com um pico em 2018, provocando um aumento no interesse acadêmico sobre o tema. O estudo também identificou os autores mais produtivos e os periódicos mais relevantes. A abordagem predominante nos estudos desenvolvidos foi o uso de estudos de caso, presente em 55% das publicações. Além disso, foi apresentado um modelo de fundamentos da EC no PCP, juntamente com um diagrama que destaca ferramentas, diretrizes, indicadores de desempenho e aspectos ambientais em nível estratégico-operacional. O modelo é aplicável a setores específicos, levando em conta as características do produto, sua vida útil e as particularidades de cada setor. Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento e para o desenvolvimento de pesquisas futuras, além de contribuir para o processo de aplicação da EC no PCP nas empresas.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável. Planejamento e Controle da Produção. Economia Circular. Revisão Bibliográfica Sistemática.

ABSTRACT

The socio-environmental challenges arising from the linear economic model, based on extraction, production and disposal, result in the intensive exploitation of natural resources and an increase in the volume of waste. Issues related to the removal and processing of primary materials, as well as the unforeseen impacts of these activities, are generating significant pressure on decision-making in industries. These industrial operations intensify the management of the planet's natural resources and have negative consequences for society as a whole. In this scenario, companies are being encouraged to adopt the circular economy (CE) as a solution, promoting sustainable practices in production planning and control (PCP). In this sense, the objective of the study is to propose a model of relationship between CE and PCP, aiming at the efficient use of resources and the recycling of materials throughout the production chain. To achieve this objective, a Systematic Literature Review (SLR) was carried out, analyzing articles published between 2019 and 2023. In total, 11 articles were included in the review, being subjected to quantitative and qualitative analyses, such as suggestions from authors of some studies that can support the decision-making process of companies interested in implementing CE in their operations. The articles were selected in three stages, following a structured methodology. Among the results, the significant growth in the number of publications in the last eight years stood out, with a peak in 2018, causing an increase in academic interest in the topic. The study also identified the most productive authors and the most relevant journals. The predominant approach in the studies developed was the use of case studies, present in 55% of the publications. In addition, a model of CE fundamentals in the PCP was presented, together with a diagram that highlights tools, guidelines, performance indicators and environmental aspects at the strategic-operational level. The model is applicable to specific sectors, taking into account the characteristics of the product, its useful life and the particularities of each sector. This work contributes to the advancement of knowledge and the development of future research, in addition to contributing to the process of applying CE in PPC in companies.

Keywords: Sustainable Development. Production Planning and Control. Circular Economy. Systematic Literature Review.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NÍVEIS HIERÁRQUICOS DA ESTRÁTEGIA DE PRODUÇÃO, FUNÇÕES DO PCP X HORIZONTE DE TEMPO	18
FIGURA 2 – GRÁFICOS DAS QUESTÕES NA PREVISÃO DE PRODUTOS DE RETORNO.....	23
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE REMONTAGEM SOB ENCOMENDA NA REMANUFATURA	32
FIGURA 4 – DEFINIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR.....	35
FIGURA 5 – ECONOMIA CIRCULAR	43
FIGURA 6 – ETAPAS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	45
FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE AS TRÊS NORMAS.....	48
FIGURA 8– FASES PARA UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EFICAZ	51
FIGURA 9 – MODELO PARA REALIZAR A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE FORMA SISTEMÁTICA.....	52
FIGURA 10 – PROCEDIMENTO DA FASE DE PROCESSAMENTO, RBS ROADMAP.....	55
FIGURA 11 – FASES DA PESQUISA.....	57
FIGURA 12 – MODELO COM AS FASES DA FERRAMENTA START	59
FIGURA 13 – ESTRUTURA DO MODELO PARA APLICAÇÃO DA EC NO PCP	60
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO POR ANOS DE PUBLICAÇÃO.....	63
FIGURA 15 – PALAVRAS-CHAVE MAIS UTILIZADAS	67
FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS QUANTO AO MÉTODO DE PESQUISA.....	68
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE APLICAÇÃO DA EC NO PCP	78

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ATUAÇÃO DO PCP EM TRÊS NÍVEIS ESTRATÉGICOS	17
QUADRO 2 – AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DOS PRODUTOS	61
QUADRO 3 – ARTIGOS RESULTANTES DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	62
QUADRO 4 – PUBLICAÇÃO DOS AUTORES.....	63
QUADRO 5 – PERIÓDICOS DAS PUBLICAÇÕES	66
QUADRO 6 – ESTRUTURA PARA APLICAÇÃO DA EC NA FASE DO PCP.....	69
QUADRO 7 – AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE	74

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

EC	- Economia Circular
PCP	- Planejamento e Controle da Produção
RBS	- Revisão Bibliográfica Sistemática
RSL	- Revisão Sistemática da Literatura
PMP	- Planejamento mestre da produção
PP	- Programação da produção
ACV	- Avaliação do ciclo de vida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo geral	15
1.4.1.1 Objetivos específicos	15
1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS AO PCP	16
2.1.1 Conceitos Chaves de PCP	17
2.1.1.1 Previsão de demanda	18
2.1.1.2 Planejamento da capacidade	19
2.1.1.3 Roteiro de produção	19
2.1.1.4 Planejamento agregado da produção	19
2.1.1.5 Planejamento mestre da produção	20
2.1.1.6 Programação da produção	20
2.1.1.7 Gestão de Estoque	20
2.1.2 Ferramentas Utilizadas Para Promover a Gestão Ambiental no PCP	21
2.1.2.1 Previsão de Devolução de Produtos Pós-uso e Controle de Aquisição	21
2.1.2.2 Impacto do design do produto no planejamento de desmontagem e remanufatura	24
2.1.2.3 Caracterização do produto pós-uso	26
2.1.2.4 Planejamento da Cadeia de Processos	28
2.1.2.5 Planejamento e controle de produção de desmontagem e remanufatura	30
2.2 A ECONOMIA LINEAR X ECONOMIA CIRCULAR	33
2.2.1 Definições da Economia Circular	34
2.2.2 Princípios da Economia Circular	36
2.2.2.1 Princípio 1: Gestão de fluxos renováveis e matérias finitos	36
2.2.2.2 Princípio 2: Ciclos biológicos e técnicos	38
2.2.2.3 Princípio 3: Gerenciamento das externalidades	39
2.2.3 Estratégias da Economia Circular	40
2.2.4 Modelos da Economia Circular	41

2.3 INTERAÇÃO ENTRE A EC E PCP	43
2.3.1 Ferramentas da Gestão Ambiental	44
2.3.1.1 Avaliação do Ciclo de de Vida.....	44
2.3.1.2 Ecoeficiência.....	46
2.3.1.3 Simbiose Industrial.....	46
2.3.1.4 Ecodesign.....	47
2.3.1.5 Série ABNT NBR ISO 59000.....	47
3 MÉTODOS DE PESQUISA.....	49
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	49
3.2 PROCEDIMENTO PARA REVISÃO DE LITERATURA	50
3.2.1 Entrada	52
3.2.2 Processamento	54
3.2.3 Saída	56
3.3 PROTOCOLO DA PESQUISA	57
3.3.1 Planejamento da pesquisa.....	57
3.3.2 Coleta, tabulação e análise dos dados	58
4 RESULTADOS.....	62
4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA SOBRE AS PESQUISAS	63
4.2 IMPLEMENTAÇÃO DA EC NO PCP	68
4.2.1 Estrutura para aplicação	69
4.2.2 Avaliação da circularidade	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A geração desenfreada de resíduos tem desencadeado uma série de questões socioambientais, intensificando as práticas mais sustentáveis de consumidores, sociedade, governos e mercado. O modelo econômico linear (extrair recursos naturais, produzir e descartar) ainda é uma problemática (Fundação Ellen MacArthur, 2012), visto que tem causado diversas consequências emergentes, tais como o acúmulo de resíduos em aterros, escassez de recursos, o aquecimento global, poluição do ar e da água, alteração climática e uso não consciente das matérias-primas finitas.

Segundo Azevedo, Godina e Matias (2017), essa crescente pressão, juntamente com a elevada competitividade e a expansão dos mercados globais, as empresas estão sendo diretamente influenciadas a incluir a Economia Circular (EC) nas práticas de produção, começando pelas tarefas e estratégias operacionais no Planejamento e Controle de Produção (PCP). Isso incentiva a adoção de novas práticas e a conscientização, tanto individual quanto institucional, visando garantir o compromisso das sociedades e nações com um mundo mais sustentável.

De acordo com Zarte, Pechmann e Nunes (2022), as Nações Unidas (ONU) reconheceram a importância da sustentabilidade e tomaram a iniciativa de realizar conferências anuais para debater metas e ações políticas. Entre os resultados dessa iniciativa estão o Acordo de Paris, da Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNCCC) de 2015, e a Agenda 2030 para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentada na Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de 2015, em Nova Iorque.

O PCP é um processo de manufatura que agrega valor e precisa se ajustar constantemente aos ambientes operacionais e estratégicos, às exigências complexas dos clientes e às novas oportunidades na cadeia de suprimentos (Bueno; Godinho; Frank, 2020). Atualmente, devido à crescente diversidade de produtos, à redução do ciclo de vida dos produtos, às rápidas mudanças na demanda do mercado e à diminuição dos prazos de entrega, a função do PCP é essencial para o sucesso das empresas de manufatura e deve ser dinâmica e adaptável (Bueno; Godinho; Frank, 2020; Aydin; Trikolae, 2022; Stevenson; Hendry; Kingsman, 2005).

A EC é considerada uma estratégia promissora para auxiliar na redução das pressões globais relacionadas à sustentabilidade (Fundação Ellen MacArthur, 2012). Trata-se de um sistema econômico no qual os participantes envolvidos trabalham em conjunto para maximizar a utilização e gestão dos recursos, com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, visando à qualidade ambiental e ao bem-estar social (Manninen *et al.*, 2018; Bertassini *et al.*, 2021). É um modelo baseado em uma perspectiva sistêmica de longo prazo (Confederação Nacional da Indústria, 2018). Se a EC for executada de forma eficiente, poderá trazer vantagens competitivas através da emissão natural do ecossistema (Genc *et al.*, 2020). Além disso, é capaz de gerar valor sustentável, pois sua aplicação possibilita a redução dos impactos negativos enquanto introduz novos modelos de negócio (Buren *et al.*, 2016). A ideia da EC é sempre buscar aumentar a produtividade dos recursos através da reintrodução contínua dos resíduos descartados nos ciclos de vida (Mokdadir *et al.*, 2018).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O sistema tradicional de PCP é constituído por vários recursos, incluindo mão de obra, materiais, capacidade de produção e seus custos. No entanto, não recebe a devida atenção aos aspectos sustentáveis (Giret; Trentesaux; Prabhu, 2015). Considerar esses aspectos, levando em conta as questões sociais e ambientais, como emissões e a utilização de recursos renováveis, é sem dúvida complexo e demanda mais esforço para realizar diversas tarefas de PCP (Zarte; Pechmann; Nunes, 2022). Apesar de o principal objetivo do PCP ser maximizar a eficiência econômica nos processos operacionais, é igualmente importante adotar estratégias que reconheçam e valorizem os aspectos socioambientais (Sátiro *et al.*, 2021; Zarte; Pechmann, Nunes, 2022).

Nesse sentido, o presente estudo visa identificar a eficiência operacional e a contribuição da sustentabilidade ambiental nas indústrias por meio de uma revisão sistemática da literatura, respondendo à seguinte pergunta: “Quais estudos relacionados à EC e PCP promovem a redução de desperdícios, o uso eficiente de recursos e reciclagem de materiais ao longo da cadeia produtiva?”

1.3 JUSTIFICATIVA

Os desafios relacionados à extração e transformação de matérias-primas em produtos de consumo são consideráveis, e as ramificações não intencionais das atividades associadas estão gerando uma demanda significativa e responsabilidades adicionais sobre como as decisões são tomadas nas indústrias transformadoras (Gbededo; Liyanage; Garza-Reyes, 2018). Pesquisas têm mostrado que as atividades industriais estão contribuindo para uma alarmante degradação dos recursos naturais do planeta e causando efeitos prejudiciais na sociedade em geral (Cannata *et al.*, 2009; Rahimifard *et al.*, 2010; Aramcharoen; Mativenga, 2014; Ribeiro; Kruglianskas, 2013; Kalakul *et al.*, 2014). Portanto, a atenção global atual está voltada para o apoio e a pressão sobre as indústrias transformadoras para adotarem práticas de produção mais limpas e eficientes, visando o desenvolvimento de produtos e serviços com menor impacto ambiental e social negativo (Stevens, 2005, Resumos Multilingues da OCDE, 2010, Zeng *et al.*, 2010, Ribeiro; Kruglianskas, 2013, Kubota; Da Rosa, 2013).

A economia linear resulta em um prejuízo insustentável para o planeta, levando as empresas a se adaptarem através de estratégias, modelos e ferramentas para minimizar os impactos ambientais, tais como ecoeficiência, ecodesign, avaliação do ciclo de vida, ecologia industrial e sistema de gestão ambiental. Além disso, o presente trabalho visa promover os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU para 2030, nos quais uma das metas propostas, a ODS 12, é assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (Confederação Nacional de Municípios, 2022). No entanto, segundo Bhanot *et al.* (2017), as empresas ainda enfrentam desafios para aumentar a sustentabilidade em seus processos de produção, tendo dificuldade em implementar a EC, principalmente na área de PCP. Entre os problemas estão o alto nível de esforço necessário e a complexidade envolvida na gestão estratégica, permanecendo apenas no âmbito das estratégias e não no operacional. A literatura sobre planejamento e controle da produção na perspectiva da EC está em construção, com poucos estudos abordando esse tema, o que representa uma lacuna de conhecimento que este estudo de pesquisa se propõe a preencher (Simone *et al.*, 2023).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Objetivo do estudo é propor um modelo de relação entre a Economia Circular e Planejamento e Controle da Produção, visando uso eficiente de recursos e reciclagem de materiais.

1.4.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dessa pesquisa incluem:

1. Identificar as principais estratégias e ferramentas utilizadas na EC por meio de uma revisão de literatura.
2. Analisar os princípios fundamentais da EC e suas aplicações no contexto do PCP.
3. Elaborar indicadores da EC nas estratégias operacionais.
4. Propor um modelo de EC que integre o processo do PCP aos princípios da EC, visando à redução de desperdícios e à promoção do uso eficiente de recursos.

1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresenta a introdução, justificativa, objetivo geral e específicos.

Capítulo 2: Aborda a revisão bibliográfica, apresentando os conceitos do PCP e impactos ambientais; a Economia Linear X Economia Circular; modelos da Economia Circular e integração entre a Economia Circular e Planejamento e Controle da Produção.

Capítulo 3: Detalha a metodologia da pesquisa, incluindo os procedimentos de busca de artigos relevantes e sua análise.

Capítulo 4: São apresentados os resultados das análises realizadas.

Por fim, o Capítulo 5: São apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo, apresentará um referencial teórico sobre os conceitos abordados no estudo.

2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS AO PCP

O desenvolvimento sustentável, é definido como “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” (Wced, 1987). Entretanto, o significado desse conceito para desenvolver ou aprimorar sistemas de produção, ainda não está completamente claro (Zarte; Pechmann; Nunes, 2022). De modo geral, a criação de um sistema envolve inicialmente avaliar o verdadeiro potencial de aprimoramento do cenário atual em comparação com um estado futuro mais desejável, e em seguida, identificar diferentes abordagens para alcançar esse estado desejado, implementando métodos que são aceitáveis, factíveis e viáveis (Daly, 1990). Além do mais, a adaptabilidade dos sistemas desempenha um papel crucial e deve ser igualmente considerada para lidar com possíveis eventos ou mudanças no ambiente que possam impactar o desempenho desejado do sistema (Refa, 1990).

No contexto da sustentabilidade, é fundamental expandir o objetivo do PCP para incluir não apenas considerações econômicas, mas também aspectos ambientais e sociais (Giret; Trentesaux; Prabhu, 2015; Sutherland *et al.*, 2017). Para essa perspectiva, há várias definições que descrevem o nível de sustentabilidade que os sistemas de manufatura devem alcançar, utilizando ferramentas de PCP (Moldávia; Welo, 2017).

No entanto, Zarte, Pechmann e Nunes (2021) definem o PCP com base na sustentabilidade como:

O planejamento das atividades produtivas para atingir as metas convencionais (econômicas) de produção, garantindo o funcionamento dos empreendimentos. Além disso, devem ser alcançadas metas adicionais de sustentabilidade, evitando, reduzindo ou compensando danos ambientais e questões sociais (Zarte; Pechmann; Nunes, 2021).

2.1.1 Conceitos Chaves de PCP

Segundo Zaccarelli (1979), o PCP é composto por uma série de funções interconectadas, cuja finalidade é direcionar e coordenar o processo produtivo de uma organização, em conjunto com os demais departamentos administrativos da empresa. O PCP cria condições para que as decisões sejam tomadas rapidamente diante de oportunidades e ameaças, aumentando a competitividade da empresa no mercado (Tubino, 2009).

A principal função do PCP é melhorar a eficiência e a capacidade de resposta das operações de fabricação. Isso inclui a redução do trabalho em progresso, a otimização dos tempos de produção, a diminuição dos prazos de entrega e a gestão eficaz do estoque (Stevenson, Hendry, & Kingsman, 2005).

Para Lustosa *et al.* (2008), o PCP desempenha um papel crucial em todos os três níveis hierárquicos da organização conforme o Quadro 1.

QUADRO 1 – ATUAÇÃO DO PCP EM TRÊS NÍVEIS ESTRATÉGICOS

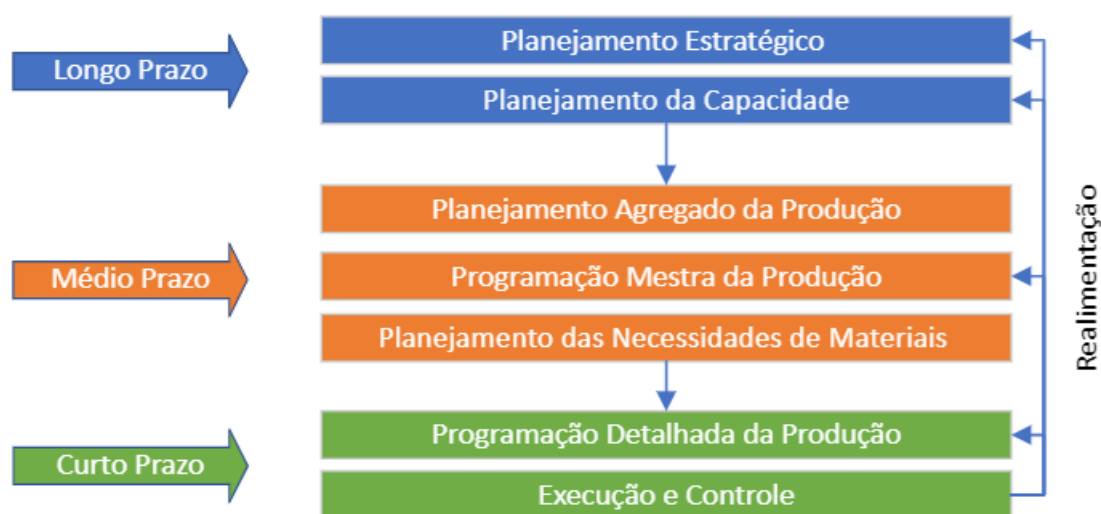
Nível Estratégico	São definidas políticas estratégicas de longo prazo. O planejamento da capacidade é elaborado no nível estratégico, definindo a capacidade da planta. Já o planejamento agregado de produção é elaborado como uma transição para o nível tático, definindo o composto (ou mix) das estratégias específicas de produção.
Nível Tático	São estabelecidos planos de médio prazo para a produção, obtendo-se o Plano Mestre de Produção (PMP).
Nível Operacional	São preparados os planos de curto prazo, como resultado do Planejamento das Necessidades de Materiais. Neste nível são gerenciados os estoques, as ordens de produção são sequenciadas, as ordens de compras são emitidas e liberadas, assim como são executados o acompanhamento e o controle.

FONTE: Adaptado de Lustosa *et al.* (2008).

Conforme o quadro, os níveis estratégicos envolvem atividades que abrangem desde a concepção até a implementação, além do controle e operação (Lustosa, 2008).

Na Figura 1 faz uma complementação das informações apresentadas no Quadro 1.

FUGURA 1 – NÍVEIS HIERÁRQUICOS DA ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO, FUNÇÕES DO PCP X HORIZONTE DE TEMPO



FONTE: Adaptado de Lustosa *et al.* (2008).

Conforme apresentado, a Figura 1 relaciona os diferentes níveis hierárquicos aos horizontes de tempo de planejamento, abrangendo o longo, médio e curto prazo. Além disso, destaca a conexão entre os níveis hierárquicos da estratégia de produção e as várias funções do PCP, incluindo planejamento de capacidade, planejamento agregado de produção, programa mestre de produção, planejamento de necessidades de materiais, programação detalhada da produção e execução e controle da produção (Lustosa *et al.*, 2008).

De acordo com Zaccarelli (1979), Tubino (2009) e Russomano (1976), há diversas atividades importantes associadas ao PCP, tais como: previsão de demanda, planejamento da capacidade, roteiro de produção, planejamento agregado da produção, planejamento mestre de produção (PMP), programação da produção (PP) e gestão de estoques.

2.1.1.1 Previsão de demanda

Segundo Moreira (2009), "a previsão de demanda é um processo racional de busca de informações sobre o valor das vendas futuras de um item ou de um conjunto de itens".

Lustosa *et al.* (2008) afirmam que a realização de previsões de demanda auxilia as organizações na determinação dos recursos necessários para seu processo produtivo. Isso ocorre porque os mercados acessíveis e os concorrentes em disputa estão em constante mudança, sendo essencial para a empresa permanecer competitiva.

2.1.1.2 Planejamento da capacidade

Conforme Reis (1978), o planejamento em longo prazo é fundamental para analisar sistemas de PCP. A capacidade de um processo em uma planta industrial representa o máximo que pode ser produzido sob as melhores condições (Lustosa *et al.*, 2008).

“Planejamento e controle de capacidade tem a tarefa de determinar a capacidade efetiva da operação produtiva, de modo que ela possa responder à demanda. Significa decidir como a operação deve reagir a flutuações na demanda” (Slack *et al.*, 2002).

Para Slack, Chambers e Johnston (2002), a capacidade de uma operação é definida como o nível máximo de atividade realizada em condições normais durante um período determinado.

2.1.1.3 Roteiro de produção

De acordo com Russomano (1979), o roteiro de produção consiste em um conhecimento detalhado da composição e dos procedimentos necessários para a fabricação de um determinado produto. Sua finalidade é estabelecer o método mais eficiente para a produção dos itens finais que a organização deseja fabricar. Dentro do roteiro de produção, são realizadas diversas decisões, incluindo a escolha entre fabricar ou comprar, a divisão de tarefas, a seleção de máquinas e o sequenciamento das operações.

2.1.1.4 Planejamento agregado da produção

Conforme Peinado e Graeml (2007), “o planejamento agregado é importante para a empresa conciliar a capacidade produtiva, que é relativamente constante, à demanda, que geralmente não é linear e apresenta sazonalidade”. Seus principais objetivos incluem maximizar os resultados operacionais, minimizar os riscos de decisão, influenciar as escolhas de longo prazo e criar condições propícias para uma

rápida tomada de decisão diante de oportunidades e ameaças, mantendo assim as vantagens competitivas em relação à concorrência (Meireles, 2012).

2.1.1.5 Planejamento mestre da produção (PMP)

De acordo com Tubino (2009), o PMP tem a responsabilidade de desmembrar as estratégias de produção em planos específicos para o médio prazo, visando orientar a programação e execução das atividades no nível operacional, de curto prazo.

Através do PMP, a empresa compromete-se com a realização de atividades tanto internas quanto externas ao processo produtivo, assumindo o controle de cada etapa, desde a aquisição de matéria-prima até a montagem dos produtos finais (Tubino, 2009).

2.1.1.6 Programação da produção (PP)

A PP é para Zaccarelli (1979), “a elaboração de planos detalhados necessários ao cumprimento dos objetivos de entrega representados pelo plano de produção”.

Para programar a produção de forma adequada, é essencial que sejam realizados tanto o roteiro de produção quanto o planejamento da capacidade, e que suas informações sejam transmitidas adiante (Zaccarelli, 1979).

2.1.1.7 Gestão de Estoque

Conforme Lustosa *et al.* (2008), os estoques representam ativos importantes para as empresas, exigindo, portanto, uma gestão eficaz para alcançar os objetivos organizacionais. Dentro dessa gestão, são tomadas decisões cruciais, como determinar quais itens devem ser repostos, quando acionar o processo de reposição e em que quantidade repor.

Zaccarelli (1979) destaca algumas razões que justificam a gestão de estoques, tais como: garantir a continuidade ou prontidão do fornecimento e possibilitar economias financeiras. A responsabilidade pela gestão de estoques é compartilhada entre os níveis médio e operacional da organização, uma vez que a alta gerência não pode se ocupar com o estoque de cada item necessário.

2.1.2 Ferramentas Utilizadas para Promover a Gestão Ambiental no PCP

Nesta seção, serão abordadas as descobertas da pesquisa conduzida por Tólio *et al.* (2017), que se concentra nas estratégias e instrumentos para otimizar o planejamento e controle da produção, especialmente em contextos de desmontagem e remanufatura, visando a lucratividade. O foco da análise está na transição para um modelo de negócio fundamentado nos princípios da EC. Nas próximas subdivisões, são oferecidos *insights* práticos sobre as decisões a serem tomadas e as ferramentas de suporte a serem consideradas para a implementação de um empreendimento sustentável tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, juntamente com o sistema associado.

2.1.2.1 Previsão de Devolução de Produtos Pós-uso e Controle de Aquisição

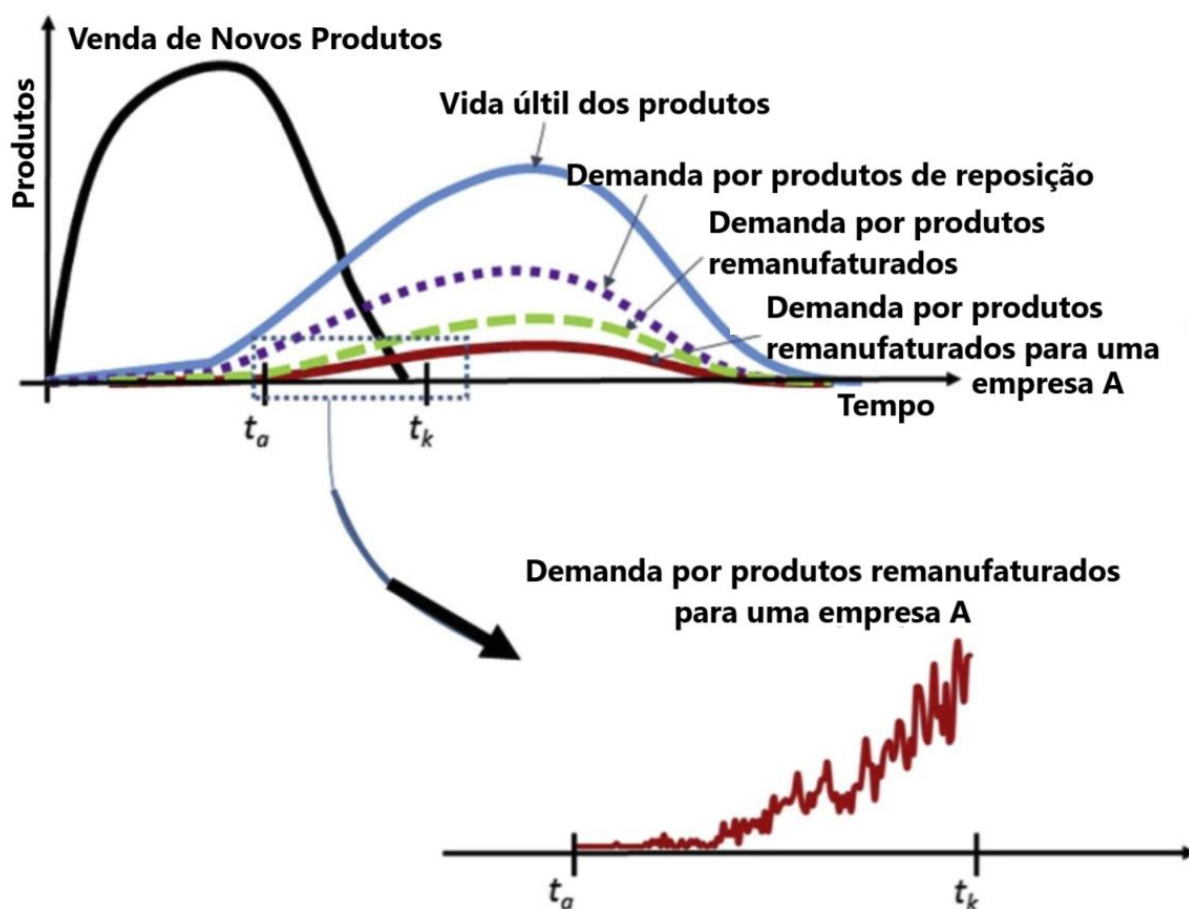
De acordo com Tólio *et al.* (2017), uma informação crucial para o sucesso no planejamento e controle das operações de negócios orientados pela EC é a capacidade de prever a quantidade de produtos que serão devolvidos. Isso implica estimar não apenas quando os produtos serão devolvidos, mas também a qualidade e a quantidade desses produtos, bem como a demanda por produtos reutilizados que encontrarão. Esses dados são fundamentais para uma avaliação precisa da viabilidade econômica do modelo de negócio circular. Além disso, ajudam a abordar desafios de *design* e planejamento, como a configuração da rede de logística reversa, a gestão de capacidade, a alocação de instalações e recursos, e o controle de estoque (Clotey; Benton; Srivastava, 2012). Entretanto, antecipar o retorno de produtos é uma tarefa desafiadora devido às incertezas inerentes ao mercado e à influência de diversos fatores sociais e tecnológicos (Hanafi; Kara; Kaebernick, 2007).

Os aspectos sociais desempenham um papel essencial no modo como as pessoas lidam com produtos defeituosos e obsoletos, além de influenciar sua disposição para reutilizar produtos, componentes e materiais reciclados (Tólio *et al.*, 2017). Por exemplo, dispositivos eletrônicos de pequeno porte, como celulares, frequentemente têm uma vida útil mais longa do que o tempo médio de substituição devido ao hábito dos consumidores de manterem dispositivos obsoletos em casa, em vez de descartá-los em locais específicos de coleta de lixo eletrônico (Sabbaghi *et al.*, 2015). Além disso, Tólio *et al.* (2017) afirmam que as informações

sociodemográficas e psicográficas são valiosas para compreender como as pessoas encaram a desmontagem e remontagem de produtos. As variáveis tecnológicas, como os ciclos de inovação, a confiabilidade dos produtos e as estratégias de *marketing*, também desempenham um papel significativo nesses padrões de comportamento. Vários métodos de previsão foram propostos na literatura, baseados em uma combinação desses fatores. Esses métodos podem ser divididos em duas abordagens metodológicas distintas.

Conforme Tólio *et al.* (2017), na primeira abordagem, as distribuições temporais do fim da vida útil dos produtos e dos retornos são calculadas ao adicionar estimativas do período de uso dos produtos à distribuição temporal das vendas de novos produtos. Essa metodologia é amplamente aplicada na recuperação de materiais e na remanufatura, utilizando distribuições de vendas agregadas ou detalhadas. Para Marx-Gomez *et al.* (2002), a maioria dos modelos foca na quantidade e no tempo de retorno dos produtos, ignorando a qualidade. A combinação da simulação e modelos de lógica difusa para prever as quantidades e o tempo de retorno de fotocopiadora, essa simulação foi utilizada para adquirir vendas, falhas, intensidade de uso, cotas de retorno e entre outros. Umeda *et al.* (2006) analisaram a relação entre devoluções de produtos e demandas por câmeras descartáveis, fotocopiadoras e caixas eletrônicos, utilizando dados de vendas e empíricos. Takata e Sakai (2009) desenvolveram um modelo para prever a quantidade de produtos retornados, considerando variações nos métodos de venda e comportamento do consumidor, baseando-se em dados reais de copiadoras. Ayvaz *et al.* (2014) introduziram um método usando a teoria dos sistemas cinzentos para integrar dados conhecidos e desconhecidos na previsão. Hanafi *et al.* (2008) utilizaram redes de Petri de cores difusas para prever retornos de produtos, com uma precisão superior a 90% em cenários reais. Outros métodos também consideram a qualidade do produto na previsão, como o modelo de Liang *et al.* (2014) para baterias automotivas, que inclui informações sobre vendas, uso do produto, padrões de devolução e expectativa de vida. A Figura 2 apresenta os gráficos que expressam os dados sobre as questões na previsão de retorno dos produtos.

FIGURA 2 – GRÁFICOS DAS QUESTÕES NA PREVISÃO DOS PRODUTOS NO RETORNO



FONTE: Adaptado de Tólio *et al.* (2017).

Essa figura apresenta a dinâmica de vendas e demanda relacionadas a novos produtos, produtos de reposição e produtos remanufaturados ao longo do tempo, analisando o ciclo de vida do produto e seu impacto na demanda de remanufaturados para uma empresa específica.

A venda de novos produtos, representada por uma curva inicial (em preto) com um pico, simboliza o ciclo de vida de novos produtos no mercado. O pico ocorre no momento em que a venda do produto atinge sua maior popularidade, seguida por um declínio conforme o produto se torna obsoleto.

Na vida útil dos produtos, destaca o período em que os produtos permanecem funcionais e utilizáveis antes de necessitarem de substituição ou manutenção. Esse intervalo está associado ao início da demanda por produtos de reposição e remanufaturados.

Já na demanda por produtos de reposição e remanufatura, surge a demanda por produtos de reposição (linha azul), que são itens novos usados para substituir os

originais e produtos remanufaturados (linha roxa), que representam a restauração ou reprocessamento de produtos usados, sendo uma alternativa mais econômica e sustentável. Diferentes curvas (em roxo, verde e vermelho) ilustram o aumento progressivo na demanda por remanufaturados.

Por fim, na demanda específica para a Empresa A (linha vermelha), observa-se o crescimento sazonal da demanda por produtos remanufaturados, indicando que a empresa está se beneficiando de uma tendência crescente no uso de remanufatura.

2.1.2.2 Impacto do *design* do produto no planejamento de desmontagem e remanufatura

O designer do produto desempenha um papel crucial nos sistemas de desmontagem e remanufatura, influenciando várias áreas: (i) as escolhas de modelo de negócios da EC disponíveis para o fabricante, (ii) a seleção de soluções tecnológicas relevantes (Basker; King, 2007) e (iii) a eficácia e rentabilidade dos processos de desmontagem e remanufatura (King *et al.* 2006). Conforme Tólio *et al.* (2017), ao considerar previamente o impacto das decisões de *design* do produto no valor pós-uso e nos procedimentos de recuperação de funcionalidade, o fabricante pode antecipar problemas potenciais que possam comprometer a viabilidade do processo e implementar ajustes no *design* para promover um desenvolvimento empresarial sustentável, desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto. Essa abordagem representa um recurso estratégico valioso ao estabelecer empreendimento baseados na EC com foco no fabricante, conferindo-lhes uma vantagem competitiva distinta.

O *Design for Life-Cycle Management* (DfLCM) é um campo de estudo que explora a interação entre o *design* de produtos e as soluções para desmontagem e remanufatura (Ueda *et al.* 2005). Ele se desdobra em duas áreas principais: “*Design for Recycling*” (DfR) e “*Design for Remanufatura*” (DfRem) (Umeda *et al.* 2012), que representam conjuntos específicos de ferramentas e técnicas de *design* (Lutters *et al.*, 2014). As investigações em DfRem e DfR se concentram principalmente nos desafios relacionados ao *design* de produtos para desmontagem e remanufatura, bem como no desenvolvimento de métodos e estratégias de *design* para enfrentar esses desafios (Hatcher; Ijomah, 2013). Para Umeda *et al.* (2012), esses métodos permitem ajustar a estratégia de desmontagem e remanufatura de acordo com as

características do produto após o uso. Existe um consenso geral na literatura de que as abordagens DfRem e DfR devem considerar tanto o produto quanto o processo, incorporando uma visão completa do ciclo de vida e levando em consideração fatores organizacionais que afetam a integração de considerações de desmontagem e remanufatura no processo de *design* (Tólio *et al.*, 2017).

Segundo Tólio *et al.* (2017), o objetivo do *Design for Recycling* (DfR) é examinar os elementos de *design* de produtos que afetam a facilidade e a eficácia dos procedimentos de reciclagem para recuperar materiais. As orientações do DfR abordam uma ampla gama de aspectos do *design* do produto. Por exemplo, ele inclui tabelas específicas que identificam combinações de materiais difíceis de separar. Os *designers* são aconselhados a evitar a utilização de materiais que não sejam compatíveis com a reciclagem no mesmo produto. Além disso, o DfR avalia como diferentes tipos de fixadores impactam na viabilidade dos processos de reciclagem. Por exemplo, de acordo com a PNUMA (Programação das Nações Unidas para o Meio Ambiente) 2013, ficou evidente que o conhecimento sobre os tipos de fixadores utilizados nos produtos tem uma influência significativa nas decisões relacionadas aos sistemas de desmontagem e remanufatura. Além disso, as abordagens do *Design for Recycling* (DfR) concentram-se em identificar materiais ou componentes perigosos e defendem a adoção de *designs* de produtos que facilitem a desmontagem desses componentes perigosos no início do processo de reciclagem. Por fim, há uma tendência em buscar substitutos adequados para recursos críticos e materiais de difícil reciclagem.

O DfRem surgiu como uma abordagem de *design* autêntica após o reconhecimento de que muitas das barreiras técnicas à remanufatura podem estar associadas ao modo como o produto foi projetado (Ijomah *et al.* 2007). São identificadas características específicas do produto que podem influenciar positiva ou negativamente as etapas cruciais da remanufatura, como a desmontagem e a limpeza (Sundin, 2004). As diretrizes abordam os materiais do produto e como eles são combinados, além da estrutura e geometria do produto, e os métodos de fixação e junção que podem facilitar uma desmontagem mais fácil e eficiente (Umeda *et al.* 2015).

Diversos estudos analisaram os fatores essenciais que tornam um produto apropriado para remanufatura, impactando assim a viabilidade dessa estratégia de negócio baseada na Economia Circular (Tólio *et al.*, 2017). Por exemplo, Matsumoto

et al. (2016) destacam as seguintes características como: (i) tecnologia de produtos e processos estável; (ii) a durabilidade dos componentes críticos é significativamente maior do que o tempo de uso do produto; (iii) um produto que apresenta falhas funcionais em vez de degradação ao longo do tempo; (iv) um alto valor agregado recuperável em comparação ao custo original do produto.

Uma metodologia de *design* que oferece grandes benefícios para remanufatura e reutilização é o *design* modular de produtos (Ibbotson; Kara; Kaebernick, 2007). Para Chierici e Copani (2016) módulos são as unidades mais simples de um sistema, caracterizadas pela independência em relação a outros módulos e pela possibilidade de serem substituídos por outros módulos. Essas práticas permitem que peças padronizadas de alto valor, feitas de materiais duráveis ou altamente robustos, sejam reutilizadas em pelo menos um segundo ciclo de vida. Com base no conceito de *design* modular, o "*Design for Upgradability*" é uma abordagem de *design* de produto que visa facilitar a atualização das funções do produto através da adição ou reconfiguração de um ou mais módulos. Esta abordagem utiliza a modularidade para projetar produtos que possam ser remanufaturados e atualizados. Na prática, isso significa criar produtos que possam ser facilmente limpos, desmontados, reparados (substituindo módulos quebrados) e atualizados (adicionando novos módulos ou trocando módulos). A ideia de remanufatura com atualização é prolongar a vida útil dos produtos, permitindo a introdução de inovações tecnológicas nos produtos remanufaturados para atender às preferências em constante mudança dos clientes, enquanto se preservam ao máximo os recursos físicos utilizados no processo. O *design* de produtos para capacidade de atualização também pode promover novos modelos de negócios da EC, baseados no conceito de "sistema produto-serviço". Esse modelo foca em vender o uso do produto em vez do produto físico e oferece aos clientes opções de atualização do produto ao longo de todo o seu ciclo de vida (Ren, 2007; Pialot; Millet; Bisiaux, 2017).

2.1.2.3 Caracterização do produto pós-uso

Conforme Tólio *et al.* (2017), a gestão de informações pós-uso do produto é essencial, pois possibilita o planejamento dos processos de desmontagem e remanufatura, bem como o *design* de sistemas. Duas categorias de informações são importantes nesse contexto: as características nominais do produto "conforme

projetado" e as condições do produto após o uso. Portanto, é necessário adotar métodos e ferramentas específicos para coletar essas informações de maneira adequada.

De acordo com Tólio *et al.* (2017), a disponibilidade das informações nominais do produto está se tornando cada vez mais crucial à medida que a complexidade dos produtos aumenta. O acesso a essas informações durante os processos de desmontagem e remanufatura depende amplamente do contexto específico. Em um modelo de negócios centrado no fabricante, essas informações geralmente são armazenadas no sistema de gerenciamento do ciclo de vida do produto da empresa. Nesse caso, podem ser utilizados dispositivos em linha para leitura de códigos dos produtos, como o Reconhecimento Óptico de Caracteres (OCR). No entanto, se o fabricante não estiver diretamente envolvido na EC ou tiver um baixo nível de digitalização, as informações nominais sobre o *design* do produto podem não ser facilmente recuperadas. Nesse caso, diferentes métodos são adotados para coletar informações funcionais, estruturais e materiais.

As informações funcionais e estruturais são normalmente obtidas por meio de engenharia reversa, tanto de *software* quanto de *hardware*. Freiburger, Albrecht e Käufl (2011) propõem uma abordagem de engenharia reversa para sistemas mecatrônicos e eletrônicos automotivos, desenvolvida a partir do projeto "CAN REMAN". Essa abordagem, dividida em cinco etapas, permite a desmontagem de sistemas mecatrônicos e eletrônicos automotivos que utilizam comunicação via barramento CAN e outros tipos semelhantes.

Segundo Tólio *et al.* (2007), em relação às informações sobre materiais, as duas abordagens mais amplamente adotadas são a análise experimental e os métodos baseados no conhecimento. A análise experimental envolve isolar uma área representativa do componente ou material e aplicar técnicas de caracterização quantitativas ou semiquantitativas, como XRF e ICP-MS. Por outro lado, os métodos baseados no conhecimento fornecem estimativas do conteúdo e das concentrações de material no produto, por meio de inferências feitas com base de conhecimento e suas regras associadas.

Conforme Rotter, Chancerel e Ueberschaar (2013), uma base de conhecimento voltada para informações sobre produtos que facilitam a reciclagem centrada no produto foi proposta. A metodologia e a ferramenta associada foram aplicadas a dois tipos de produtos: unidades de disco rígido (HDD) e monitores de

cristal líquido (LCD), ambos de particular importância para a recuperação de matérias-primas críticas. Baiguera e Colledani (2016) desenvolveram um método baseado em conhecimento para prever a concentração de materiais valiosos em placas de circuito impresso (PCBs). Utilizando informações geométricas sobre os componentes eletrônicos e baseando-se em uma base de conhecimento e em equações de regressão, foi possível prever a composição material da placa analisada.

Wang *et al.* (2014) propuseram uma promissora infraestrutura de *software* baseada em nuvem para facilitar o compartilhamento de dados de produtos entre fabricantes, desmontadoras e remanufaturados. A plataforma suporta a implementação de cenários de negócios inovadores e colaborativos, nos quais o fabricante fornece ou vende o acesso às informações à desmontadora e ao remanufaturador, visando melhorar a eficiência dos processos.

2.1.2.4 Planejamento da Cadeia de Processos

O planejamento do processo de desmontagem surgiu como uma extensão da teoria de planejamento de montagem, originalmente proposta por Bourjaul (Lambert, 2006). Para determinar a sequência ideal de desmontagem e maximizar o lucro de produtos pós-uso, são necessários métodos de programação linear inteira, que podem ser ineficazes para produtos complexos (Tólio *et al.*, 2017). Contudo, a qualidade dessas soluções pode ser incerta, tornando os métodos exatos essenciais para a avaliação (Lambert; Gupta, 2008). Wang e Liu (2010) apresentaram uma das primeiras aplicações de métodos exatos para o problema de sequenciamento, utilizando gráficos de precedência de desmontagem e uma abordagem de fluxo de rede. Kang *et al.* (2001) aprimoraram esse método com gráficos AND/OR modificados e programação linear inteira. Lambert (2006) e Lambert (2007) propuseram versões adaptadas desse método, que transformam o problema de programação linear inteira em um problema de programação linear inteira binária, resolvido através de um procedimento iterativo.

No entanto, a desmontagem completa de um produto tende a ser impraticável devido a restrições técnicas, custos e às condições do produto após o uso (Santochi; Dini; Failli, 2002). A "desmontagem seletiva", que considera apenas um número limitado de caminhos de desmontagem focados em peças com potencial de recuperação, é uma abordagem mais viável (Tólio *et al.*, 2017). Contudo, há poucas

pesquisas nesta área. Métodos para sequenciamento de desmontagem seletiva baseiam-se em uma abordagem conhecida de sequenciamento de montagem (Li *et al.*, 2013; Kara; Pornprasitpol; Kaebernick, 2005).

De acordo com Tólio *et al.* (2017), na esfera do planejamento do processo de reciclagem, o objetivo é estabelecer como os materiais serão distribuídos nos fluxos de saída de uma cadeia de processo de reciclagem, baseando-se na composição conhecida dos materiais de entrada. O propósito é identificar o plano de processo ideal para atender às metas estabelecidas de recuperação e concentração para materiais valiosos específicos. Segundo Wolf *et al.* (2013), os métodos disponíveis para planejar processos de reciclagem podem ser classificados em duas categorias: (i) modelos de processos de reciclagem, que estimam o desempenho do processo com base nos parâmetros por meio de modelos físicos, e (ii) modelos de fluxo de materiais, que analisam a integração de múltiplos processos de redução de tamanho e separação ao longo de uma cadeia de processos.

Os modelos de reciclagem podem ser classificados em duas categorias principais. A primeira abrange modelos para processos de redução de tamanho, separação e refino final (Tólio *et al.*, 2017). Para a redução de tamanho, os Modelos de Balanço Populacional (PBM) são amplamente utilizados, examinando a evolução da massa dos materiais através de um processo estocástico (Bilgili; Capece, 2011). Para a separação, foram criados modelos baseados na física que medem o efeito das trajetórias das partículas, embora a maioria seja determinística e não leve em conta as interações entre partículas e equipamentos (Maraspin; Bevilacqua; Rem, 2004). Para superar essas limitações, foram recentemente desenvolvidos modelos de simulação multicorpos de fluxo granular, que utilizam Desigualdades Variacionais Diferenciais (DVI) para diminuir o tempo computacional (Colledani *et al.*, 2014). Esses modelos, uma vez validados experimentalmente, podem ser usados para otimizar os parâmetros do processo, visando um desempenho de reciclagem ideal (Borrotti *et al.*, 2016).

Sodhi *et al.* (1999) propuseram um método baseado em programação dinâmica para determinar a sequência mais eficaz para a recuperação de materiais. Ignatenko *et al.* (2008) sugeriram o uso combinado de matrizes de transformação para representar o impacto dos processos nas rotas de fluxo de materiais, juntamente com equações lineares de balanço de massa para capturar o efeito de cada etapa do processo em toda a cadeia. Na falta de modelos de processo

realistas, os parâmetros dessas matrizes precisam ser estimados por meio de análises experimentais. Os autores também destacaram a importância de uma estrutura abrangente de modelagem de partículas para conectar o *design* do produto, a liberação de material e o desempenho do sistema de reciclagem. Essa abordagem oferece um suporte mais eficaz para a implementação do conceito de reciclagem centrada no produto, que busca superar as limitações da abordagem tradicional centrada nos materiais (Tólio *et al.*, 2017).

Gutowski (2007) propôs um modelo probabilístico de separação de materiais, fundamentado no teorema de Bayes, para calcular o desempenho de processos de separação binária. Essa metodologia foi expandida para incluir processos de separação em múltiplos estágios, utilizando um modelo de rede (Wolf; Colledani; Gershwin; Gutowski, 2013). Esse modelo pode ser utilizado para auxiliar no planejamento eficaz de cadeias de processos de reciclagem e foi aplicado na avaliação de métodos de reciclagem para separação de plástico, bem como no processamento de TVs LCD no final de sua vida útil (Vanegas; Peeters; Dewulf; Cattrysse; Duflou, 2015).

2.1.2.5 Planejamento e controle de produção de desmontagem e remanufatura

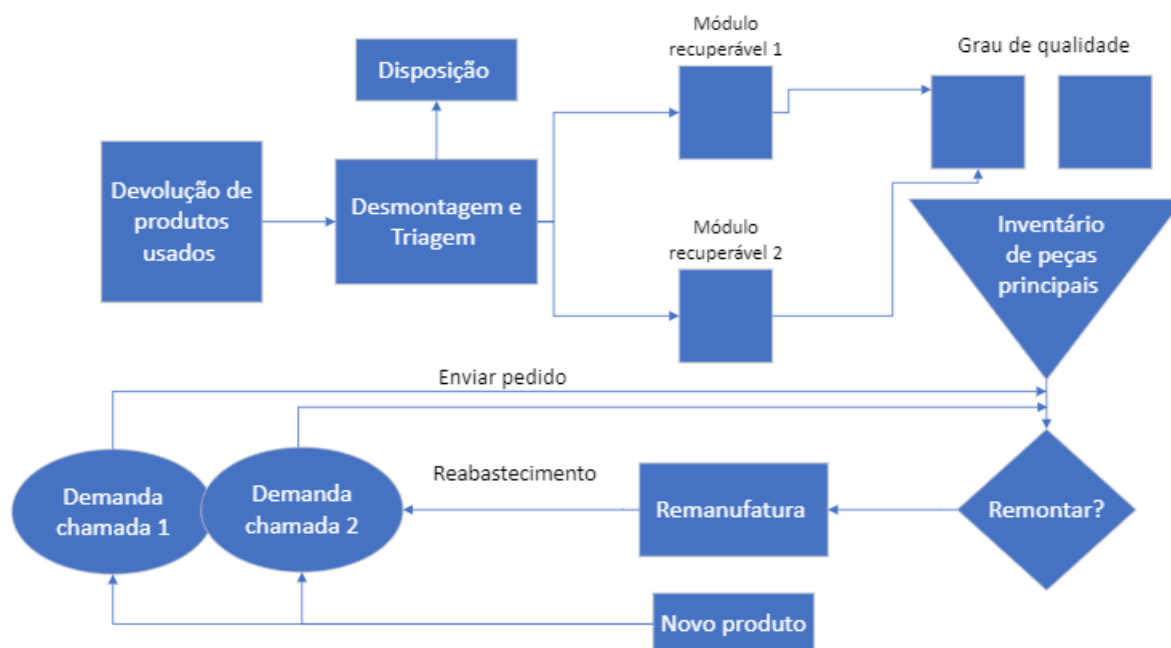
O PCP em processos de desmontagem e remanufatura enfrentam uma série de desafios, incluindo planejamento de capacidade, produção, programação e gestão de estoque (Tólio *et al.*, 2017). Esses desafios são particularmente complexos devido a diversos fatores, como flutuações na quantidade, qualidade e vida útil dos produtos destinados à reutilização ou recuperação de materiais, incompatibilidade entre oferta e demanda e a limitação na capacidade de substituição de peças regeneradas nos produtos (Kondoh; Soma; Umeda, 2007). A maioria dos modelos existentes se concentra na desmontagem independente para remanufatura ou em decisões de reciclagem (Tólio *et al.*, 2017).

Conforme Tólio *et al.* (2017), na área de desmontagem para decisões de reciclagem, há poucas contribuições disponíveis, com foco principalmente no planejamento da capacidade, especialmente no contexto do fim de vida de automóveis. Isso se deve às dificuldades no controle do processo de aquisição de produtos e à ampla adoção de produções *make-to-stock*. Lu *et al.* (2006) propôs um modelo de otimização para planejar a capacidade dos sistemas de reciclagem de veículos em fim de vida, com o objetivo de maximizar o lucro. Segundo Qu e Williams

(2008), os autores consideraram capacidade operacional, capacidade de estoque e custos no modelo de Programação Inteira Mista (MIP) proposto. Eles também expandiram o modelo para incluir o efeito de diferentes políticas de preços de aquisição em grande volume e a incerteza nos retornos. Simic e Dimitrijevic (2012) apresentaram um modelo semelhante, explorando o impacto das metas legislativas no desempenho planejado das instalações.

Para Tólio *et al.* (2017), a pesquisa aborda tanto sistemas híbridos de fabricação-remanufatura quanto sistemas exclusivos de remanufatura, destacando a importância da EC centrada no fabricante. O principal objetivo desses estudos é harmonizar as operações de fabricação e remanufatura, levando em conta a incerteza nas devoluções e na demanda pelo produto. Polotski, Kenne e Gharbi (2015) examinaram um problema de controle de produção para um sistema híbrido de manufatura-remanufatura, considerando retornos estocásticos, demanda e tempos de configuração durante a transição entre os modos de montagem e remontagem. Denizel, Ferguson e Souza (2010) realizaram um planejamento multiperíodo de remanufatura com incerteza na qualidade dos insumos, utilizando programação estocástica e considerando diferentes níveis de qualidade para produtos individuais, embora tenha ignorado a variação da qualidade em nível de módulo. Segundo Jin, Hu e Koren (2011), o problema de planejamento de remontagem e controle de estoque para um produto multimodular com incertezas de oferta e demanda foi abordado, adotando uma configuração de remontagem sob encomenda no ambiente de remanufatura, com uma formulação de processo de decisão de Markov para derivar uma política de controle de produção baseada em limites dependentes do estado. Andrew-Munot e Ibrahim (2013) propuseram modelos de simulação de planejamento de produção e estoque para testar diversas políticas de dimensionamento de lotes virtualmente antes da implementação. A Figura 3 elucida um fluxograma do processo de remontagem sob encomenda na remanufatura.

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE REMONTAGEM SOB ENCOMENDA NA REMANUFATURA



FONTE: Adaptado de Tólio *et al.* (2017).

Conforme Tólio *et al.* (2017), o equilíbrio entre oferta e demanda é crucial no contexto da reutilização de produtos por meio de reconfiguração e atualização de funções. Para implementar a reutilização, é necessário alinhar o uso original com a reutilização subsequente, considerando volume e qualidade. No entanto, do lado da demanda, os requisitos para itens reutilizados variam conforme os usuários. Do lado da oferta, a devolução dos produtos é voluntária, uma vez vendidos, o que impede os fornecedores de controlarem o volume e a qualidade dos itens devolvidos. Para resolver isso, Takata, Tsubouchi e Yoshijima (2009) sugeriram a circulação planejada ou forçada, onde os produtos permanecem propriedade do fornecedor. Esse conceito foi aplicado na reutilização de unidades de tambor fotocondutor de copiadoras. Outra estratégia é aumentar a variedade de suprimentos dos itens reutilizados, propondo a remanufatura por reconfiguração de módulos, onde módulos extraídos de produtos devolvidos de diferentes gerações são reconfigurados para atender a diversos requisitos dos usuários (Urano; Takata, 2013; Sakai; Takata, 2012). De acordo com Sakai e Takata (2011), um desequilíbrio no volume pode ocorrer devido ao descompasso entre os picos de demanda por produtos reutilizados e os picos de devolução. Portanto, é essencial selecionar

períodos de vendas apropriados para evitar excessos ou deficiências de produtos devolvidos.

Kondoh, Soma e Umeda (2007) desenvolveram um modelo de simulação que incorpora características de materiais e componentes, processos de inspeção, remanufatura e reciclagem, além de diferentes configurações de rede. O objetivo foi validar políticas de controle, considerando as implicações relacionadas ao fluxo de materiais.

2.2 A ECONOMIA LINEAR X ECONOMIA CIRCULAR

Conforme Andrews (2015), o paradigma linear teve origem no século XVIII e continua em uso até os dias atuais. Ele se baseia na contínua evolução dos processos industriais que surgiram com o advento da Revolução Industrial, bem como na diversificação e rapidez na produção. As empresas que buscam adotar abordagens circulares serão sujeitadas a criar novos modelos de negócios que transcendam as limitações do tradicional pensamento linear de soma zero (Sales; Rosa; Faria; Pedrussi; Pereira, 2019).

Para Cosenza, Andrade e Assunção (2020), durante muito tempo, a economia linear coexistiu harmoniosamente com as indústrias ao redor do mundo, seguindo uma abordagem desigual que priorizava os resultados econômicos em detrimento do meio ambiente, sem considerar o desenvolvimento sustentável. Esse modelo econômico não promove um futuro sustentável, pois opera de maneira linear, envolvendo a extração, produção, consumo e descarte, levando a um uso excessivo dos recursos naturais em um ritmo superior à sua capacidade de regeneração. Isso resulta, por um lado, na acumulação de grandes quantidades de resíduos urbanos.

Para combater o modelo econômico linear insustentável, surge o conceito de EC, que propõe uma transformação no comportamento em relação ao consumo e ao uso dos recursos naturais e resíduos (Cosenza, Andrade, Assunção, 2020). A EC contempla novos modelos de transações e parcerias empresariais, impactando não apenas as responsabilidades dos empresários, mas também seus lucros (Gonçalves, Barroso, 2019). Segundo Luz (2017), isso se dá devido à mudança de foco, com uma maior ênfase no desempenho dos serviços e produtos fornecidos ao consumidor. Os processos de reparação, manutenção, reutilização e renovação nas linhas de produção são revigorados, juntamente com transformações nas relações

empresariais, onde o produtor passa a se tornar um usuário por meio de contratos e serviços.

2.2.1 Definições da Economia Circular

A EC visa manter produtos, componentes e materiais em uso ou prontos para serem reutilizados como parte de ciclos contínuos (Rossi et al., 2020). É um modelo econômico que enfatiza a restauração e a regeneração como intenção e princípio (EMF, 2013).

Korhonen *et al.* (2018) definem a EC com base nos princípios da sustentabilidade. Segundo essa definição, os objetivos ambientais incluem a redução do consumo de matéria-prima e energia, além da minimização da geração de resíduos e emissões. Os objetivos econômicos visam a redução de riscos, custos, impostos e multas por meio das práticas ambientais, bem como a promoção da inovação através de projetos de produtos e oportunidades de mercado para as empresas.

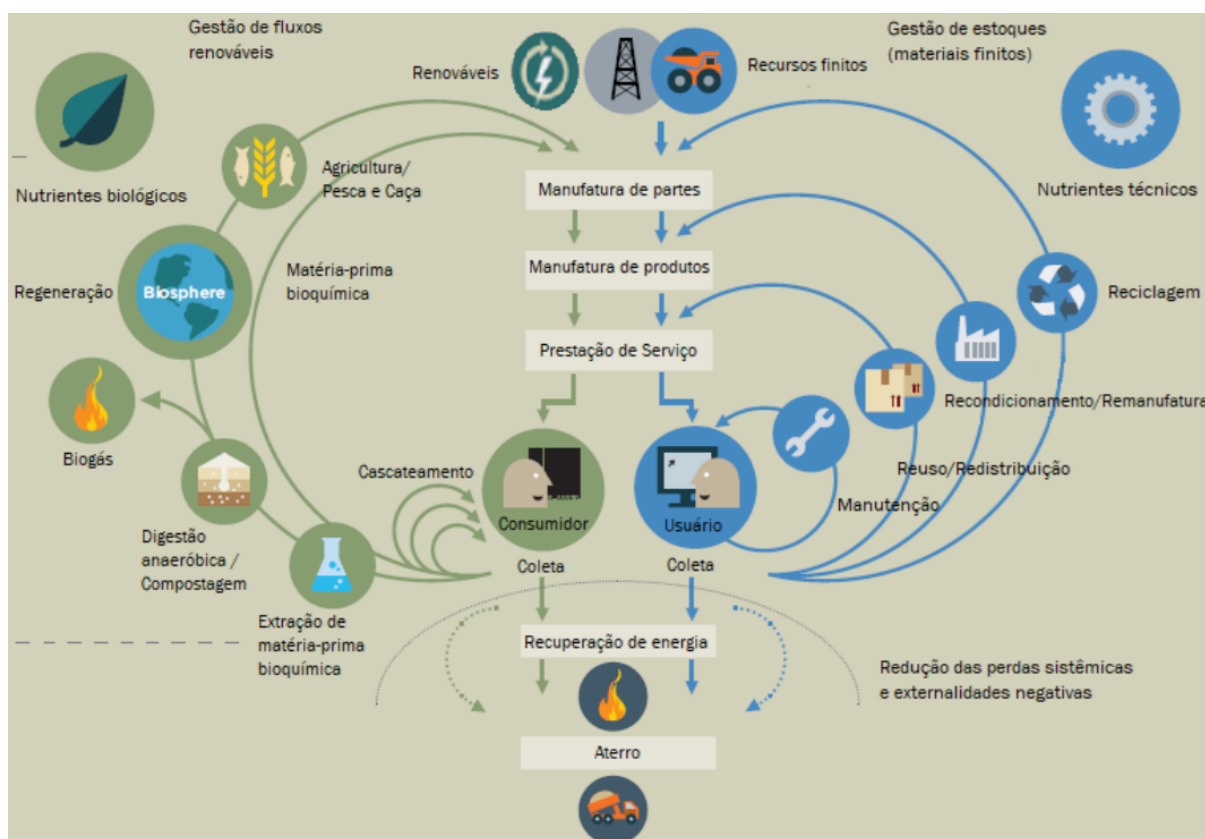
Geissdoerfer *et al.* (2017) descrevem a EC como um sistema regenerativo que visa minimizar a entrada de recursos, resíduos e emissões, bem como o desperdício de energia. Isso é alcançado reduzindo a velocidade de consumo e fechando os ciclos de materiais e energia. Essas mudanças podem ser promovidas por meio de produtos com ciclos de vida prolongados, práticas de manutenção, reparo, reuso, remanufatura e reciclagem.

A EC é caracterizada por diversos aspectos principais: i) a gestão planejada dos resíduos desde sua geração até o pós-consumo, visando a eliminação dos desperdícios e a otimização dos ciclos de remanufatura e reutilização; ii) a promoção da diversidade para aumentar a resiliência do processo, incorporando versatilidade, adaptabilidade e modularidade para equilibrar melhor as escalas de negócio; iii) a adoção de energias renováveis para alimentar os ciclos, contribuindo para a resiliência do sistema ao reduzir o uso de recursos não renováveis e preservar o capital natural; iv) a aplicação de um pensamento sistêmico que considera todas as partes interessadas interligadas; e v) a transparência na divulgação das externalidades negativas, refletindo o custo total no preço do produto (EMF, 2012; EMF, 2015).

Ellen MacArthur Foundation (2015) apresenta o modelo da borboleta, que propõe uma divisão dos fluxos de materiais em categorias técnicas e biológicas,

examinando suas interações ao longo dos processos econômicos. O modelo sugere uma mudança de perspectiva em relação aos materiais, deixando de vê-los como resíduos para valorizá-los como subprodutos ou matérias-primas secundárias na criação de novos produtos. Esses fluxos também envolvem o uso de energia, que é investida na recuperação e contribui positivamente para a regeneração dos ecossistemas, conforme a Figura 4.

FIGURA 4 – DEFINIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR



FONTE: Adaptado de EMF (2012) e EMF (2015).

O modelo borboleta é bastante utilizado por tomadores de decisão e acadêmicos. O foco está na gestão dos resíduos, na fase de término de vida dos produtos e na reintegração desses materiais de volta ao sistema produtivo (EMF, 2015).

De acordo com EMF (2015), os princípios da EC são delineados da seguinte maneira: o primeiro princípio foca na preservação e no desenvolvimento do capital natural, gerenciando estoques finitos e fluxos de recursos renováveis para promover a regeneração do sistema através dos fluxos de nutrientes internos. Selecionar os

recursos mais adequados para o projeto, assim como os processos e tecnologias mais eficazes, possibilita criar a recirculação de materiais dentro do sistema posteriormente. O segundo princípio visa maximizar o rendimento dos ciclos na EC, tanto biológicos quanto técnicos, destacando que a contribuição econômica advém da circularidade dos materiais e recursos. O objetivo é preservar a energia e o valor dos materiais utilizando ciclos mais fechados, prolongando a vida útil dos produtos e maximizando o número de ciclos e sua duração (EMF, 2015). O terceiro princípio foca na gestão das externalidades negativas do sistema, promovendo a eficácia global ao reduzir danos aos ecossistemas e à sociedade, reduzindo a poluição, melhorando o uso da terra, ar e água, além do gerenciamento de resíduos (EMF, 2015).

2.2.2 Princípios da Economia Circular

Os princípios fundamentais da EC contribuem para manter os ciclos do sistema e evitar perdas desnecessárias alinhando-se com as características essenciais desse modelo econômico (EMF, 2014). Conforme EMF (2015), eles desempenham um papel crucial na sustentação da circularidade de outros objetivos dentro do modelo de negócio circular. É essencial destacar que esses princípios orientam ações para a implementação e transição do paradigma linear para o circular.

2.2.2.1 Princípio 1: Gestão de fluxos renováveis e materiais finitos

As taxas de extração dos recursos renováveis devem estar dentro dos limites regenerativos do ecossistema. No caso de recursos limitados, o consumo deve ser reduzido, e a taxa de exploração deve ser menor que a taxa de criação de recursos renováveis substitutos. Os recursos não renováveis necessitam de capital humano para serem transformados e reincorporados ao sistema econômico, o que reforça a importância de reduzir e, se possível, eliminar o uso de recursos não renováveis no sistema (Suárez-Eiroa *et al.*, 2019).

É na fase de *design* que os resíduos são evitados, pois é o *design* que determina 80% dos impactos ambientais durante o ciclo de vida do produto (Velenturf *et al.*, 2019). Segundo Murray, Skene e Haynes, (2017), é necessário priorizar aspectos como os materiais utilizados, a forma de uso, os processos, as fontes de energia empregadas e o destino do produto após o uso. A escolha de

materiais cujos nutrientes possam ser reintegrados ao ecossistema ou, em última instância, que sejam facilmente recicláveis, é essencial. Isso ajuda na criação de produtos duradouros, reduzindo a necessidade de novos recursos para a produção e evitando impactos negativos no ecossistema e seu colapso devido à extração excessiva de capital natural.

A EC é vista como uma forma de diminuir a geração de resíduos e desacoplar o crescimento econômico do uso de recursos naturais por meio do fechamento dos ciclos, do *design* consciente dos produtos visando à extensão de sua vida útil e da preservação do capital natural para a maximização do ecossistema (Moraga *et al.*, 2019). Além disso, a EC se apresenta como uma alternativa para a recuperação de materiais, permitindo seu retorno aos sistemas de produção por meio do *design*, que planeja os resíduos futuros dos produtos e a poluição dos processos (Tam, Soulliere e Sawyer-Beaulieu, 2019).

De acordo com Millar, McLaughlin e Börger (2019), a EC busca otimizar os ciclos fechados necessários para o sistema, minimizando a extração de recursos virgens, reduzindo o desperdício e promovendo o uso de fontes de energia renováveis. O uso de combustíveis fósseis, por exemplo, compromete a capacidade de fechar os ciclos, exigindo a extração de grandes volumes de recursos naturais não renováveis para a geração de energia. A dinâmica do uso da terra e do clima é delicada; a redução da biodiversidade causada pela mudança no uso do solo, como desmatamentos e extração excessiva de nutrientes, impacta o fluxo de água e o ciclo de elementos bioquímicos essenciais para a biosfera (EMF, 2017).

Assim, o gerenciamento de energia e água no sistema é realizado pelo fechamento do fluxo de recursos renováveis, eliminando as perdas no transporte de energia e promovendo o reaproveitamento e a reciclagem de energia (Gitelman *et al.*, 2019). Para Proskuryakova e Ermolenko (2019), a gestão de recursos energéticos renováveis é essencial devido à ameaça à segurança energética, ou seja, a falha no fornecimento contínuo de recursos energéticos a um preço acessível. Essa ameaça levou as indústrias a investir em avanços tecnológicos e equipamentos de produção que aumentem o abastecimento de energia, atendam às demandas de produtividade e reduzam o impacto negativo ao meio ambiente.

2.2.2.2 Princípio 2: Ciclos biológicos e técnicos

Segundo Korhonen *et al.* (2018), o realinhamento das práticas atuais em dois ciclos, biológicos e técnicos, é crucial para a EC, pois esses ciclos permitem a reutilização de materiais e o retorno contínuo dentro do sistema. Isso reduz a necessidade de novos recursos e equilibra as demandas do ecossistema natural. A EC, por meio desse fluxo contínuo de materiais e energia, diminui o consumo de recursos virgens como entrada no sistema e reduz significativamente a geração de resíduos e emissões, ao planejar o destino dos resíduos pós-consumo de produtos e processos.

A EC mantém sua circularidade através de dois fluxos principais: o biológico, que reintegra nutrientes ao ecossistema, e o técnico, que reutiliza nutrientes através da reciclagem (EMF, 2012). A criação de valor ocorre ao aplicar esses fluxos de maneira a preservar o valor para os mesmos materiais ou para ciclos subsequentes, priorizando a valorização de ciclos curtos e locais (EMF, 2013). A gestão do fluxo é essencial para os ciclos, já que soluções locais e adaptáveis tendem a ter menor impacto ambiental do que soluções globais e complexas (Murray, Skene, Haynes, 2017).

Segundo Murray, Skene e Haynes (2017), o fluxo de materiais biológicos, ou biogeoquímicos, foi impactado pelas atividades da economia linear. Um dos principais objetivos da EC é restabelecer o equilíbrio desse fluxo, devolvendo nutrientes ao ecossistema para evitar o uso excessivo de novos recursos e equilibrar a extração com a conservação. O ciclo de nutrientes biológicos envolve materiais renováveis que podem ser reintegrados ao ecossistema natural sem causar impactos negativos, regenerando-se pelo próprio sistema (EMF, 2015). A perda de valor no ciclo biológico ocorre quando há oportunidades perdidas para maximizar o uso contínuo dos nutrientes em cascata e quando ocorre contaminação que impede seu retorno à biosfera (EMF, 2014).

O biociclo representa a conversão de recursos biológicos renováveis, utilizados em cascata de nutrientes no sistema, gerando valor agregado para a biosfera por meio de produtos de base biológica, bioenergia e insumos para outros processos produtivos (EMF, 2017).

Planejar os ciclos é crucial para manter o equilíbrio no modelo de EC, pois ajuda a evitar perdas desnecessárias de materiais, mão de obra e energia,

preservando seu valor através da renovação dos materiais nos ciclos de remanufatura, reutilização, reciclagem, entre outros (EMF, 2014). Conforme Tam, Soulliere e Sawyer-Beaulieu (2019), a etapa de reciclagem apresenta diversos desafios e falhas, como a identificação dos tipos de materiais utilizados nos produtos, a separação desses materiais, a prevenção da contaminação cruzada resultante dessa mistura de materiais, e a logística envolvida no transporte e distribuição para o mercado reverso. Esses pontos são cruciais para serem considerados durante os *trade-offs* entre a complexidade e a funcionalidade do produto no *design* do produto e processo.

2.2.2.3 Princípio 3: Gerenciamento das externalidades

O terceiro princípio do modelo de EC aborda as externalidades geradas pelo sistema. Kanda *et al.* (2019) se referem a externalidade como os efeitos significativos de uma atividade cujas consequências afetam agentes que não estão diretamente envolvidos na atividade em si. Esses efeitos podem ser positivos ou negativos: negativos quando causam danos aos agentes externos e positivos quando resultam em benefícios.

Assim, segundo EMF (2015), o principal objetivo é aumentar a eficácia do sistema ao identificar e prever as possíveis externalidades negativas geradas, enquanto destaca as oportunidades que resultam em externalidades positivas. Isso visa promover a divulgação e a transparência desses efeitos através da precificação de produtos e serviços. Ao incorporar as externalidades no preço final do produto, impulsionado pela transparência proporcionada por esse princípio, iniciativas com impacto ambiental positivo serão mais valorizadas. Dessa forma, os custos de produção serão equilibrados, o que potencialmente aumentará a aceitação do modelo de EC.

Portanto, a EC agrega maior valor ao sistema total ao manter os materiais por mais tempo dentro do ciclo, possibilitando seu reaproveitamento ao invés de perder valor por meio de técnicas como reciclagem, incineração ou descarte em aterros (Korhonen *et al.*, 2018). Conforme Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018), os ciclos internos demandam menos energia e recursos, sendo mais econômicos que os ciclos externos. Assim, é crucial maximizar o tempo que os recursos permanecem nos ciclos internos. Quanto mais tempo um produto permanecer em um ciclo ou estado, maior será o potencial de economia em relação às ações aplicadas ao

material e menores serão as externalidades associadas, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de água, toxicidade, entre outros (EMF, 2012).

De acordo com Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), uma estratégia para incorporar as externalidades produzidas pelos processos industriais é através da adoção de políticas que combinem instrumentos de comando e controle com incentivos de mercado. Essas medidas visam promover a conscientização e estimular a transição para modelos econômicos que melhor utilizem e preservem o capital natural.

2.2.3 Estratégias da Economia Circular

Bocken (2016) identificou três estratégias-chave da EC para alcançar seus objetivos. Essas estratégias principais foram delineadas com base nos trabalhos de Braungart (2008), McDonough e Braungart (2010), e Stahel (1994). As três estratégias propostas são:

- Fechar o ciclo de recursos: envolve a prática da reciclagem, que estabelece uma conexão direta entre a fase de pós-utilização e a produção, criando assim um ciclo circular de recursos.
- Estender o ciclo de recursos: envolve a criação de produtos duradouros e a implementação de medidas que prolonguem sua vida útil, como programas de manutenção e reparo. Essas práticas, como ciclos de serviço que permitem a reparação e refabricação de produtos, aumentam significativamente a vida útil dos produtos, resultando em um fluxo mais lento de recursos.
- Estreitamento do ciclo de recursos: é uma estratégia que difere das anteriores, pois não se concentra apenas na extensão da vida útil dos produtos, mas sim na redução do consumo de recursos por unidade de produto. Essa abordagem visa diminuir os fluxos de recursos utilizados na produção, resultando em uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis.

Conforme Stahel (1994), o conceito de "fechar o ciclo" implica reciclar materiais, estabelecendo uma ligação direta entre os resíduos pós-consumo e a produção. No entanto, a reciclagem não influencia a velocidade com que os recursos ou produtos circulam na economia. Segundo Bocken (2016), a estratégia de "estretar os ciclos" se diferencia das abordagens para desacelerar os ciclos de

recursos, pois não afeta a velocidade com que os produtos fluem no sistema e não envolve a implementação de ciclos de serviços. A eficiência de recursos tem sido efetivamente integrada em modelos de negócios lineares, e as estratégias existentes de eficiência de recursos podem ser combinadas com a extensão da vida útil do produto e a reciclagem para criar um sistema circular. É importante notar que, embora as consequências finais de "desaceleração" e "estreitamento" sejam semelhantes, a desaceleração está vinculada ao tempo, enquanto o "estreitamento" aceita a velocidade dos fluxos de recursos. Essa distinção é uma das críticas dirigidas a uma abordagem focada apenas na eficiência, que tende a favorecer o "estreitamento". Sem considerar o tempo, a busca pela eficiência de recursos pode resultar em uma aceleração ainda maior dos fluxos lineares de recursos, levando a poucas economias globais significativas.

2.2.4 Modelos da Economia Circular

Conforme Suárez-Eiroa (2019), existem modelos que expandem o conceito de EC proposto pela Fundação Ellen MacArthur, todos derivados dos objetivos fundamentais da EC. Um desses modelos incorpora sete princípios operacionais, divididos em três categorias distintas:

- Operacionais-alvo: Estes representam os objetivos essenciais da economia circular.
- Operacionais fundamentais: Eles encapsulam a essência da EC e são cruciais para a sua implementação.
- Operacionais transversais: Estes auxiliam na execução eficaz do modelo, fornecendo diretrizes adicionais e práticas recomendadas.

Para Suárez-Eiroa (2019), a categoria operacional-alvo é subdividida em dois princípios: regulamentação das taxas de entrada e saída dentro do modelo de EC. Essas regulamentações são projetadas para gerenciar os recursos renováveis, garantindo que suas taxas de utilização estejam alinhadas com as taxas de regeneração do ecossistema. Enquanto isso, os recursos não renováveis são utilizados com base nas taxas de absorção do ecossistema, com foco na diminuição e eventual eliminação de seu uso. Segundo EMF (2012), essa adaptação das taxas proposta pela categoria operacional-alvo se integra aos princípios da EC, os quais visam preservar o desenvolvimento do capital natural do ecossistema e a gestão dos

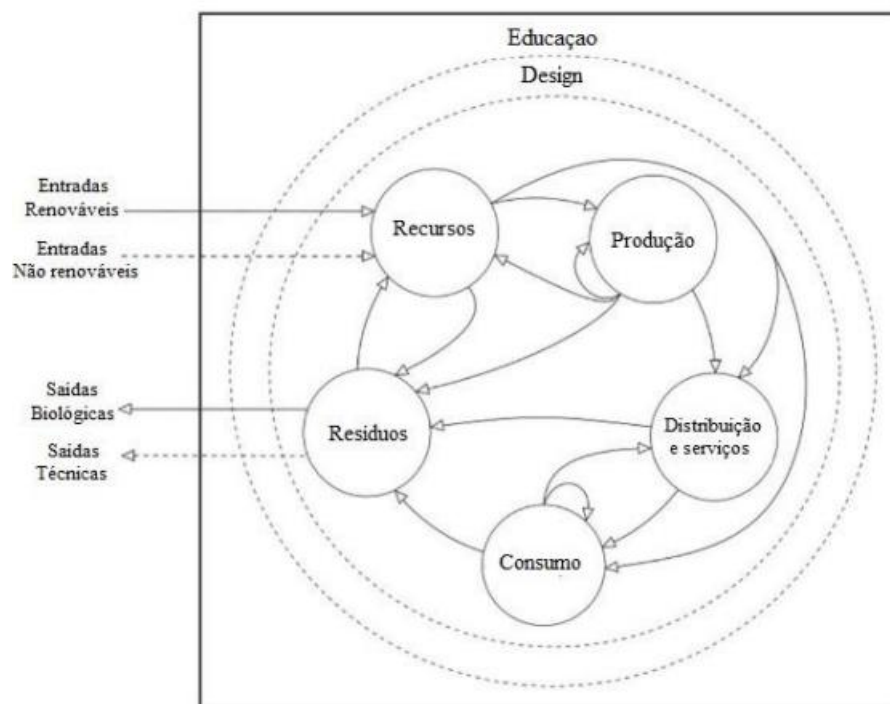
resíduos pós-consumo. Esses princípios auxiliam na redução da extração de matérias-primas e na gestão eficaz dos materiais descartados após o consumo.

De acordo com Suárez-Eiora (2019), a categoria operacional fundamental foi desdobrada em três princípios que ilustram a essência do modelo de EC. Esses princípios são os seguintes: i) fechamento do sistema: este princípio implica a conexão direta entre a gestão dos resíduos pós-consumo e a aquisição de novos insumos, garantindo que os materiais descartados sejam reintroduzidos no ciclo produtivo; ii) preservação do valor do recurso no sistema: envolve o aproveitamento máximo dos recursos ao longo de vários estágios da fabricação, com o objetivo de manter esses recursos em ciclos próximos ou até mesmo aumentar a durabilidade dos produtos através de práticas como reutilização e reparo por parte dos consumidores; iii) redução da quantidade de recursos em circulação no sistema: este princípio visa reduzir a quantidade total de recursos utilizados, promovendo mudanças na sociedade e incentivando a adoção de práticas sustentáveis por parte de todos os envolvidos, desde os fabricantes até os consumidores finais.

Por último, segundo Suárez-Eiroa (2019), a categoria operacional-transversal se desdobra em dois princípios cruciais que contribuem para o êxito do modelo de EC: i) *Design*: este princípio permeia diversas etapas do modelo de EC, desde a concepção de produtos sustentáveis, que servem como insumos para o modelo, até a escolha de materiais não tóxicos e a implementação de características modulares que facilitam a recuperação em outros ciclos de processos. Isso influencia positivamente a maneira como os produtos são descartados após o consumo, promovendo práticas mais responsáveis e sustentáveis; ii) Educação: este princípio destaca a importância da educação como um instrumento fundamental para impulsionar a mudança de paradigma na estrutura social e econômica. Ao promover a conscientização e o engajamento da sociedade em relação aos princípios da EC, é possível mobilizar ações que contribuam para a transição para um modelo mais sustentável e resiliente.

Ao identificar e compreender os princípios operacionais transversais, abrangem e facilitam o sucesso do modelo de EC como um todo (Suárez-Eiroa, 2019), conforme ilustrado na Figura 5.

FIGURA 5 – ECONOMIA CIRCULAR



FONTE: Suárez-eiroa (2019).

Eles conseguiram simplificar e tornar operacional o modelo de EC, facilitando sua implementação em diversas escalas. Isso é especialmente relevante, uma vez que o modelo proposto pela fundação Ellen MacArthur é de natureza macro, o que apresenta desafios em termos de sua aplicação em níveis mais específicos e práticos (Suárez-eiroa, 2019).

2.3 INTERAÇÃO ENTRE A EC E PCP

O PCP muitas vezes não considera adequadamente os aspectos relacionados à sustentabilidade, como a EC (Giret, Trentesaux e Prabhu, 2015). Conforme Zarte, Pechmann e Nunes (2022), integrar preocupações sustentáveis nas decisões de planejamento adiciona complexidade, mas é crucial para alinhar os objetivos de produção com metas ambientais, sociais e econômicas. Para tomar decisões sustentáveis, é necessário analisar detalhadamente os custos específicos de produção, as emissões de gases de efeito estufa e a segurança dos trabalhadores. Essa integração dos aspectos sustentáveis pode garantir que o processo de produção seja guiado por princípios de responsabilidade social, práticas ambientalmente conscientes e sucesso econômico a longo prazo.

Segundo Dekker, Fleischmann, Inderfurth e Van Wassenhove (2013), as operações de produção ligadas à EC envolvem uma interação entre os fluxos de materiais reversos e diretos, influenciando diretamente o processo de PCP. Isso abrange duas áreas principais: primeiro, o planejamento da recuperação e aquisição de matéria-prima; segundo o planejamento das atividades de produção necessárias para converter os materiais de entrada em produtos acabados, atendendo às demandas dos clientes. Isso inclui tanto produtos remanufaturados quanto novos.

De acordo com Zarte, Pechmann e Nunes (2022), embora a sustentabilidade seja um aspecto crucial da indústria atual, afetada diretamente pelos processos e escolhas no PCP, ela transcende os limites dessa esfera e permeia todos os aspectos da vida. Integrar os três pilares da sustentabilidade (ambiental, econômico e social) em todos os processos, desde a produção até a administração pública, é uma tarefa complexa e desafiadora. A EC não se restringe apenas ao meio ambiente; também envolve critérios econômicos e sociais que devem ser equilibrados para alcançar um desenvolvimento sustentável global.

2.3.1 Ferramentas da Gestão Ambiental

Unal e Shao (2019) destacam que a literatura contém diversos modelos de estratégia com base na abordagem das capacidades competitivas pelas empresas no ambiente da EC. Nas subseções seguintes, serão apresentadas algumas dessas estratégias.

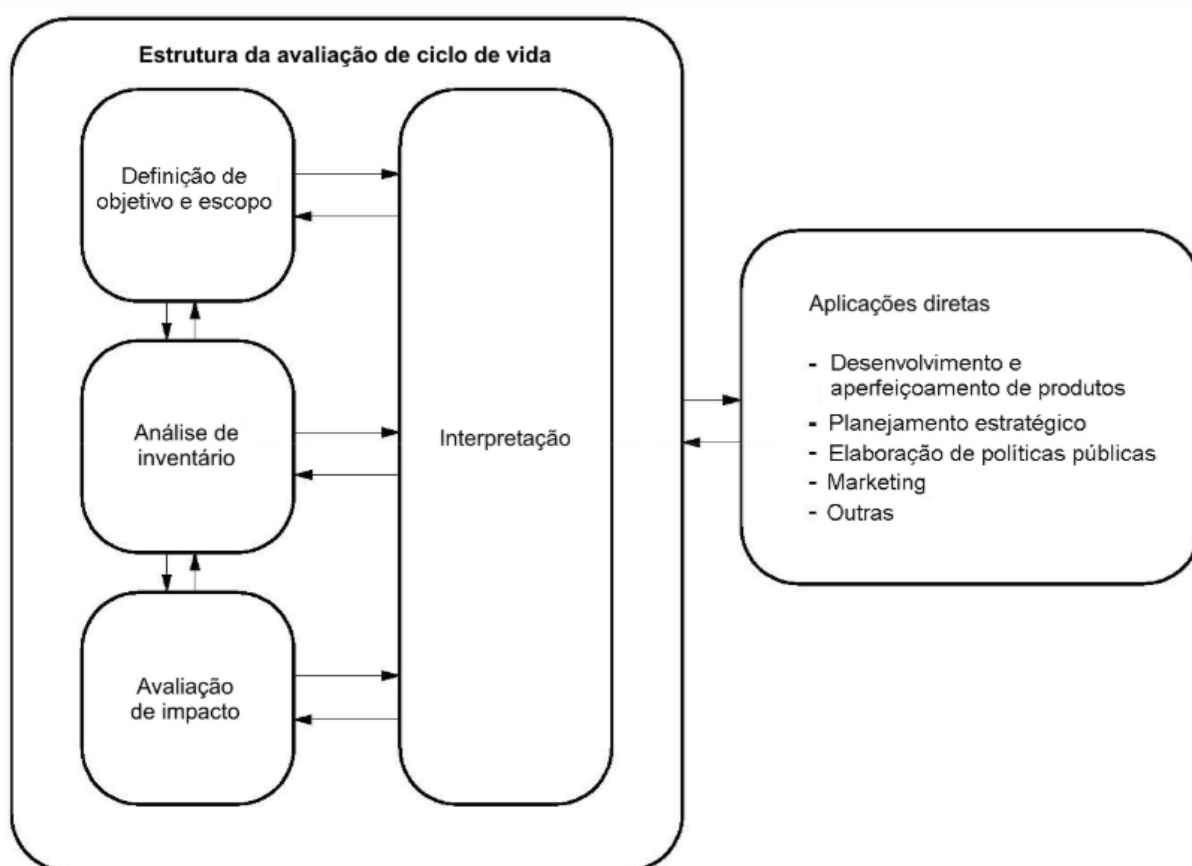
2.3.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida

De acordo com Contartesi, Melchiades e Boschi (2019), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) deve ser utilizada como um instrumento para identificar, dentro de uma análise abrangente do processo, as etapas mais críticas, conhecidas como *hotspots*. Com essas informações, é possível identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental e reduzir os impactos, visando implementar ações que tornem o processo e os produtos mais sustentáveis. Segundo a norma ISO 14040:2006, que estabelece seus princípios e estrutura, ACV é uma técnica para compilar e avaliar as entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. É possível mapear os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto ou processo ao longo de seu ciclo de vida.

Segundo Coelho Filho, Saccarro Junior e Luedemann (2015), o processo de condução de um estudo de ACV consiste em quatro etapas, onde a primeira e a última realizam uma análise qualitativa, enquanto a segunda e a terceira realizam uma análise quantitativa. Conforme Marques, Gomes e Kern (2016), essas quatro etapas da ACV são divididas em: determinação do objetivo e escopo, onde se define a abrangência, domínio do trabalho, métodos e unidade funcional; análise do inventário, onde são obtidas as informações e analisados os impactos estipulados pelos indicadores, possibilitando a avaliação das informações.

Conforme a norma NBR ISO 14040:2009, a avaliação deve incluir as seguintes etapas: (1) definição do objetivo e do escopo, (2) análise do inventário, (3) avaliação dos impactos e (4) interpretação dos resultados. As etapas são descritas na Figura 6.

FIGURA 6 – ETAPAS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA



FONTE: ABNT NBR ISO 14040/2009.

2.3.1.2 Ecoeficiência

Para atender à necessidade de aumentar a eficiência no uso dos materiais na fabricação, foram desenvolvidas diversas estratégias, incluindo planos, métodos e séries de ações (Shahbazi *et al.*, 2016). Uma dessas estratégias é a ecoeficiência. Segundo Shahbazi *et al.* (2016), aumentar a ecoeficiência é fundamental para reduzir a geração de grandes volumes de resíduos industriais, a extração e o consumo de recursos, além da demanda por energia e as emissões de carbono. A geração de resíduos industriais e o consumo de matérias-primas são preocupações críticas devido ao seu impacto ambiental, especialmente com o crescimento da população global e o aumento da demanda por produtos. Conforme Peck e Chipman (2007) e Abdul Rashid *et al.* (2008), a ecoeficiência refere-se à quantidade de material utilizada na fabricação de um produto e pode ser aprimorada por meio de práticas de fabricação que utilizem menos materiais por produto ou gerem menos resíduos por produto.

2.3.1. Simbiose Industrial

A simbiose industrial envolve uma abordagem sistêmica para os fluxos de materiais e energia dentro dos sistemas industriais locais (Sokka *et al.*, 2011). Segundo Ding e Hua (2012), a aplicação do pensamento sistêmico e do ciclo de vida é crucial para o desenvolvimento de parques eco industriais, considerando a sustentabilidade, a economia de baixo carbono, a química e a engenharia verde, bem como o uso de resíduos como matérias-primas valiosas. O planejamento e desenvolvimento de sistemas eco industriais devem focar na ciência, tecnologia, sociedade, meio ambiente e economia, além de adotar práticas de produção mais limpa, produção verde, indústrias ambientalmente amigáveis e gestão do ciclo de vida (Zhao *et al.*, 2008). Jensen *et al.* (2011) observaram que tanto as forças econômicas quanto as ambientais criarão oportunidades para o desenvolvimento eco industrial. Os principais motores da simbiose industrial incluem o acesso ao conhecimento local transferível e a disposição das empresas em participar de programas de oportunidades de negócios. Um coordenador nacional independente (uma entidade financiada externamente com processos claramente definidos) é essencial para facilitar a cooperação industrial, incluindo a coleta e síntese do conhecimento operacional industrial em oportunidades identificadas para a eficiência

dos recursos regionais (Jensen *et al.*, 2011). Bain *et al.* (2010) estudaram a simbiose industrial e concluíram que 90% dos resíduos industriais são reutilizados em operações dentro de um raio de 20 km da área industrial, e que dois terços desse montante são diretamente encaminhados para outros agentes econômicos para reutilização.

2.3.1.4 Ecodesign

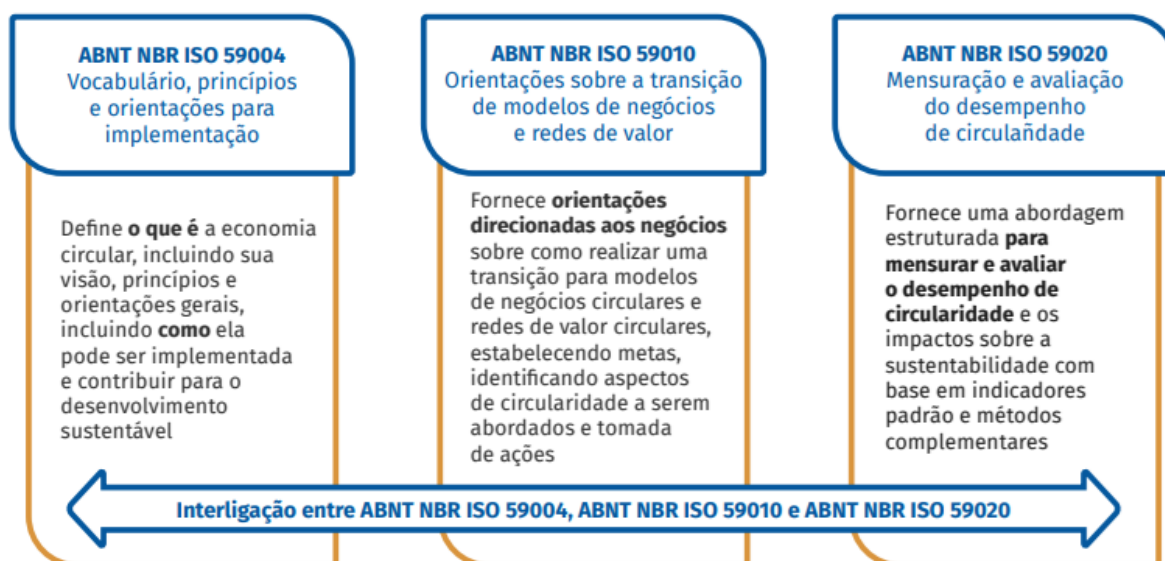
Conforme Bocken *et al.* (2016), projetar produtos de longa duração é uma grande estratégia de *design* para desacelerar os ciclos de recursos, focando em garantir um longo período de uso dos produtos. "*Design* para durabilidade" refere-se à resistência física, ou seja, ao desenvolvimento de produtos que possam suportar o desgaste sem quebrar. A escolha de materiais duráveis é uma parte crucial desse processo de *design*. "*Design* para confiabilidade" envolve projetar produtos com alta probabilidade de funcionarem durante um período especificado sem falhas, desde que mantidos de acordo com as instruções do fabricante (Moss, 1985). Testar o produto para simular o uso normal pode ajudar a verificar sua confiabilidade (Bocken *et al.*, 2016).

Segundo Bocken *et al.* (2016), outra estratégia de design para diminuir os ciclos de recursos é conhecida como "*Design* para prolongamento da vida útil do produto". Esta abordagem visa estender o tempo de uso dos bens através da implementação de ciclos de serviço que ampliam a vida útil do produto. Isso inclui a possibilidade de reutilização do produto, manutenção, reparo, atualização técnica ou uma combinação dessas práticas.

2.3.1.5 Série ABNT NBR ISO 59000

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), organização responsável por estabelecer padrões técnicos no Brasil, implementou as três primeiras normas de economia circulares publicadas em 2024 (Confederação Nacional da Indústria, 2024), conforme a Figura 7.

FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE AS TRÊS NORMAS



FONTE: Confederação Nacional da Indústria, adaptado da ABNT NBR ISO 59004 (2024).

Segundo a Confederação Nacional da Indústria, (2024), a transição para uma EC é um processo contínuo e único para cada organização, seja uma empresa, um grupo de empresas ou outras instituições. Existem diferentes graus de circularidade e níveis de implementação de práticas de EC nos processos, produtos e serviços das organizações. Em cada caso, as estratégias adotadas apresentam características distintas, e os resultados só podem ser avaliados em relação à própria evolução da organização ao longo do tempo. São soluções que incorporam atributos de circularidade, cuja relevância varia conforme o contexto ou necessidade específica.

3 MÉTODOS DE PESQUISA

Neste capítulo será apresentado a metodologia utilizada para realização da revisão sistemática da literatura, abrangendo a classificação da pesquisa, os procedimentos para desenvolvimento da revisão sistemática, planejamento da pesquisa, os passos para coleta, análise e tabulação de dados.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa pode ser classificada, conforme a finalidade, como básica, pois, segundo Kendall (2003), a pesquisa básica visa à obtenção de novos conhecimentos que promovam o avanço da ciência, sem uma aplicação prática imediata prevista. Nela, o pesquisador reúne informações e conhecimentos que, eventualmente, podem resultar em descobertas acadêmicas ou aplicações significativas. De acordo com os objetivos, a pesquisa pode ser adequar como exploratória, pois aproxima o pesquisador do tema, tornando-o mais familiarizado através das pesquisas bibliográficas. Conforme Gil (2002), as pesquisas exploratórias têm como propósito ajudar o pesquisador a se familiarizar com o problema em estudo, possibilitando a construção de hipóteses ou a clarificação da questão.

Essa revisão bibliográfica segue o procedimento sistemático, pois, conforme Cook *et al.* (1997), a revisão sistemática aplica métodos com maior rigor científico, o que possibilita a obtenção de resultados mais robustos e a diminuição de erros e vieses do pesquisador. Isso permite compilar dados, refinar hipóteses, estimar o tamanho de amostras, definir de maneira mais precisa o método de pesquisa a ser utilizado e, finalmente, estabelecer direções para futuras investigações.

A pesquisa adota uma abordagem mista, qualitativa e quantitativa. Inicialmente, será conduzida qualitativamente, com o pesquisador analisando os dados de forma indutiva em relação à pesquisa e seleção dos trabalhos científicos. Em seguida, para a análise e apresentação dos resultados, a abordagem será quantitativa, utilizando recursos e técnicas estatísticas (Silva e Menezes, 2005). Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa utiliza a revisão bibliográfica para o desenvolvimento do projeto, baseando-se em material já existente, como livros, artigos científicos, artigos de periódicos e materiais disponíveis na internet, conforme descrito por Gil (2002).

3.2 PROCEDIMENTO PARA REVISÃO DE LITERATURA

Este tópico detalha os procedimentos abordados por Conforto *et al.* (2011) para a realização da revisão da literatura, desenvolvida com base no método da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). Conforme Brereton *et al.* (2005), uma revisão sistemática permite ao pesquisador conduzir uma avaliação rigorosa e confiável das pesquisas realizadas sobre um tema específico. A RBS é uma ferramenta utilizada para mapear os trabalhos publicados em um campo de pesquisa específico, possibilitando ao pesquisador sintetizar o conhecimento existente sobre o assunto (Biolchini *et al.*, 2007). O objetivo é alcançar maior qualidade nas buscas e nos resultados da revisão bibliográfica, compreendendo o "estado da arte" do tema estudado. Para tanto, é essencial seguir um conjunto específico de procedimentos, etapas, técnicas e ferramentas (Conforto *et al.*, 2011).

Para realizar a revisão sistemática, foi adotado neste trabalho a adaptação proposta de Levy e Ellis (2006). Sethi e King (1998, conforme citado por Levy e Ellis, 2006) descrevem a revisão sistemática como um processo estruturado em uma sequência de etapas e atividades. Conforto *et al.* (2011) descreve que para alcançar os resultados esperados, os autores dividem o processo em três fases principais: Entrada, Processamento e Saída. Na fase de "Entrada", são coletadas as informações preliminares que serão processadas posteriormente, como artigos clássicos da área de estudo, livros-texto que abrangem o conhecimento do campo, e artigos de referência recomendados por especialistas. Essa fase também inclui a elaboração do plano de execução da revisão sistemática, conhecido como protocolo da RBS, um documento que especifica o processo, técnicas e ferramentas a serem empregadas na fase seguinte (Processamento). A fase de "Saída" culmina na produção de relatórios e, sínteses dos resultados. A Figura 8 ilustra essas três fases de uma revisão sistemática, conforme a proposta de Levy e Ellis (2006).

FIGURA 8 – FASES PARA UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EFICAZ

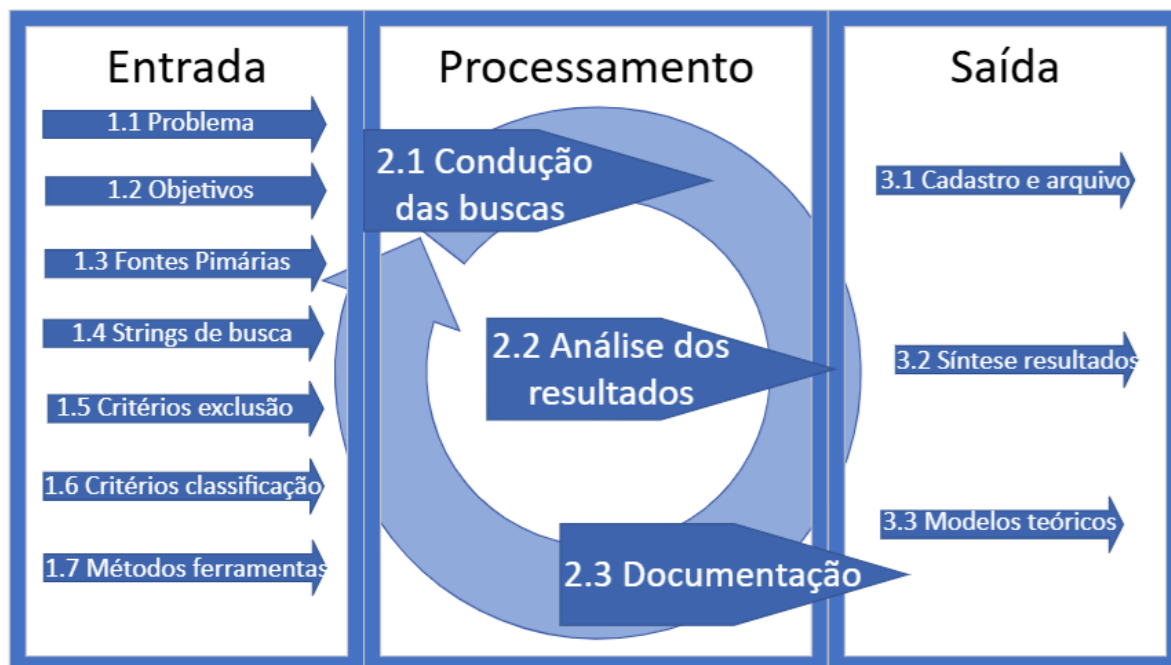


FONTE: Conforto *et al.* (2011), adaptado de Levy e Ellis (2006).

O modelo enfatiza a importância de conduzir a RBS em ciclos, contendo no processamento seis etapas conforme representado na figura. À medida que o entendimento sobre o tema se aprofunda, os ciclos são executados de maneira mais eficaz. Esse processo é repetido conforme necessário até que os objetivos da pesquisa bibliográfica sejam plenamente atingidos (Conforto *et al.* 2011).

Para a condução da revisão sistemática, foi utilizado um roteiro intitulado como RBS *Roadmap*, que está organizado em fases e etapas, sendo 15 etapas distribuídas em 3 fases (Entrada, Processamento e Saída). Na Figura 9 demonstra as fases e etapas do RBS *Roadmap*.

FIGURA 9 - MODELO PARA REALIZAR A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE FORMA SISTEMÁTICA



FONTE: Adaptado de Conforto *et al.* (2011).

3.2.1 Entrada

- 1.1 Problema: a etapa inicial da revisão sistemática busca formular o problema, respondendo uma ou mais perguntas específicas, a fim de orientar melhor as pesquisas na literatura (Conforto *et al.*, 2011). Nesse sentido, foi definido duas questão de pesquisa: “Como a interação entre práticas de PCP e EC tem sido abordada na literatura?” e “Quais adaptações são necessárias no PCP para se adequar às necessidades da EC?”.
- 1.2 Objetivos: os objetivos da RBS devem ser estruturados conforme os objetivos da pesquisa, além de serem claros e factíveis (Conforto *et al.*, 2011). Sabendo disso, este trabalho teve como objetivo identificar as adaptações permitidas no PCP para se adequar às necessidades da EC. Realizou-se uma RBS com bases de dados para identificar as adaptações necessárias ao PCP para adotar a EC. Utilizou-se o trabalho de Jabbour *et al.* (2019) para verificar todos os artigos

indicados na coluna do PCP da tabela 1 (Resumo das implicações da EC para a tomada de decisão de gestão de operações), e foi feita uma RBS complementar para averiguar se existiam outros artigos que não foram identificados por Jabbour *et al.* (2019).

- 1.3 Fontes primárias: As fontes primárias são compostas por artigos, periódicos e bases de dados que auxiliam na definição de palavras-chave, além de identificar os principais autores e os artigos mais relevantes (Conforto *et al.*, 2011). Esta pesquisa buscou utilizar a mesma base de dados de Jabbour *et al.* (2019) e, para ampliar a base de dados, utilizou o Banco de dados *Scopus* e *Scielo*.
- 1.4 *Strings* de busca: segundo Conforto *et al.* (2011), para elaborar a *string* de busca, é fundamental identificar as palavras e termos relacionados ao tema de pesquisa. Isso pode ser realizado por meio de um estudo preliminar de artigos e pela consulta a especialistas e pesquisadores da área. Neste trabalho a *string* de busca incluiu todos os termos relacionados aos tópicos principais em três grupos:
 - a) Grupo 1: “Economia circular.”
 - b) Grupo 2: “Planejamento e controle de Produção.”
 - c) Grupo 3: “Gestão de operações e Economia circular.”

A consulta utilizada na base de dados, conforme o título, resumo e palavras-chave foi a seguinte:

TITLE-ABS-KEY ((“Economia circular”) AND (“Gestão de operações” OR “PCP”)).

- 1.5 Critérios de inclusão e exclusão: para definir os critérios de inclusão dos artigos, é essencial considerar os objetivos da pesquisa (Conforto *et al.*, 2011). Este estudo utilizou tanto os critérios de inclusão quanto os critérios de exclusão, que são:
 - i. Critérios de inclusão: artigos que apresentam o tema de EC, Gestão Operacional e PCP como central da pesquisa, bem como artigos de revistas científicas revisadas por pares.
 - ii. Critérios de exclusão: artigos cujos textos completos não estavam em inglês ou português. Além disso, algumas áreas

com menor relevância a para o tema da pesquisa (Engenharia Química, Química, Bioquímica, Genética e Biologia Molecular, Ciências Agrárias e Biológicas, Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica, Física e Astronomia, Medicina, Matemática, Psicologia e Terra e Ciências Planetárias).

- 1.6 Critérios de qualificação: a aplicação de critérios de qualificação de artigos é particularmente útil para avaliar a relevância de cada artigo para o estudo (Conforto *et al.*, 2011). Para os critérios de qualificação, foram definidos o método de pesquisa utilizado, a quantidade de citações do artigo e o fator de impacto da revista que o artigo foi publicado.
- 1.7 Métodos e ferramentas: a definição do método de pesquisa e das ferramentas abrange estabelecer as etapas para conduzir as pesquisas, determinar os filtros a serem aplicados, definir como serão realizadas as buscas em periódicos e bases de dados, e decidir como os resultados serão armazenados, entre outros aspectos (Conforto *et al.*, 2011). Nesta pesquisa foram feitas através do *software* Start (State of the Art through Systematic Review) como ferramenta para sintetizar e filtrar os artigos relacionados ao tema pesquisado, onde as etapas e filtragem estabelecidas são apresentadas na seção 3.2.2. Além disso, aplicou uma *String* de busca, conforme a seguir:

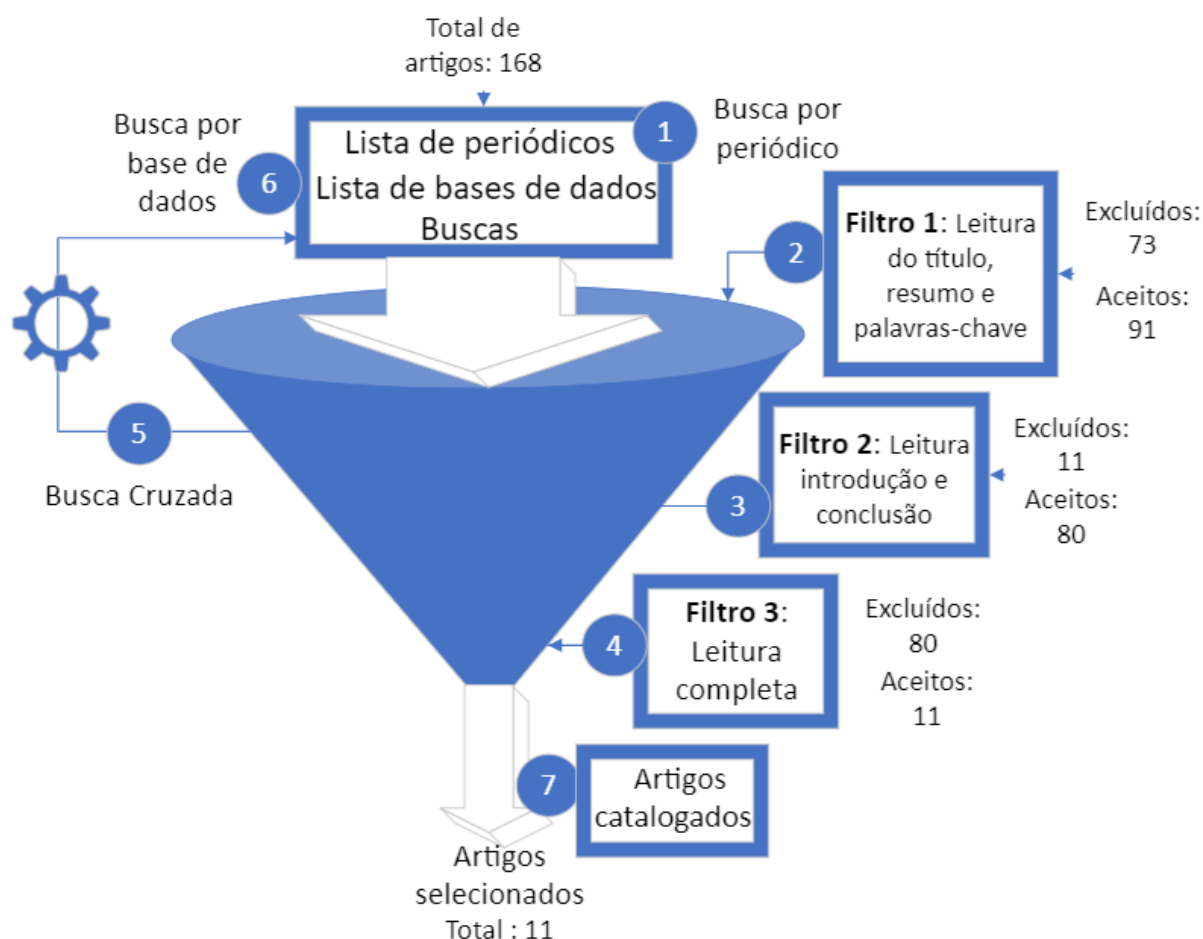
TITLE-ABS-KEY (("Circular Economy") AND ("Operations Managemen" OR "Production Planning and Control")).

3.2.2 Processamento

Para realizar a condução das buscas, a análise dos resultados e a documentação (2.1, 2.2 e 2.3), os dados retornados foram exportados em formato BibTeX e importados para a ferramenta de análise auxiliar, o Start, desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Tendo como suporte a ferramenta Start, as etapas 2.1, 2.2 e 2.3 seguiram um processo com 7 passos, de acordo com a Figura 10.

FIGURA 10 – PROCEDIMENTO DA FASE DE PROCESSAMENTO, RBS ROADMAP



FONTE: Adaptado de Conforto *et al.* (2011).

Na etapa 2.1 foram realizadas as buscas, de acordo com os passos 1, 5 e 6. Na etapa 2.2, foi feita a leitura e análise dos resultados, ou seja, as etapas dos filtros 2, 3 e 4. Finalmente, na 2.3, foi realizado a documentação e arquivamento dos artigos selecionados nos filtros, bem como a filtragem e o resultados das buscas, segundo os passos 2,3,4 e 7.

Para realizar as etapas de filtragem 2,3 e 4, foi considerado os mesmos processos de Jabbour *et al.* (2019), conforme os critérios de inclusão e exclusão detalhadas a seguir:

- Seleção 1: Com a filtragem da base de dados *Scopus* e *Scielo*, para facilitar as buscas, limitou-se em considerar somente artigos dos últimos cinco anos (2019-2023) e revistas científicas revisadas por

pares. Logo, os artigos de congressos, trabalhos, resenhas de livros e comentários foram excluídos. Foram desconsiderados os artigos cujos os textos completos não estavam em Inglês ou Português. Além disso, foram excluídas algumas áreas com menor relevância para o tema de pesquisa (Engenharia Química, Química, Bioquímica, Genética e Biologia molecular, Ciências Agrárias e Biológicas, Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica, Física e Astronomia, Medicina, Matemática, Psicologia e Terra e Ciências Planetárias) (Jabbour *et al.*, 2019).

- Seleção 2: Nessa seleção foi feita a leitura do título, palavras-chaves e abstrato dos artigos, identificando quais artigos deveriam ser aceitados ou rejeitados da análise. Os artigos que não continham as ideias de EC relacionadas as atividades de PCP foram rejeitados. Também foram excluídos os artigos que não permitiram acesso ao texto completo ou não estavam publicados em periódicos revisados por pares (Jabbour *et al.*, 2019).
- Seleção 3: Foi feita a leitura do texto completo, analisando detalhadamente as principais contribuições da EC no âmbito da área de PCP, no qual foram rejeitados os artigos que não se adequaram no tema dessa pesquisa. Os principais critérios de exclusão nessa seleção foram os seguintes: Revisões de literatura sobre EC que não focaram nas atividades relacionadas a PCP e não apresentaram novas contribuições, artigos com especializações em áreas como processos químicos, ciências dos materiais, alimentos e construção e artigos voltados para políticas públicas e educação. A sequência seguida incluiu: eliminação de artigos duplicados, exclusão de anônimos, exclusão de livros e capítulos de livros, análise de títulos, análise de resumos e verificação da disponibilidade dos artigos (Jabbour *et al.*, 2019).

3.2.3 Saída

Ao final do roteiro RBS *Roadmap* consistiu em 3 etapas:

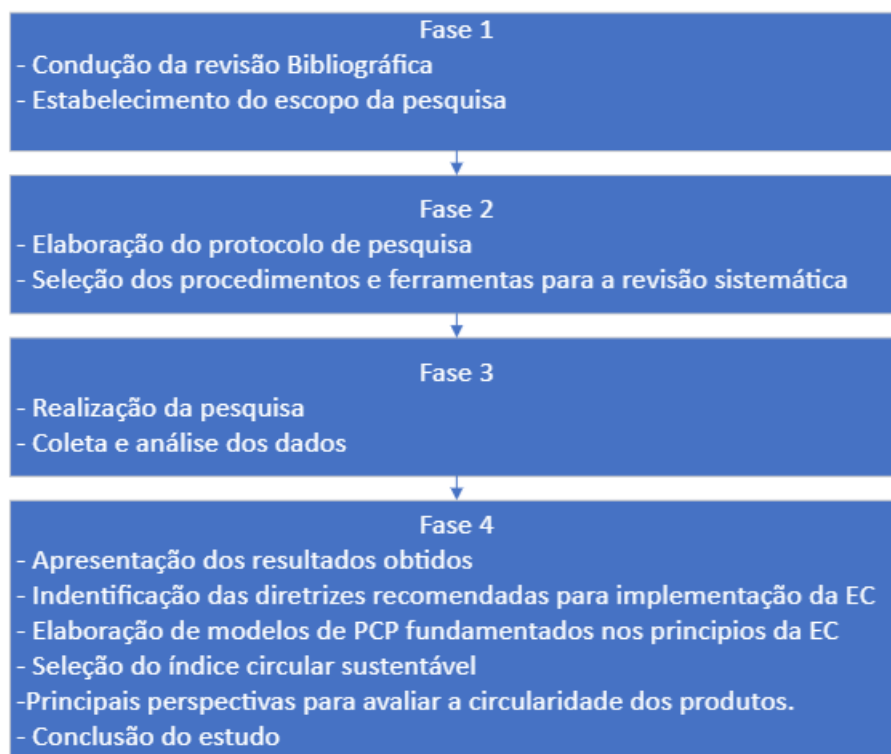
- 3.1 Cadastro de arquivo: os artigos selecionados no Filtro 3, analisados e interpretados foram incluídos e armazenados no repositório de artigos.
- 3.2 Síntese e resultados: nessa etapa foi elaborado uma síntese e resultados da bibliografia estudada.
- 3.3 Modelos teóricos: Foi elaborado o resultado final da RBS. Para a construção dos modelos teóricos baseou-se nos resultados da RBS e a síntese do tema estudado.

3.3 PROTOCOLO DA PESQUISA

3.3.1 Planejamento da pesquisa

O presente estudo está estruturado em quatro fases, conforme ilustrado na Figura 11, onde cada fase são detalhadas as ações previstas para o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

FIGURA 11 – FASES DA PESQUISA



FONTE: A autora (2024).

Fase 1: Nesta fase, é realizada a pesquisa de literatura utilizando artigos, teses e livros para fornecer embasamento sobre o tema investigado. Ainda na primeira fase, o tema de pesquisa e o escopo do projeto é definido, incluindo os objetivos gerais e específicos.

Fase 2: Esta fase do estudo é uma das mais importantes, pois o planejamento do protocolo de pesquisa abrange todas as etapas que serão realizadas na RBS. São estabelecidos os objetivos gerais e específicos, bem como a estratégia de busca, que inclui a pergunta de pesquisa, as bases de dados, os termos de busca, os critérios de inclusão e exclusão, os tipos de estudos pretendidos e os critérios de qualidade aceitos. Nesta fase, são escolhidos os procedimentos e ferramentas para a revisão, conforme descrito no capítulo 3.2.

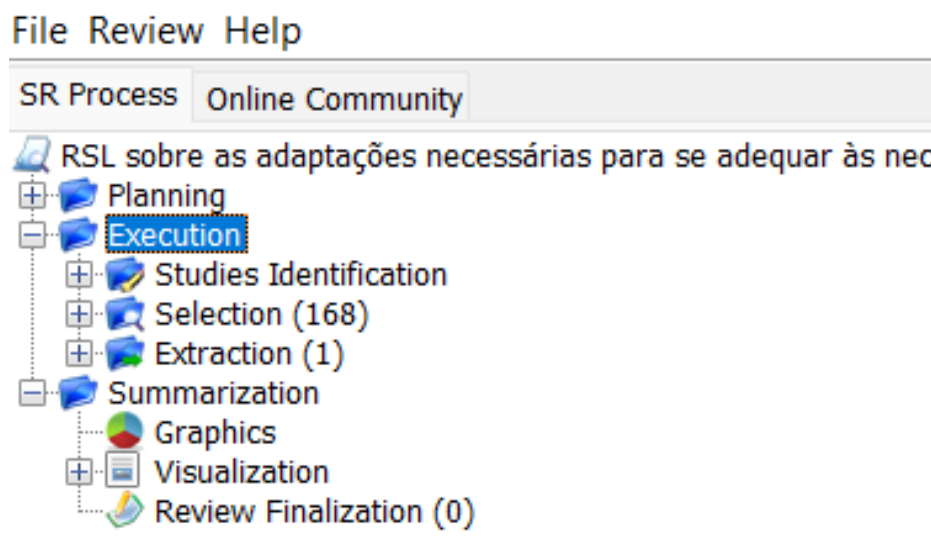
Fase 3: Após a definição do protocolo de pesquisa, as informações são inseridas no *software* Start, que serve como uma ferramenta auxiliar para o desenvolvimento das etapas da revisão. A execução da pesquisa é iniciada, com buscas realizadas nas bases de dados definidas e filtragem dos estudos com base nos critérios estabelecidos na fase anterior. Com o auxílio do software, os estudos são coletados e analisados para categorização. Ao final desta etapa, os resultados são analisados de acordo com os critérios selecionados.

Fase 4: Após a classificação e seleção dos artigos, os resultados obtidos são apresentados. É realizada uma análise quantitativa, detalhando por autor, periódico, palavras-chave e o método de pesquisa, além de uma análise qualitativa, detalhando o conteúdo das pesquisas, com a identificação das diretrizes recomendadas para a implementação da EC em nível nacional, a elaboração dos modelos de PCP fundamentados nos princípios da EC, bem como das estratégias e instrumentos para otimizar o PCP, especialmente em contextos de desmontagem e remanufatura, e a seleção do índice circular sustentável que pode ser utilizado no ambiente de negócios. Ao final desta fase, chega-se à conclusão do estudo.

3.3.2 Coleta, tabulação e análise dos dados

Para a realização da RBS, é necessário coletar, analisar e organizar os estudos obtidos. Para isso, foi utilizada a ferramenta Start. A ferramenta é estruturada em três etapas: execução, seleção e extração, conforme ilustrado na Figura 12.

FIGURA 12 – MODELO COM AS FASES DA FERRAMENTA START



FONTE: Ferramenta Start.

Na etapa de execução de acordo com os artigos obtidos, foi realizado uma análise referente a cada título, palavras-chaves e resumo individualmente, rejeitando aqueles que não estavam relacionados ao tema, ou que não se enquadraram nos critérios de inclusão e qualidade estabelecidos, no qual os que foram rejeitados nessa fase não passarão para a próxima etapa.

A lista dos artigos selecionados foi vinculada a etapa de extração. Neste passo, foi feito a leitura parcial dos artigos. Foram avaliados conforme os critérios de inclusão, exclusão e qualidade e ao final, com o resultado dessa nova etapa adquiriu a lista de estudos completa

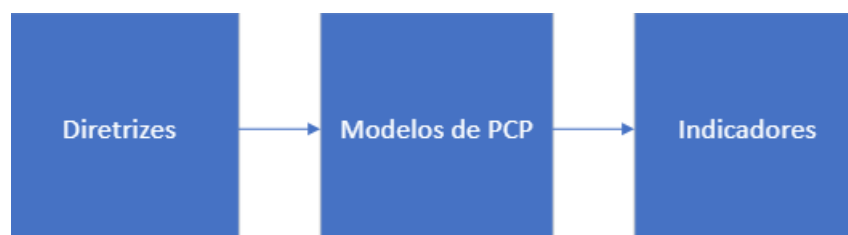
Com a lista de estudos completa, foi executado a última etapa, a extração. Nessa etapa foi feito a leitura completa de cada estudo. Após a avaliação da qualidade dos estudos e a extração dos dados básicos de caracterização, bem como dos dados específicos relacionados à pergunta de pesquisa, os campos referentes ao estudo foram atualizados e informações complementares foram anexadas.

Concluída a extração dos dados, os resultados foram analisados, interpretados e documentados. Os artigos foram descritos detalhadamente, incluindo a apresentação dos resultados, métodos e técnicas utilizadas. No *software* Start,

essa etapa é denominada publicação, permitindo que os resultados sejam exibidos em formatos como gráficos, tabelas e outras visualizações.

Dentro do conjunto final de estudos selecionados, foram revistos para arranjar a estrutura do modelo para aplicação da EC no PCP, de elaboração das diretrizes, análise da estrutura do PCP e indicadores aplicados na EC, conforme elucida a Figura 13.

FIGURA 13 – ESTRUTURA DO MODELO PARA APLICAÇÃO DA EC NO PCP



FONTE: A autora (2024).

Nessa pesquisa, o quadro desenvolvido pela Agência Europeia do Ambiente (2016) foi adaptado por Demko-Rihter *et al.* (2023), como uma abordagem dos componentes e condições necessárias para avaliar o avanço das empresas que buscam a circularidade. Neste enquadramento, a estrutura de tabulação e análise dos dados foi estruturado conforme o Quadro 2, no qual contém as principais perspectivas para avaliar a circularidade dos produtos.

QUADRO 2 – AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DOS PRODUTOS

Dimensões	Avaliação de Circularidade
Propriedades do Produto	(1) Vida útil técnica de um produto; (2) Reparabilidade; (3) Conteúdo reciclado; (4) Vida útil funcional de um produto.
Modelo de consumo empresarial	(1) Indicador de circularidade de materiais (MCI); (2) Proporções do sistema produto-serviço em um mercado específico.
Aspectos ambientais	(1) Impactos do ciclo de vida; (2) Eficiência Energética e Energia Renovável; (3) Aproveitamento de calor e geração de energia a partir dos resíduos.

FONTE: Adaptado de Demko-Rihter *et al.* (2023).

O modelo é dividido em duas partes principais: a primeira parte foca na medição e avaliação do progresso de um produto em direção à circularidade, enquanto a segunda parte oferece diferentes perspectivas empresariais sobre a transição para um modelo de negócio circular (Demko-Rihter *et al.*, 2023).

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e a síntese de uma revisão sistemática, cujos procedimentos de desenvolvimento foram descritos no capítulo 3. A revisão sistemática abrangeu artigos publicados entre 2019 a 2023, totalizando 11 estudos. Esses estudos estão relacionados ao método de pesquisa utilizado, conforme indicado no Quadro 3.

Primeiramente, será realizada uma análise quantitativa dos artigos, com o objetivo de fornecer uma visão geral das pesquisas atuais. Em seguida, será conduzida uma análise qualitativa dos estudos, com sugestões de autores de alguns estudos que podem apoiar o processo de tomada de decisão de empresas interessadas em implementar a EC no PCP.

QUADRO 3 – ARTIGOS RESULTANTES DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Nº	Autor	Ano	Título	Método de Pesquisa
1	Silva et al.	2022	O efeito das escolhas de previsão de demanda na circularidade dos sistemas de produção: uma estrutura e estudo de caso	Estudo de caso
2	Suzanne et al.	2021	Dimensionamento de lotes para simbiose industrial	Estudo experimental
3	Mao et al.	2021	Planejamento da sequência de desmontagem de peças automotivas de resíduos	Estudo experimental
4	Suzanne et al.	2020	Um problema de dimensionamento de lote de item único com capacidades de subproduto e estoque	Estudo experimental
5	Kimita, K.; Matschewsky, J.; Sakao, T.	2021	Um método para planejamento e controle de processos de remanufatura usando sistemas fracamente acoplados	Estudo de caso
6	Suzanne, E.; Absi, N.; Borodin, V.	2020	Rumo à economia circular no planejamento da produção: Desafios e oportunidades	Revisão Bibliográfica
7	Mandolini et al.	2017	Método de desmontagem baseado em tempo: como avaliar a melhor sequência de desmontagem e tempo de componentes alvo em complexos produtos	Estudo de caso
8	Tólio et al.	2017	Projeto, gestão e controle de sistemas de desmanufatura e remanufatura	Estudo de caso
9	Bocken et al.	2016	Estratégias de design de produto e modelo de negócios para uma economia circular	Estudo de caso
10	Gaspari et al.	2017	Modularização em simulação de fluxo de materiais para gerenciamento de liberações de produção em remanufatura	Estudo de caso
11	Giuseppe Ingarão	2017	Estratégias de fabricação para eficiência no uso de energia e recursos: O papel dos processos de conformação de metais	Revisão Bibliográfica

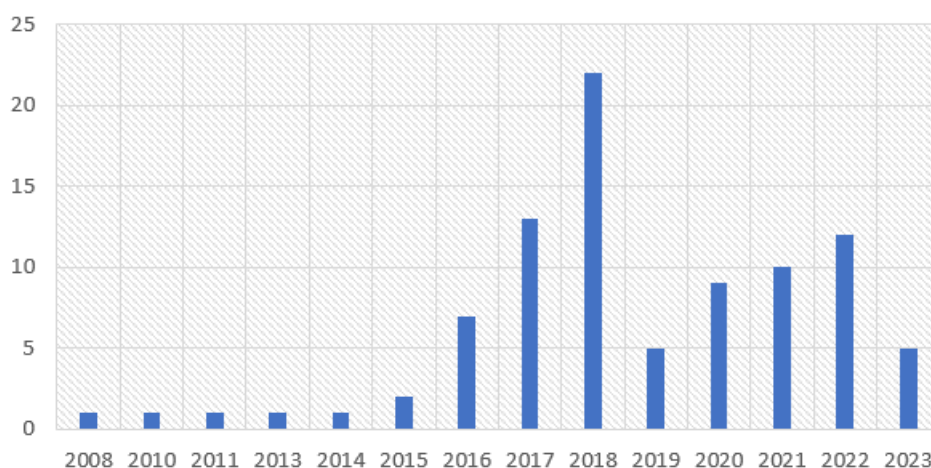
FONTE: A autora (2024).

4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA SOBRE AS PESQUISAS

Na segunda e terceira seleção (filtragem) dos estudos, resultou em 80 e posteriormente 11 artigos respectivamente, no qual serão analisados quantitativamente.

A representação visual na Figura 14 ilustra o desenvolvimento da produção científica no âmbito da pesquisa em questão.

FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO POR ANOS DE PUBLICAÇÃO



FONTE: A autora (2024).

É perceptível que a maioria dos artigos selecionados foram publicadas nos últimos oito anos (2016-2023), com um pico de publicações em 2018. Isso destaca um aumento significativo na atenção dos pesquisadores às questões relacionadas à EC no PCP.

Para a análise dos autores dos artigos selecionados, em relação ao número de publicações, os dados são apresentados no Quadro 4.

QUADRO 4 – PUBLICAÇÕES DOS AUTORES

Nº	Autores	Número de Publicações
1	Suzanne, E.; Absi, N.; Borodin, V.; van den Heuvel, W.	2
2	Takacs, F.; Brunner, D.; Frankenberger, K.	1
3	Patrizia Ghisellini.; Xi Ji c,Gengyuan.; Liu d e,Sergio Ulgiati	1
4	Matthias Kalverkamp e Matthias Kalverkamp,	1
5	Anja T. Braun.;Peter Kleine-Moellhoff.; Volker Reichenberge and Stephan Seiter	1
6	Arantes, Rafael Ferro Munhoz; Zanon, Lucas Gabriel; Calache, Lucas Daniel Del Rosso; Bertassini, Ana Carolina; Carpinetti, Luiz CÃ©sar Ribeiro	1
7	Ceballos Parez, Sergio Gabriel; Brambila Paz, João de Jesus; Parez Cerecedo, Veranica	1
8	VG Karayannis	1
9	Bárbara V.; Kasulaitis, Callie W.; Babbitt, Andrew K.; Krock	1
10	Natália M.; Gusmerotti, Filippo Corsini.;Alessandra Borghini e Marco Frey	1

Nº	Autores	Número de Publicações
11	Barboza, Luisa Ravagnani; Bertassini, Ana Carolina; Gerolamo, Mateus Cecilio; Ometto, Aldo Roberto	1
12	Roope Husgafvel.; Essi Karjalainen.; Lauri Linkosalmi.; Olli Dahl	1
13	Benjamin Sanches e Carlos Haas	1
14	Silva, M.H.D.P.E.; Costa, L.B.M.; Paredes, F.J.G.; Barretti, J.W.; Silva, D.A.L.	1
15	Carrillo Gonzalez.; Graciela.; Pomar Fernández, Silvia	1
16	Tongzhu Zhang a b,Jiangwei.; Chu e c,Xueping Wangb.; Xianghai Liub.; Pengfei Cui	1
17	Marco Marconi.; Michele Germani.; Marco Mandolinie e Claudio Favi	1
18	Damien Giurco, Anna garotinho, Thomas Boyle, Julian Fyfe e Stuart Branco	1
19	Michael Lieder,Amir Rashid	1
20	Deputado Nancy Bocken, Ingrid de Pauw, Conny Bakker e Bram van der Grinten	1
21	Oliveira, Fabio Ribeiro de; Santos, Rui Ferreira dos; Franasa, Sergio Luiz Braga; Rangel, Luis Alberto Duncan	1
22	Dev, N.K.; Shankar, R.; Qaiser, F.H.	1
23	Rivera Acosta, Patricia; Marta-nez Torres, Rosa Elia	1
24	Esther Alvarez-de-los- Mozos,Arantxa Renteria	1
25	Sarmiento Paredes, Susana; Carro Suarez, Jorge; Nava, Doroteo	1
26	Feng Han,Sim Liu,Wei Liu,Zhaojie Cui	1
27	Shujie Ma,Shanying Hu,Dingjiang Chen,Google Zhu	1
28	Fernando J. Diaz Lopez, Ton Bastein, Arnold Tukker	1
29	Ala Khodier a,Karl Williams um,Neil Dallison	1
30	Susana Garrido Azevedo, Radu Godina and João Carlos de Oliveira Matias	1
31	Francesco Di Maio, Peter Carlo Rem, Kees Baldé, Michael Polder	1
32	Thayla T. Sousa-Zomer a,Lucas Magalhães b,Eduardo Zancul bd __,Lucila MS Campos c,Paulo A. Cauchick-Miguel	1
33	Franz, Náidia Mara; Silva, Christian Luiz da	1
34	Valenzuela-Inostroza, Juan; Espinoza-Parez, Andrea; Alfaro-Marchant, Miguel	1
35	Friedrich A. Halstenberg e,Kai Lindow e b,Rainer Stark	1
36	Xiao Lishan a b,Liu Weiling a b c,Guo Qinghai e b,Gao Lijie a b,Zhang Guoqin a b,Chen Xiji	1
37	Geywitz Bernal, Santiago	1
38	Marzena Smol a,Joanna Kulczycka b.,Anna Henclik e,Katarzyna Gorazda c.,Zbigniew Wzorek	1
39	Giuseppe Ingarão	1
40	Mezones-Santana, Jefferson Jesus; Kahler, Stefan; Acevedo-Urquiaga, Ana Julia	1
41	Goga, Taahira; Harding, Kevin; Russo, Valentina; von Blottnitz, Harro	1
42	Miia Kuisma a,Helena Kahiluoto	1
43	Gregory Unruh	1
44	Oliveira, Fabio Ribeiro de; Franasa, Sergio Luiz Braga; Rangel, Lucas Alberto Duncan	1
45	Henning Wilts,Nadja Von Gries e Bettina Bahn-Walkowiak	1
46	Patrícia van Loon e Luk N. Van Wassenhove	1
47	Hidemichi Fujii e,Yasushi Kondo	1
48	RF de Schalkwyk a,MA Reuter a,J. Gutzmer a,M. Stelterb	1
49	Huiquan Li -a,Weijun Bao -a b,Caihong Xiu a b,Yi Zhang e,Hong Bin Xu	1
50	Roberto Casper e Erik Sundin	1
51	Ian Hartwell e James Marco	1
52	Santos.; Kauã Lopes dos Santos	1
53	Jeremy Millard, Maria N. Sorivelle, Sarah Deljanin,	1
54	Sasha Shahbazi e,Magnus Wiktorsson e,Martin Kurdve b,Cristina Jönsson b,Marcus Bjelkemyr e	1
55	Ji-liang Zheng eChen Zheng	1

Nº	Autores	Número de Publicações
56	Shan Zhong a, Joshua M. Pearce	1
57	João N. Hahladakis, Eleni Iacovidou	1
58	Shu-Yuan Pan, Tai Chun Chung, Chang-Ching Ho, Chin-Jen Hou, Yi-Hung Chen e Pen-Chi Chiang	1
59	Joseph Sarkis, Hanmin Zhu	1
60	Suocheng Dong, Zhe Wang, Yu Li, Fujia Li, Zehong Li, Feng Chen e Hao Cheng	1
61	Junqueira, Henrique Santos; Medeiros, Diego Lima; Cohim, Eduardo	1
62	Suzanne, E.; Absi, N.; Borodin, V.	1
63	Kimita, K.; Matschewsky, J.; Sakao, T.	1
64	Tagle Zamora, Daniel; Carrillo GonzÁlez, Graciela	1
65	Loizia, P.; Voukkali, I.; Zorpas, A.A.; Navarro PedreÁto, J.; Chatziparaskeva, G.; Inglezakis, V.J.; Vardopoulos, I.; Doula, M.	1
66	Thayla T. Sousa-Zomer a, Lucas Magalhães b, Eduardo Zancul b. c, Paulo A. Cauchick-Miguel	1
67	Lourenço Gaspari, Lorenzo Colucci, Steffen Butzer, Marcello Colledani e Rolf Steinhilper	1
68	Titova, Natalya Yu.; Terentyeva, Tatyana V.	1
69	M. Sauerwein, EL Doubrovski	1
70	Túlio Tólio; a b, Alain Bernard; Marcello Colledani; Sami Kara; Guenther Seliger; Joost Duflou; Olga Battaia g, Shozo Takata	1
71	Mao, J.; Hong, D.; Chen, Z.; Changhai, M.; Weiwen, L.; Wang, J.	1
72	Vence, Xavier; Pereira, Ángeles	1
73	Marca Bloomfield, Shaun Borstrock	1
74	Vogt Duberg, J.; Johansson, G.; Sundin, E.; Kurilova-Palisaitiene, J.	1
75	Marco Mandolini, Cláudio Favi, Michele Germani e Marco Marconi	1
76	Elisabeth Unterfrauner e Christian Voigt	1
77	Zapata Bravo, Álvaro ; Vieira Escobar, Valentina ; Zapata-DomÁnguez, Álvaro ; RodrÁnguez-RamÁrez, Alfonso	1
78	Gisbert-Navarro e Maria Chiara Marullo	1
79	Mark Kristofik, Allen Luccitti, Kyle Parnell, Michael Thurston	1
80	Maria Jesús Muñoz-Torres, Maria Ángeles Fernández-Izquierdo, Juana M. Rivera-Lirio, Idoia Ferrero-Ferrero, Elena Escrig-Olmedo, José Vicente	1
	Total Geral	80

FONTE: A autora (2024).

É importante destacar que os autores Suzanne, E; Absi, N; Borodin, V; Van den Heuvel, W tiveram uma publicação a mais em comparação aos outros autores. Logo, pode-se concluir que esses autores foram mais produtivos.

Analisando os periódicos das publicações, o que obteve maior número de artigos foi Journal of Cleaner Production, com um total de 13 artigos publicados. Em seguida aparece o Resources, Conservation and Recycling com 6 artigos publicações e os demais com 3, 2 e 1 artigo publicado respectivamente, conforme o Quadro 5.

QUADRO 5 – PERÓDICOS DAS PUBLICAÇÕES

Revista	Total	(%)
Journal of Cleaner Production	13	16%
Resources, Conservation and Recycling	6	8%
Revista de Remanufatura	3	4%
Recursos, Conservação e Reciclagem	2	3%
Materiais Hoje Comunicações	2	3%
Acta universitaria	2	3%
European Journal of Operational Research	2	3%
Ingeniera Industrial	2	3%
Science of The Total Environment	2	3%
Cadeias de Fornecimento Sustentáveis	1	1%
Meio Ambiente, Desenvolvimento e Sustentabilidade volume	1	1%
Revista de Sistemas e Tecnologia da Informação	1	1%
Combinações de políticas para eficiência de recursos, questões conceituais, desafios de design e avaliação	1	1%
Production	1	1%
Computers and Industrial Engineering	1	1%
Revista de Ecologia Industrial	1	1%
Contadura y administracion	1	1%
Journal of the Air and Waste Management Association	1	1%
Cuadernos de Administracion (Universidad del Valle)	1	1%
Pesquisa em Transporte Parte D: Transporte e Meio Ambiente	1	1%
Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicacion. Ensayos	1	1%
Region y sociedade	1	1%
Ecological Economics	1	1%
Revisão de gestão da Califórnia	1	1%
Energy	1	1%
Revista de Macromarketing	1	1%
Engenharia Sanitaria e Ambiental	1	1%
Revista Internacional de Pesquisa de Produção	1	1%
Entreciencias: dialogos en la sociedad del conocimiento	1	1%
Aspectos Econômicos e Empresariais da Sustentabilidade	1	1%
Conferência Internacional da Ásia sobre Engenharia Industrial e Inovação em Gestão (IEMI2012) Proceedings	1	1%
O Jornal Internacional de Tecnologia de Fabricação Avançada	1	1%
Fabricação de Procédia	1	1%
Procedia Manufacturing	1	1%
Gestão & Produção	1	1%
Brazilian Archives of Biology and Technology	1	1%
Gestão de resíduos	1	1%
Relatórios Científicos	1	1%
Gestão e Economia da Construção	1	1%
Resources, Conservation and Recycling Advances	1	1%
Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) para Sustentabilidade	1	1%
Revista de Administração de Empresas	1	1%
Revista Universidad y Sociedad	1	1%
Revista de Engenharia Industrial e de Produção	1	1%
South African Journal of Science	1	1%
Cadeias de Fornecimento Sustentáveis	1	1%
Riqueza dos Resíduos: Recursos Metálicos Urbanos e Ecologia Industrial	1	1%
Revista Internacional de Pesquisa de Produção	1	1%
Ambiente & Sociedade	1	1%
CIRP Annals	1	1%
Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME	1	1%

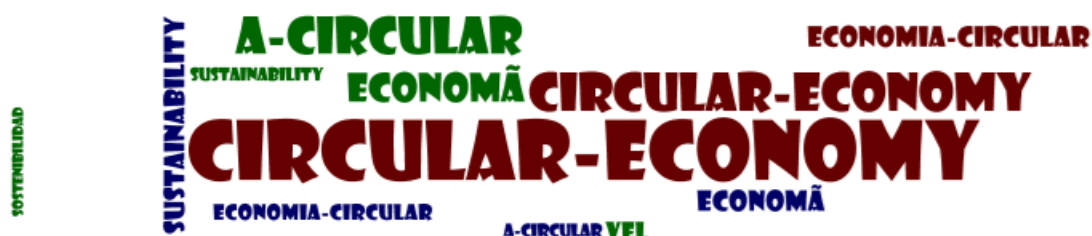
Revista	Total	(%)
Interfaces (Campo Grande)	1	1%
Sustainability Indicators for Environment Management	1	1%
Investigacion y Desarrollo	1	1%
Journal of Building Engineering	1	1%
Total Geral	80	100%

FONTE: A autora (2024).

Pode-se notar que o Journal of Cleaner Production é o periódico que mais possui publicações. O motivo por trás desse periódico ter mais alcance em relação aos outros, é por abordar diretamente questões de sustentabilidade e também a produção do título. Já em segundo lugar, o periódico Resources, Conservation and Recycling, assim como os demais periódicos abordam a produção e sustentabilidade em um propósito de aplicação mais amplo.

Olhando para à última seleção, os artigos selecionados que no total foram 11. A análise das palavras-chave, realizada por meio da ferramenta Start, permitiu identificar as mais recorrentes, como mostra na Figura 15.

FIGURA 15 – PALAVRAS-CHAVE MAIS UTILIZADAS



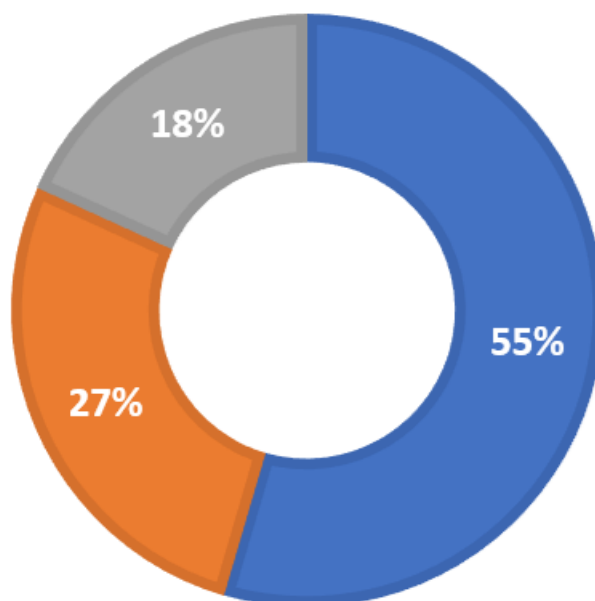
FONTE: Adaptado Start (2024).

As palavras-chave estão organizadas de acordo com sua frequência de uso, o que explica os diferentes tamanhos de exibição. A mais destacada é: "*Circular Economy*", confirmando que os estudos selecionados estão alinhados com o tema da pesquisa. Uma segunda palavra-chave, que aparece com menor destaque, inclui: "*Sustainability*", refletindo princípios e modelos adotados nas pesquisas.

Com a análise mais detalhada dos artigos permitiu identificar os métodos de pesquisa empregados nos estudos, conforme elucida na Figura 16.

FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS QUANTO AO MÉTODO DE PESQUISA

■ Estudo de caso ■ Estudo experimental ■ Revisão Bibliográfica



FONTE: A autora (2024).

De acordo com a imagem, a classificação dos artigos de acordo com o método de pesquisa, houve uma predominância de estudos de caso, representando 55% dos artigos, seguido por estudo experimental, com 27%, e as Revisões Bibliográficas, com 18% dos trabalhos. Isso revela uma certa dominância de estudos quantitativos (estudos de caso e estudo experimental) em comparação aos qualitativos. Esse fato pode estar relacionado ao grande número de pesquisas que desenvolvem novos métodos e ferramentas para melhoria das organizações, fazendo com que muitas empresas sejam utilizadas como referência para a abordagem desejada.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DA EC NO PCP

Como mencionado por Bhanot *et al.* (2017) no início do estudo, implementar a EC nos processos de produção, especialmente na área de PCP, ainda é um desafio devido à complexidade na gestão estratégica, o que dificulta a transição para o nível operacional. Considerando essa problemática, este tópico apresenta propostas de autores de alguns estudos encontrados na revisão sistemática e análises transcendentais, que podem auxiliar na tomada de decisão para empresas que desejam aplicar a EC no âmbito operacional.

4.2.1 Estrutura para aplicação

Foi elaborado uma estrutura para aplicabilidade da EC, formado pelas Diretrizes, Modelos de PCP e Indicador, conforme o quadro 6.

QUADRO 6 – ESTRUTURA PARA APLICAÇÃO DA EC NA FASE DO PCP

Etapas	Referência	Considerações relevantes	
Diretrizes	Confederação Nacional da Indústria. Série ABNT NBR ISO 59000 (2024).	Implementação da EC na Indústria	1. Análise do contexto e da situação atual: • Identificar os componentes do modelo de valor. • Mapear as cadeias ou redes de valor e seus elementos correspondentes. • Estabelecer os limites de atuação para uma abordagem circular dentro da cadeia de valor. • Avaliar o nível atual de desempenho em termos de circularidade.
			2. Definições (missão, visão e objetivos de EC): • Desenvolver uma “missão” alinhada à transição. • Definir uma “visão” para a empresa voltada para a EC. • Estabelecer as metas relacionadas à EC, • Identificar possíveis lacunas e oportunidades de melhoria.
			3. Elaboração (prioridades estratégicas e plano de ação): • Gerar ideias e definir ações prioritárias. • Revisar o modelo de geração de valor. • Avaliar a viabilidade das ações propostas, considerando aspectos técnicos, organizacionais, financeiros, econômicos, contextuais, sociais e aspectos ambientais. • Desenvolver um plano de ação para a circularidade.
			4. Implementação (ações de EC): • Aumentar a conscientização e fortalecer a capacidade de execução. • Favorecer a transição das cadeias de valor para um modelo circular. • Colocar em prática o plano de ação para circularidade.
			5. Monitoramento, revisão e relatório: • Monitorar os indicadores de desempenho. • Apresentar os resultados alcançados. • Revisar e aprimorar continuamente o plano de ação circular.

Etapas	Referência	Considerações relevantes	
Modelos de PCP	Guia (2000).	Característica complicadora	1. Incerteza no momento e na quantidade de devoluções: • A eficácia dos métodos (por exemplo, leasing, depósitos) na redução da incerteza no momento e na quantidade dos retornos. • Modelos de previsão para prever taxas e volumes de retorno. • Modelos de confiabilidade para prever melhor os ciclos de vida dos produtos com múltiplas vidas. • Modelos de controle de estoque que consideram explicitamente as chegadas de lotes de produtos devolvidos. • Modelos conjuntos de inventário/produção considerando taxas de retorno dependentes. • Estudos que acompanham a taxa de avanços tecnológicos que influenciarão os retornos dos produtos.
			2. Equilibrando retornos com demanda: • Métodos para examinar os benefícios da sincronização dos retornos com a procura. • Estratégias de posicionamento de produtos para atender múltiplos mercados. • Modelos agregados de planejamento de produção que consideram produtos devolvidos. • Esforços coordenados dos gerentes de compras e de estoque para planejar, gerenciar e controlar as taxas de devolução.
			3. Desmontagem de produtos desenvolvidos: • Modelos para auxiliar no planejamento de quais peças e componentes recuperar na desmontagem. • Modelos e métodos que examinam a eficácia da coordenação da liberação da desmontagem com a remontagem. • Modelos para projeto, layout e pessoal de instalações de desmontagem.
			4. Incerteza na recuperação de materiais: • Modelos que apoiam o planejamento e previsão da recuperação de materiais, incluindo modelos de fiabilidade. • Estudos que examinam as principais diferenças entre as atividades de compras tradicionais e as compras para remanufatura (incluindo o dimensionamento dos lotes de

Etapas	Referência	Considerações relevantes	
			compra). - Modelos que podem prever a quantidade de materiais recuperados com base na idade do produto e na taxa de utilização. - Estudos que examinam o uso do MRP, incluindo modificações/adequação. 5. Logística Reversa: - Estudos que destacam as diferenças entre a logística de reutilização de materiais e a logística de reutilização de produtos. - Modelos e sistemas para gestão e estratégias de aquisição central. - Estudos que possam estabelecer estratégias de recall de produtos e minimizar quebras de produtos. - Escolha ideal de canal para remanufaturadores (varejistas, diretamente do remanufaturador ou terceiros). 6. Correspondência de materiais: - Sistemas de informação para auxiliar no rastreamento de materiais. - Modelos e sistemas que fornecem visibilidade para requisitos de materiais. - Modelos e sistemas para coordenação de controle de chão de fábrica. - Dimensionamento do lote de remanufatura considerando explicitamente as restrições e políticas de correspondência de materiais. 7. Aumentar a competitividade em mercados globais comprometidos com o desenvolvimento local: - Modelos de dimensionamento de lotes de remanufatura que consideram o compromisso entre atrasos de preparação e atrasos de processamento desnecessários. - Modelos que proporcionam coordenação de agendamento entre desmontagem e remontagem. - Métodos de liberação de pedidos que considerem as cargas de trabalho em rápida mudança nos centros de trabalho de remanufatura. - Heurísticas de agendamento de gargalos baseadas em operações de limpeza.
Indicador	Azevedo, Godina e Matias (2017).	Índice Circular Sustentável	1. Econômica: É importante maximizar o valor econômico criado e distribuído, os investimentos em pesquisa e

Etapas	Referência	Considerações relevantes	
			desenvolvimento e o emprego devem ser maximizados.
			2. Social: • É necessário reduzir ao máximo os acidentes de trabalho, o emprego precário, o absenteísmo, a rotatividade de funcionários e a perda de produtividade.
			3. Ambiental: • Visa a redução dos resíduos perigosos, do consumo de água e do uso de energia.
			4. Circularidade: • Busca maximizar o uso de insumos provenientes de materiais reciclados e reutilizados, a extensão da vida útil dos produtos, a eficiência dos processos de reciclagem e a redução da intensidade de produtos utilizados.
			5. Fases para atingir o Índice Circular Sustentável: (1) Seleção de indicadores de sustentabilidade e circularidade. (2) Ponderação dos indicadores selecionados. (3) Normalização dos dados obtidos. (4) Utilização de um método de agregação para construção do índice. (5) Efetiva construção do índice.
	Confederação Nacional da Indústria. Série ABNT NBR ISO 59000 (2024).		1. Fluxos de entrada de recursos: (1) Percentual de materiais reutilizados em um fluxo de entrada. (2) Percentual de materiais reciclados presentes em um fluxo de entrada. (3) Percentual de recursos renováveis incorporados no fluxo de entrada.
			2. Fluxos de saída de recursos: (1) Comparação da vida útil média de produtos ou materiais com a média do setor. (2) Percentual de produtos e componentes provenientes do fluxo de saída que são efetivamente reutilizados. (3) Percentual de materiais reciclados com sucesso a partir do fluxo de saída. (4) Percentual de recirculação eficiente do fluxo de saída no ciclo biológico.
			3. Energia: (1) Proporção média de energia consumida que provém de fontes renováveis.
			4. Água:

Etapas	Referência	Considerações relevantes	
			(1) Percentual de água utilizada que é obtida de fontes circulares no fluxo de entrada. (2) Percentual de água descartada atendendo aos padrões de qualidade exigidos. (3) Taxa de reutilização ou recirculação de água, realizada localmente ou internamente.
			5. Economia: (1) Eficiência do material. (2) Nível de consumo relativo dos recursos.

FONTE: A autora (2024).

Na primeira etapa, as diretrizes da Confederação Nacional da Indústria, conforme a Série ABNT NBR ISO 59000 (2024) fornecem orientações para a implementação da EC na indústria. A segunda etapa, que envolve o desenvolvimento dos modelos de PCP, baseia-se nas pesquisas de Guia (2000) e Nasr *et al.* (1998), além de uma revisão abrangente da literatura existente. Essas pesquisas indicam que a análise das características complicadoras revela que as empresas de remanufatura precisam ser capazes de gerenciar tarefas complexas, que diferem significativamente das realizadas em ambientes de produção tradicionais. Essas características complicadoras devem ser consideradas de forma integrada, em vez de avaliar os efeitos de cada uma isoladamente.

Por fim, na etapa de indicadores, o Índice Circular Sustentável, sugerido por Azevedo, Godina e Matias (2017), é baseado no *framework* proposto por Salvado *et al.* (2015), mas com algumas modificações. Um novo conjunto de indicadores relacionados à dimensão de circularidade foi introduzido. Além disso, o método de ponderação adotado é diferente: em vez de utilizar o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), optou-se pelo método Delphi. O índice também apresenta os indicadores centrais de circularidade propostos pela Confederação Nacional da Indústria, conforme a Série ABNT NBR ISO 59000 (2024).

4.2.2 Avaliação da circularidade

Com base nos artigos selecionados na revisão sistemática e transcendentais, foi elaborado um modelo inspirado em Demko-Rihter *et al.* (2023), que mede e

avalia o progresso de um produto, além de analisar as perspectivas empresariais sobre a transição para um modelo de negócio circular. O modelo foi adaptado em três dimensões: Propriedade do Produto, Modelo de Consumo Empresarial e Aspectos Ambientais, conforme o Quadro 7. Cada uma dessas dimensões foi definida com base nos temas principais identificados nos estudos dos autores que mostraram relação com as dimensões de avaliação de circularidade.

QUADRO 7 – AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE

Dimensões	Avaliação de Circularidade	Tema Principal	Referência
Propriedade do Produto	(1) Vida útil técnica de um produto; (2) Reparabilidade; (3) Conteúdo Reciclado; (4) Vida útil funcional de um produto.	Busca prolongar o período de uso dos bens ao introduzir ciclos de serviço que aumentem a vida útil do produto. Isso inclui práticas como reutilização, manutenção, reparo, atualização técnica ou uma combinação desses métodos.	Bocken et al., 2016.
		<i>Insights</i> sobre o <i>design</i> atual do produto e estratégias de modelo de negócios adequadas para a mudança para uma economia circular.	
		Para prolongar a vida útil dos produtos, eles devem ser específicos com foco em manutenção, reparo e revisão, o que implica facilidade na montagem e desmontagem. A frequência com que os consumidores realizarão reparos dependerá, no fim das contas, de fatores como custo e conveniência (tempo e habilidades possíveis).	Giurco et al., 2014.
		A produção aditiva é uma tecnologia disruptiva com potencial para transformar profundamente as localizações de produção onde é aplicada e, consequentemente, uma escala geográfica na qual o ciclo e a reciclagem de metais ganham na economia.	
		Propor um método prático para gerenciar eficientemente a incerteza em todo o processo de remanufatura, criando subsistemas fracamente acoplados que encapsulam a propagação da incerteza dentro de si mesmos.	Kimita, K.; Matschewsky, J.; Sakao, T, 2021.
		Construir um modelo de informação de desmontagem baseado em redes de Petri avançadas; de acordo com os requisitos reais de decisão de desmontagem, um modelo de planejamento matemático típico é estabelecido; projeto combinando tecnologia de inteligência artificial com algoritmo de otimização estocástica e algoritmo genético multiobjetivo; análise de modelagem de desmontagem e otimização abrangente de resíduos em ambientes incertos; e análise e verificação de	Mao et al., 2021.

Dimensões	Avaliação de Circularidade	Tema Principal	Referência
		aplicação de teorias e métodos relacionados.	
		Apresentar um método para avaliação analítica da desmontabilidade do produto, com base na estimativa dos tempos de desmontagem de componentes alvo.	Mandolini et al., 2017.
		Fornecer uma visão geral e uma estrutura das práticas industriais, metodologias científicas e tecnologias facilitadoras para projetar, gerenciar e controlar sistemas de desmanufatura e remanufatura de forma lucrativa.	Tólio et al., 2017.
		Método de reciclagem descentralizada que utiliza um Recyclebot vertical para produção filamentosa, permitindo a fabricação distribuída de produtos úteis a partir de resíduos pós-consumo, com o uso de uma impressora delta RepRap.	Zhong e Pearce, 2018.
		Método de reciclagem e fabricação descentralizado que combina um recyclebot de código aberto com uma impressora 3D RepRap. O ABS pós-consumo foi reciclado e utilizado como material para a produção de três produtos exemplares.	
Modelo de consumo empresarial	(5) Indicador de circularidade de materiais (MCL).	Oferece uma base para avaliar a sustentabilidade e a circularidade das empresas, fornecendo informações valiosas sobre seu avanço rumo à sustentabilidade ambiental, econômica e social, bem como em direção a práticas circulares.	Azevedo, Godina e Matias, 2017.
		Avalia-se o potencial de eficiência no uso de materiais dentro das fronteiras de uma empresa de produção de amostra, abrangendo suas cadeias de suprimentos e a recuperação de resíduos por meio de atividades de economia circular.	Braun et al., 2018.
		Desenvolvimento de competências e projetos-piloto para avaliação de sustentabilidade na indústria de processos no Ártico, incluindo dois estudos de caso.	Husgafvel et al., 2017.
		Método de avaliação estruturado para o desempenho em desenvolvimento sustentável em uma empresa de produtos químicos P, que pode ser igualmente utilizado por outras empresas focadas em recursos.	Ma et al., 2015.
		Exame de forma abrangente a avaliação da sustentabilidade em cadeias de suprimentos globais, oferecendo uma estrutura que uma empresa líder pode implementar para disseminar os princípios de sustentabilidade entre os demais integrantes da cadeia de suprimentos.	Muñoz-Torres et al., 2018.
	(6) Proporções do sistema produto-	Propor uma estrutura de simulação inovadora para prever o desempenho de	

Dimensões	Avaliação de Circularidade	Tema Principal	Referência
	serviço em um mercado específico.	sistemas de remanufatura operando sob várias políticas de controle de produção dentro de um ambiente digital, antes da implementação no sistema real.	Gaspari et al., 2017.
		Integrar o gerenciamento de um subproduto no problema clássico de dimensionamento de lote.	Suzanne et al (2020).
		Introduzir e investigar uma nova versão de um problema de dimensionamento de lote de item único de dois níveis (ULS-IS), proposto por uma rede de simbiose industrial incluindo duas unidades de produção.	Suzanne et al (2021).
		Apresentar uma revisão de literatura focada em modelos de otimização de tempo discreto para planejamento tático de produção sob o prisma da economia circular.	Suzanne, E.; Absi, N.; Borodin, V., 2020.
Aspectos ambientais	(7) Impactos do ciclo de vida	Propor uma estrutura de simulação inovadora para prever o desempenho de sistemas de remanufatura operando sob várias políticas de controle de produção dentro de um ambiente digital, antes da implementação no sistema real.	Gaspari et al., 2017.
		Fornecer uma revisão de literatura com o objetivo de destacar a relevância da sustentabilidade dos processos de moldagem de metais.	Giuseppe Ingarão, 2017.
		Analisar como a escolha de métodos de previsão de demanda pode afetar a circularidade dos sistemas de produção em termos de desempenho ambiental do ciclo de vida e relata o uso de três métodos de previsão para prever a demanda de aglomerado e determinar qual deles seria mais adequado para o caso.	Silva et al., 2022.
	(7) Eficiência Energética e Energia Renovável	Realização de experimentos de co-digestão anaeróbia utilizando soro de leite e excretas bovinas como substratos, com o objetivo de produzir biogás, em reatores experimentais protótipos operados em temperatura ambiente, além do desenvolvimento de uma modelagem matemática para descrever a cinética desse processo.	Aguilar et al., 2022.
		As análises realizadas sobre os cenários de recuperação de recursos a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) demonstraram benefícios significativos na redução tanto da demanda por energia quanto da pegada de carbono. As abordagens mais eficazes para atingir esses resultados envolveram a recuperação de materiais e energia por meio de processos como reciclagem, compostagem e digestão anaeróbia dos	Junqueira, H, S.; Medeiros, D, L.; Cohim, E, 2022.

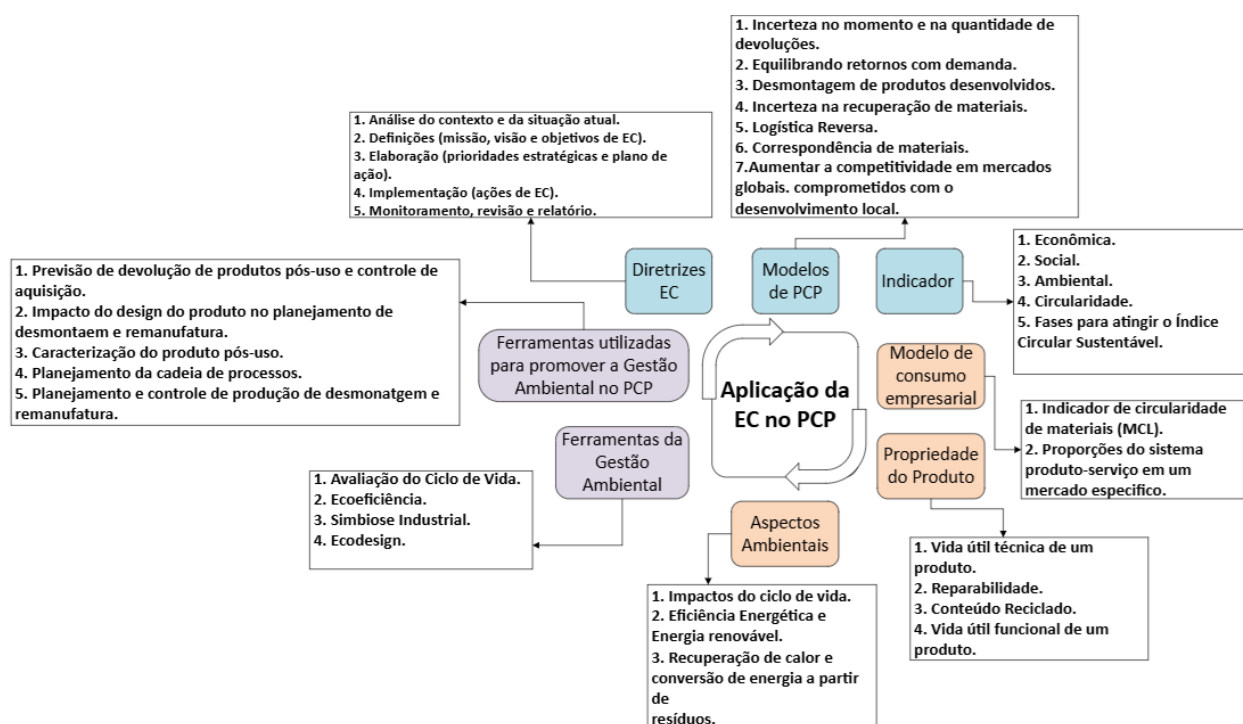
Dimensões	Avaliação de Circularidade	Tema Principal	Referência
		RSU.	
		A utilização de resíduos como fonte de energia para abastecer a própria indústria ou um complexo industrial contribui para o desenvolvimento econômico e regional, além de mitigar preocupações relacionadas aos impactos ambientais.	Alves et al., 2022.
		Propor um método abrangente para analisar a previsão econômica da tecnologia de biogás e identificar o nível de subsídio necessário para torná-la economicamente viável. Além disso, busca estabelecer um valor para o custo das reduções de emissões geradas por meio da geração de eletricidade a partir do biogás.	Agar, D, A.; Athanassiadis, D.; Pavelka, B, J, 2022.
	(9) Aproveitamento de calor e geração de energia a partir de resíduos	Desenvolver um modelo do sistema de economia circular para energia a carvão e cimento em Kongtong, analisando de forma quantitativa sua estrutura operacional, assim como os impactos ecológicos e econômicos, por meio do método de dinâmica de sistemas (SD) e do software Vensim.	Dong et al., 2017.
		Fatores-chave que influenciaram a alteração na produção de resíduos não utilizados na indústria de alimentos do Japão entre 2008 e 2015.	Fujii e Kondo et al., 2018
		No decorrer do desenvolvimento da economia circular, a conservação de energia na indústria de processos da China avançou significativamente, incluindo a criação de novos processos que consomem menos energia, a recuperação de calor residual de baixa qualidade e a reutilização de recursos provenientes dos resíduos gerados nos processos de conversão de energia, entre outras iniciativas.	Li et al., 2010.
		Quando os materiais circulam no sistema fechado, há uma redução no consumo de energia e no fornecimento de gases de efeito estufa, em comparação com os níveis que seriam necessários para atender à mesma demanda do consumidor em um modelo tradicional de economia circular ou em um modelo padrão de fabricação centralizada.	Zhong e Pearce, 2018.

FONTE: Adaptado de Demko-Rihter *et al.* (2023).

A Figura 15 integra os resultados dos Quadros 7 e 8, bem como nas seções 2.1.3 e 2.4.1, com o objetivo de destacar como a aplicação da EC no PCP pode ajudar as empresas a reduzir desperdícios e promover o uso eficiente de recursos.

Este diagrama foi adaptado a partir do modelo proposto por Jabbour *et al.* (2020), sendo organizado em diferentes componentes e etapas que integram a EC aos processos produtivos de uma empresa. A sequência inicia-se com as diretrizes, modelos de PCP e indicadores, segue para o modelo de consumo empresarial e propriedade do produto, e finaliza com as ferramentas aplicadas no PCP e à gestão ambiental, como ilustrado na figura 17.

FIGURA 17 – DIAGRAMA DE APLICAÇÃO DA EC NO PCP



FONTE: Adaptado de Jabbour *et al.* (2019).

Conforme o diagrama, inspirado na estruturação apresentada no estudo de Jabbour *et al.* (2019), sua elaboração foi realizada a partir do levantamento de artigos que tratam dos modelos de relação entre EC e PCP. Nos quadrantes azuis, as diretrizes, juntamente com os indicadores de EC, estão relacionados ao planejamento estratégico de uma empresa, sendo posteriormente vinculadas ao planejamento operacional por meio dos modelos do PCP.

Para medir as diretrizes, existem ferramentas (representadas nos quadrantes roxos) que promovem a gestão ambiental no PCP. Essas ferramentas podem ser reforçadas por normas como a ISO 14001. No entanto, é importante destacar que o

diagrama só pode ser aplicado após a identificação das particularidades da empresa, conforme os elementos descritos nos quadrantes laranja: o modelo de consumo da empresa, as propriedades específicas do produto e os aspectos ambientais característicos de cada setor. Dessa forma, deve ser adaptado à realidade de cada setor, considerando o impacto ambiental gerado e as especificidades dos produtos, para atingir os objetivos da EC no PCP.

Por fim, o diagrama é uma síntese eficiente para integrar a EC ao PCP. Ele destaca ferramentas práticas, indicadores de desempenho e aspectos ambientais, auxiliando as empresas a adotarem um modelo produtivo mais sustentável e competitivo. A abordagem da proposta detalha desde o planejamento estratégico até a operação prática, promovendo uma transição para cadeias de produção circulares.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa destacou a importância crucial da transição de um modelo econômico linear para um modelo de Economia Circular (EC), especialmente no contexto do Planejamento e Controle de Produção (PCP). A preocupação crescente com os impactos ambientais negativos decorrentes do modelo linear, como a acumulação de resíduos, a escassez de recursos naturais e a mudança climática, reforça a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis.

Este estudo teve como propósito realizar uma revisão sistemática que explore as questões da EC nas atividades de PCP. Para isso, foi conduzida uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). A ferramenta StArt foi empregada para facilitar a coleta de dados e a condução da revisão. Os artigos catalogados no final da revisão foram 11, selecionados de um total inicial de 168 identificados. Em termos de resultados, a maioria dos artigos foi publicada entre 2016 a 2023, com um pico em 2018, indicando o crescente interesse dos pesquisadores nas questões de EC no PCP. A análise de palavras-chave revelou que "*Circular Economy*" é a mais frequente, seguida de "*Sustainability*". Quanto aos métodos de pesquisa, 55% dos estudos eram estudos de caso, 27% experimentais e 18% revisões bibliográficas, predominando métodos quantitativos. Isso reflete o foco das pesquisas em desenvolver ferramentas para a melhoria das organizações.

Além disso, o estudo teve como objetivo elaborar um modelo para a ampliação da EC no PCP, com base nos artigos levantados durante o mapeamento. Como resultado, foram apresentados os fundamentos da EC aplicados ao PCP. Foi elaborado um diagrama que enfatiza as ferramentas práticas, diretrizes e indicadores de desempenho e questões ambientais, situando-os em um nível estratégico-operacional. Esse modelo pode ser aplicado a setores específicos, sendo adaptado à realidade de cada setor, considerando o impacto ambiental, as características do produto, sua vida útil e as particularidades.

Por fim, a pesquisa alcança seu objetivo principal de mapear a literatura sobre a EC na perspectiva do PCP, além de contribuir para o processo de aplicação da EC no PCP nas empresas. Como contribuição, o estudo oferece uma análise sistemática sobre a aplicação da EC no PCP.

REFERÊNCIAS

- ANDREWS, D. **A economia circular, design thinking e educação para a sustentabilidade**. Local Economy, 2015.
- AMINOFF, A. **Os modelos de negócios da economia circular capturam as propostas de valor ambiental pretendidas?** Journal of Cleaner Production, 2017.
- ANDREW-MUNOT, M.; IBRAHIN, R.N. **Desenvolvimento e Análise de Modelos Matemáticos e de Simulação de Ferramentas de Tomada de Decisão para Remanufatura Planejamento e Controle da Produção**, v. 24, n. 12, p. 1081-1100. 2013.
- AGAR, D. A.; ATHANASSIADIS, D.; PAVELKA, B. J. **O custo de redução de CO2 do Biogás a partir de humanure e esterco de gado**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 53. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102381> >. Acesso em: 16 set. 2024.
- AGUILAR, H. L.; BARRÓN, A.; FRANCO, M.; PAZ, A.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, A. **Modelagem da produção de metano a partir de soro de leite e excretas de gado em codigestão anaeróbica**. Nova Scientia, v. 13, n. 27. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2791> >. Acesso em: 16 set. 2024.
- ALVEZ, J. L.; CHAGAS, M. J. R.; FARIA, E. O.; CALDEIRA-PERES, A. Z. **Economia Circular e Energias Renováveis: uma análise bibliométrica da literatura internacional**. Interações, v. 23, n. 2. 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.20435/inter.v23i2.3034> >. Acesso em: 16 set. 2024.
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P.T. **Fatores críticos na modelagem de demanda de energia para fresamento CNC e impacto da estratégia de percurso**. J. Limpo. Prod. Elsevier Ltd, v. 78, p. 10. 2014.
- AYDIN, N.S.; TIRKOLAEI, E.B. **Uma revisão sistemática da literatura agregada de planejamento de produção com perspectivas de sustentabilidade e circularidade**. Meio Ambiente. Dev. Sustentar, 2022.

AYVAZ, B.; BOLTURK; KAÇTIOGLU, S. **Um sistema cinza para previsão da quantidade de produtos devolvidos na rede de reciclagem.** Revista Internacional de Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos, v. 3, p. 3. 2014.

AZEVEDO, S. G.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. O. **Proposta de Índice Circular Sustentável para Empresas de Manufatura.** Recursos, v. 6, n. 4, p. 63, nov. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/resources6040063>>. Acesso em: 16 set. 2024.

BAIGUERA, F.; COLLEDANI, M. **Um método baseado em conhecimento para a previsão de materiais valiosos em resíduos de placas de circuito impresso.** 2007.

BERTASSINI, A.C.; ZANON, L.G.; AZARIAS, J.G.; GEROLAN, M.C.; OMETTOO, AR. **Inovações em ecossistema de negócios circulares: um guia para mapear stakeholders, capturar valores e encontrar novas oportunidades.** Produção e Consumo Sustentáveis, v. 27, p. 436-448. 2021.

Anais do Terceiro Simpósio sobre Mineração Urbana, 2016.

BASKER S.; KING, A. **Organizando a Reutilização: Gerenciando o Processo de Design para Remanufatura.** (DFR) 18ª Conferência Anual do POMS, Dallas, Texas, EUA,

BHANOT, N.; RAO, P.V.; DESHMUKH, S.G. **Uma abordagem integrada para analisar os facilitadores e as barreiras da produção sustentável.** J. Limpo. Prod, v. 142, p. 4412–4439. 2017.

BILGILI, E.; CAPECE, M. **Análise quantitativa de interações multipartículas durante a quebra de partículas: uma estrutura discreta de equilíbrio populacional não linear.** Tecnologia de Pó, v. 213, n. 13, p. 162-173. 2011.

BIOLCHINI, J.C.A. **Scientific research ontology to support systematic review in software engineering.** Advanced Engineering Informatics, v. 21, n. 2, p.133-151. 2007.

BOCKEN, N. D.; PAUW, I.; BAKKER, C.; GRINTEN, B. V. **Estratégias de design de produtos e modelos de negócios para uma economia circular**. Revista de Engenharia Industrial e de Produção. v. 33, n. 5, p. 308-320. 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>>. Acesso em: 16 set. 2024.

BUENO, A.; GODINHO, M.; FRANK, A.G. **Planejamento e Controle Inteligente de Produção no Contexto da Indústria 4.0: Uma Revisão Sistemática da Literatura**. Computação. Ind. Eng, 2020.

BUREN, N.; DEMMERS, M.; HEIJDEN, R.; VAN DER.; WITLOX, F. **Rumo a uma economia circular: O papel das indústrias logísticas e dos governos holandeses**. Sustentabilidade, 2016.

CANNATA, S.; KARNOUSKOS, M.; TAISCH. **Análise e otimização de processos orientadas pela eficiência energética na manufatura discreta**. 35ª Conferência Anual do IEEE sobre Eletrônica Industrial IECON. Nov. 2009.

COLLEDANI, M; CRITELLI, I; DEGIORGI, A; TASORA, A. **Simulação de fluxo granular multicorpo para projeto e operação de processos de separação mecânica para reciclagem**. Procedimento da CARE Electronics, 2014.

CHIERICI, E.; COPANI, G. **Refabricação com Atualização PSS para Novos Modelos de Negócios Sustentáveis**. Procedia CIRP, v. 47. 2016.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Economia circular na prática: guia de implementação segundo a série ABNT NBR ISO 59000**. Confederação Nacional da Indústria, Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. – Brasília: CNI, 2024.

CONFORTO, E.C.; AMARAL, D.C.; SILVA, S.L. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, CBGDP, 2011.

CONTARTESI, F.; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): Uma ferramenta para a redução do impacto ambiental dos revestimentos cerâmicos**. Cerâmica Industrial, v. 2, n. 24, abril/jun. 2019. Disponível em:

<<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/doi/10.4322/cerind.2019.011>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

COOK, D.J.; MULROW, C.D.; HAYNES, R.B. **Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions**. Annals of Internal Medicine, v.126, n.5, p.376-380. 1997.

COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M.; ASSUNÇÃO, G. M. **Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Revista Gestão, Ambiente e Sustentabilidade, 2020.

CLOTTEY, T.; BENTON, W. C.; SRIVASTAVA, R. **Previsão de devoluções de produtos para operações de remanufatura**. Ciência da Decisão, 2012.

DALY, H.R. **Rumo a alguns princípios operacionais de desenvolvimento sustentável**. Eco. Economia, 1990.

DE BURGOS JIMENEZ, J.; LORENTE, J.J.C. **Environmental performanceas an operation objective**. International Journal of Operations & Production Management, 2001.

DEMKO-RIHTER, J.; SASSANELLI, C.; PANTELIC, M.; ANISIC, Z. **Uma estrutura para avaliar a Economia Circular dos fabricantes em Nível de preparação nos países em desenvolvimento: um caso de aplicação em uma empresa de embalagens na Sérvia**. Sustainability, v. 15, p. 6982. 2023. Disponível em: <[file:///C:/Users/thaylinelucena/Downloads/sustainability-15-06982%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/thaylinelucena/Downloads/sustainability-15-06982%20(4).pdf)>.

Acesso em: 16 set. 2024.

DENIZEL, M.; FERGUSON, M.; SOUZA, G. **Planejamento de remanufatura multiperíodo com qualidade incerta de insumos**. Transações IEEE sobre Gerenciamento de Engenharia, v. 57, n. 3. 2010.

DONG, S.; WANG, Z.; LI, F.; LI, Z.; CHEN, F.; CHENG, H. **Avaliação dos efeitos abrangentes e otimização de um sistema de economia circular de energia a carvão e cimento no distrito de Kongtong, cidade de Pingliang, província de**

Gansu, China. Sustainability, v. 9, n. 5, p. 787. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/su9050787>>. Acesso em: 16 set. 2024.

DKE. Integração do Sistema de Controle Empresarial – Parte 1: Modelos e Terminologia. CEN, Bruxelas, Bélgica, 2013.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à economia circular: economia e justificativa comercial para uma transição acelerada. Ilha de Wight: EMF, v. 1. 2012.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à economia circular: oportunidades para o setor de bens de consumo. Isle of Wight: EMF, v. 3. 2013.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à economia circular: acelerar a expansão nas cadeias de abastecimento globais. Isle of Wight: EMF, v. 1. 2014.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à economia circular: justificativa empresarial para uma transição acelerada. Isle of Wight: EMF, v. 1. 2015.

FREIBERGER, S.; ALBRECHT, M.; KAUFEL, J. Tecnologias de engenharia reversa para remanufatura de sistemas automotivos que se comunicam via barramento CAN. Journal of Remanufacturing, v. 1, p. 6. 2011.

FUJI, H.; KONDO, Y. Análise de decomposição da gestão de resíduos alimentares com consideração explícita da prioridade de opções alternativas de gestão e sua aplicação à indústria alimentícia japonesa de 2008 a 2015. Journal of Cleaner Production, v. 188, p. 568-574. 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.241>>. Acesso em: 16 set. 2024.

GASPARI, L.; COLUCCI, L.; BUTZER, S.; COLLEDANI, M.; STEINHILPER, R. Modularização na simulação de fluxo de materiais para gerenciamento de liberações de produção em remanufatura. Revista de Remanufatura. v. 7, p. 139-157. 2017. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s13243-017-0037-3>>. Acesso em: 16 set. 2024.

GBEDEDU, Mijoh A; LIYANAGE Kapila; GARZA-REYES, José Arturo. **Rumo a uma análise da sustentabilidade do ciclo de vida: uma revisão sistemática das abordagens à produção sustentável.** Revista de Produção Mais Limpa, v. 184, p. 1002-1015, maio. 2018.

GEISSDOERFER, Martin. **A Economia Circular – Uma nova sustentabilidade paradigma?** Journal of cleaner production, v. 143, p. 757-768. 2017.

GENC, O.; KURT, A.; YAZAN, D.M.; ERDIS, E. **Projeto de parque ecoindustrial circular inspirado na natureza: uma otimização não linear integrada, localização e análise da cadeia alimentar.** Jornal de Gestão Ambiental, 2020.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa.** Atlas, São Paulo, 2007.

GIRET, A.; TRENTESAUX, D.; PRABUH, V. **Sustentabilidade na programação de operações de manufatura: uma revisão do estado da arte.** J. Manuf. Sist, 2015.

GITELMAN, L. **Rational behavior of an enterprise in the energy market in a circular 15 economy.** Resources, v. 8, n. 2. 2019.

GIURCO, D.; LITTLEBOY, A.; BOYLE, T.; FYFE, J.; WHITE, S. **Economia Circular: questões para minerais responsáveis, manufatura aditiva e reciclagem de metais.** Recursos 3, p. 432-453, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/resources3020432>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

GONÇALVES, T. M.; BARROSO, A. F. F. **A economia circular como alternativa à economia linear.** Anais, IN XI Simposio de Engenharia de Produção de Sergipe, 2019.

GUIA, V. D.R.; **Planejamento e controle da produção para remanufatura: práticas da indústria e necessidades de pesquisa.** Revista de Gestão de

Operações, v. 18, n. 4, p. 467-483, jun. 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00034-6](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00034-6)>. Acesso em: 18 jun. 2024.

GUTOWSKI, T.; DAHMUS, J.; ALBINO, D.; BRANHAN, M. **Modelo Bayesiano de Separação de Materiais com Aplicações à Reciclagem**. Simpósio Internacional IEEE sobre Eletrônica e Meio Ambiente, 2007.

HANAFI, J.; KARA, S.; KAEBERNICK, H. **Gerando modelo de previsão de rede de Petri com cores difusas para prever o retorno de produtos**. Anais do Simpósio Internacional IEEE sobre Eletrônica e Meio Ambiente, 2007.

HANAFI, J.; KARA, S.; KAEBERNICK, H. **Estratégias de logística reversa para produtos em fim de vida**. Revista Internacional de Gestão Logística, v. 3, p. 19. 2008.

HANAFI, J.; KARA, S.; KAEBERNICK, H. **Análise de aplicações de estratégia de rede de coleta para eletrônicos em fim de vida**. Anais da 15ª Conferência Internacional CIRP em Engenharia do Ciclo de Vida, Sydney, Austrália, p. 11–13, jun. 2008.

HATCHER, G.D.; IJOMAH, W.L.; MOINHO DO VENTO, J.F.C. **Integrando o Design para Remanufatura no Processo de Design: Os Fatores Operacionais**. Revista de Produção Mais Limpa, v. 39, p. 200-208, 2013.

HOLDEREGGER, R. **A Redução da Pegada Ambiental na Gestão Operacional das empresas**, 2023.

IBBOTSON, S.; KARA, S.; KAEBERNICK, H. **Uma metodologia para analisar os parâmetros críticos de projeto para reutilização**. Jornal Internacional de Design e Fabricação Ambientalmente Conscientes, v. 13, p. 3–4. 2007.

IGNATENKO, O.; VAN SCHAİK, A.; REUTER, M. **Flexibilidade do sistema de reciclagem: a solução fundamental para alcançar altas cotas de energia e recuperação de materiais**. Revista de Produção Mais Limpa, v. 16, p. 432-449. 2008.

IJOMAH, W.L.; MCMAHON, C.; HAMMOND, G.; NEWMAN, S. **Desenvolvimento de Diretrizes de Projeto Robusto para Remanufatura para Promover os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Revista Internacional de Pesquisa de Produção, v. 45, p. 18. 2007.

INGARAO, G. **Estratégias de fabricação para eficiência no uso de energia e recursos: O papel dos processos de moldagem de metais**. Revista de Produção Mais Limpa. v. 142, n. 4, p. 2872-2886. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.182>>. Acesso em: 16 set. 2024.

JABBOUR, A. B. L. S.; LUIZ, J. V. R.; LUIZ, O. R.; JABBOUR, C. J. C.; NDUBISI, N. O; OLIVEIRA, J. H. C; JÚNIOR, F. H. **Modelos de negócios de economia circular e gestão de operações**. Jornal de Produção mais limpa, p. 256. 2019.

JIN, X; HU, J.; KOREN, Y. **Controle ideal de remontagem com devoluções de qualidade variável em um sistema de remanufatura de produtos**. Anais do CIRP, v. 60, n. 1, p. 25-28. 2011.

JUNQUEIRA, H. S.; MEDEIROS, D. L.; COHIM, E. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Feira de Santana: demanda energética e pegada de carbono**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220200358>> Acesso em: 16 set. 2024.

KALAKUL, S.; MALAKUL, P.; SIEMANOND, K.; GANI, R. **Integração de software de avaliação de ciclo de vida com ferramentas para análises econômicas e de sustentabilidade e simulação de processos para design de processos sustentáveis**. J. Limpo. Prod, v. 71, p. 98-109. 2014.

KANDA, W. **A technological innovation systems approach to analyse the roles of intermediaries in eco-innovation**. Journal of Cleaner Production, v. 227, p. 1136–1148, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.230>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

KANG, J.G.; LEE, D.H.; XIROUCHAKIS, P.; PESSOA, J.G. **Sequenciamento de desmontagem paralela com tempos de operação dependentes de sequência**. Anais do CIRP, v. 1, p. 50. 2001.

KARA, S.; PORNPASITPOL, P.; KAEBERNICK, H. **Uma metodologia para desmontagem seletiva de produtos em fim de vida.** (EOL) Journal of Assembly Automation, v. 2, p. n. 25, p. 124-134. 2005.

KIMITA, K.; MATSCHEWSKY, J.; SAKAO, T. **Um método para planejamento e controle de processos de remanufatura usando sistemas fracamente acoplados.** Journal Manufacturing Science and Engineering. v. 10, n. 10. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1115/1.4050545>>. Acesso em: 16 set. 2024.

KING, A.; BURGESS, S.; IJOMAH, W.L.; MCMAHON, C.A. **Reduzindo o desperdício: reparar, recondicionar, remanufaturar ou reciclar?** Desenvolvimento Sustentável, v. 14, p. 257-267. 2006.

KONDOH, S.; SOMA, M.; UMEDA, Y. **Simulação de Sistemas de Manufatura em Malha Fechada com Foco no Balanço Material de Fluxos Diretos e Inversos.** Revista Internacional de Design e Fabricação Ambientalmente, v. 13, n. 2, p. 1-16. 2007.

KORHONEN, J. **Economia circular como conceito essencialmente contestado.** Journal of cleaner production, v. 175, p. 544-552. 2018.

KUBOTA, F.I.; DA ROSA, L.C. **Identificação e concepção de oportunidades de produção mais limpa com a teoria da solução inventiva de problemas.** J. Limpo. Prod. Elsevier Ltd, v. 47, p. 10. 2013.

LAMBERT, A.J.D. **Métodos exatos na busca de sequência de desmontagem ideal para problemas sujeitos a custos dependentes de sequência.** Ômega, v. 34, p. 538-549. 2006.

LAMBERT, A.J.D. **Otimizando Processos de Desmontagem Sujeitos a Custos Dependentes de Sequência, Computadores e Pesquisa Operacional,** v. 34. 2007.

LEVY, Y.; ELLIS, T.J. **A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research.** Informing Science Journal, v.9, p.181-212. 2006.

LI, H.; BAO, W.; XIU, C.; ZHANG, Y.; XU, H. **Conservação de energia e economia circular nas indústrias de processo da China**. Energy, v. 35, n. 11, p. 4273-4281 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021>>. Acesso em: 16 set. 2024.

LI, W.D.; XIA, K.; GAO, L.; CHAO, K.M. **Planejamento de Desmontagem Seletiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos com Estudos de Caso em Displays de Cristal Líquido Robótica e Manufatura Integrada por Computador**, v. 4, n. 29. 2013.

LIANG, X.; JIN, X.; NI, J. **Previsão de devoluções de produtos para sistemas de remanufatura**. Jornal de Remanufatura, v. 4, n. 8. 2014.

LONGONI, A.; CAGLIANO, R. **Environmental and social sustainability priorities: Their integration in operations strategies**. International Journal of Operations & Production Management, 2015.

LU, Q.; STUART WILLIAMS, A.; POSNER, M.; BONAWITAN, W.; QU, X. **Análise baseada em modelo de capacidade e taxas de serviço para recicladores de eletrônicos**. Journal of Manufacturing Systems, v. 1, p. 45-57. 2006.

LUTTERS, E.; VAN HOUTEN, F.J.A.M.; BERNARD, A.; MENOZ, E.; SCHUTTE, C.S-L. **Ferramentas e técnicas para design de produto**. Anais do CIRP, v. 2, p. 63. 2014.

LUZ, B. **Economia circular Brasil: da teoria à prática**. Change Brasil, Rio de Janeiro, 2017.

MAO, J.; HONG, D.; CHEN, Z.; CHANGHAI, M.; WEIWEN, L.; WANG, J. **Planejamento da sequência de desmontagem de peças automotivas de resíduos**. Jornal da Associação de Gestão do Ar e Resíduos. v. 71, n. 5, p. 607-619. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1871444>>. Acesso em: 16 set. 2024.

MANDOLINI, M.; FAVIO, C.; GERMANI, M.; MARCONI, M. **Método de desmontagem baseado em tempo: como avaliar a melhor sequência de desmontagem e tempo de componentes alvo em produtos complexos.** *Jornal Internacional de Tecnologia de Fabricação Avançada*, v. 95, p. 409-430. 2017. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1201-5>>. Acesso em: 16 set. 2024.

MARASPIN, F.; BEVILACQUA, P.; REM, P. **Modelando o lançamento de metais e não metais na separação por correntes parasitas.** *Revista Internacional de Processamento Mineral*, v. 73, p. 1-11. 2004.

MARX-GOMEZ, J.; RAUTENSTRAUCH, C.; NORBERGER, A.; KRUSE, R. **Abordagem neuro-difusa para prever devoluções de produtos sucateados para reciclagem e remanufatura.** *Sistemas Baseados em Conhecimento*, v. 1, n. 15. 2002.

MANNINEN, K.; KOSKELA, S.; ANTIKAINEN, R.; BOCKEN, N.; DAHLBO, H. **Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira.** *Confederação Nacional da Indústria*, 2018.

MATSUMOTO, M.; IKEDA, A. **Exame de previsão de demanda por análise de série temporal para remanufatura de peças automotivas.** *Journal of Remanufacturing*, v. 5. 2015.

MILLAR, N.; MCLAUGHLIN, E.; BÖRGER, T. **The Circular Economy: Swings and Roundabouts?** *Ecological Economics*, v. 158, p. 11–19. 2019.

MOKTADIR, M.A.; RAHMAN, T.; RAHMAN, M.H.; ALI, S.M.; PAUL, S.K. **Impulsionadores para práticas de produção sustentáveis e economia circular: uma perspectiva das indústrias do couro em Bangladesh.** *Jornal de Produção Mais Limpa*, 2018.

MOREIRA, D.A. **Administração da Produção e Operações.** São Paulo: Cengage Learning, n. 2, p. 623. 2009.

MORAGA, G. **Circular economy indicators: What do they measure?** Resources, Conservation and Recycling, v. 146, p. 452–461, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. **The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context.** Journal of Business Ethics, v. 140, n. 3, p. 369–380. 2017.

PEETERS, J.; VANEGAS, P.; DEWULF, W.; DUFLOU. **Avaliação Econômica e Ambiental de Projeto para Desmontagem Ativa.** Revista de Produção Mais Limpa, v. 140. 2017.

PEINADO, J.; GRAEML, A. R. **Administração da Produção: Operações Industriais e de Serviços.** Curitiba: Unincenp, 2007. REFA. **Planung und Gestaltung Komplexer Produktionssysteme.** Hanser: Munique, Alemanha, n. 2. 1990.

PROSKURYAKOVA, L. N.; ERMOLENKO, G. V. **The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies.** Renewable Energy, v. 143, p. 1670–1686, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.096>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

POLOTSKI, V.; KENNE, J.P.; GHARBI, A. **Programação ideal de produção para sistemas de manufatura híbrida e remanufatura com configurações.** Journal of Manufacturing Systems, v. 37, n. 3. 2015.

QU, X.; WILLIAMS, J.A.S. **Um modelo analítico para planejamento e precificação reversa da produção automotiva.** Jornal Europeu de Pesquisa Operacional, v. 190. 2008.

RAHIMIFARD, S.; SEOW, Y.; CHILDS, T. **Minimizando a energia incorporada do produto para apoiar a fabricação com eficiência energética.** CIRP Ana. - Fabrico. Tecnologia, v. 59, p. 25-28. 2010.

REIS, D.A. **Administração da Produção: Sistemas, Planejamento e Controle.** São Paulo: Atlas, p. 326. 1978.

REN, G.G.M. **Servitização em Empresas de Manufatura**. Seminário Cranfield de Sistemas Produto – Serviço, 2007.

Resumos multilíngues da OCDE. **Eco-inovação na Indústria: Permitindo o Crescimento Verde**. Resumo Executivo do Projeto da OCDE sobre Fabricação Sustentável e Eco-inovação, 2010.

RIBEIRO, FDM.; KRUGLIANSKAS, I. **Melhorando o licenciamento ambiental por meio de regulamentação baseada no desempenho: um estudo de caso do Estado de São Paulo, Brasil**. J. Limpo. Prod. Elsevier Ltd, v. 46, p. 10. 2013.

ROSSI, Efigenia. **Indicadores de economia circular para organizações que consideram a sustentabilidade e modelos de negócios: caixas plásticas, têxteis e eletroeletrônicas**. Journal of Cleaner Production, v. 247, p. 119-137. 2020.

ROTTER, V.S.; CHANCEREL, P.; UEBERSCHAAR, M. **Caracterização de Produtos Orientada à Reciclagem para Equipamentos Elétricos e Eletrônicos como Ferramenta para Viabilizar a Reciclagem de Metais Críticos**. Habilitando a Sustentabilidade dos Recursos Materiais, Rewas, 2013.

RUSSOMANO, V.H. **Planejamento e Acompanhamento da Produção**. São Paulo: Ed. Pioneira, 1979.

SAKAI, T.; TAKATA, S. **Categorização Sistemática de Reutilização e Identificação de Problemas no Gerenciamento de Reutilização na Fabricação em Ciclo Fechado**. Procedia CIRP, p. 425-430. 2011.

SANTOCHI, M.; DINI, G.; FAILLI, F. **Planejamento de desmontagem auxiliada por computador: estado da arte e perspectivas**. Anais do CIRP, v. 2, p. 51. 2002.

SCHONSLEBEN, P; e outros. **O papel da manufatura em afetar a dimensão social da sustentabilidade**. CIRP Ana, 2016.

SÁTIO, W.C.; SPÍNOLA, M.D.M.; ALMEIDA, C.M.V.B.; GIANNETTI, B.F.; SACOMANO, J.B.; CONTADOR, J.C.; CONTADOR, JL. **Indústrias Sustentáveis: Planejamento e Controle da Produção como Aliado na Implementação da Estratégia**. J. Limpo. Prod, p. 281. 2021.

SILVA, M. H. P.; COSTA, M. L. B.; PAREDES, F. J. G.; BARRETTI, J. W.; SILVA, D. A. L. **O efeito das escolhas de previsão de demanda na circularidade dos sistemas de produção: uma estrutura e estudo de caso.** Recursos, Conservação e Reciclagem Avanços. v. 15. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200088>>. Acesso em: 16 set. 2024.

SIMONE, V. D.; PASQUALE, V. D.; NENNI, M. E.; MIRANDA, S. **Planejamento e Controle Sustentável da Produção em Contextos de Manufatura: Uma Revisão Bibliométrica.** Sustentabilidade, 2023.

SIMIC, V.; DIMITRIJEVIC, B. **Planejamento de produção para fábricas de reciclagem de veículos nos ambientes legislativos e empresariais globais da EU Recursos.** Conservação e Reciclagem, v. 60. 2012.

SINGH, P.J. **Para além dos modelos de trade-off e de capacidades cumulativas: modelos alternativos de estratégia de operações.** International Journal of Production Research, 2015.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** São Paulo: Atlas, n. 2. 2002.

SODHI, E.M.; YONG, J.; CAVALEIRO, W.A. **Modelagem de processos de separação de materiais na reciclagem a granel.** Revista Internacional de Pesquisa de Produção, v. 37. 1999.

STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.; KINGSMA, B. G. **Uma revisão do planejamento e controle da produção: a aplicabilidade de conceitos-chave à indústria de produção sob encomenda.** Internacional J.Prod. Res, 2005.

STEVES, C. **Medindo o desenvolvimento sustentável: resumo estatístico.** Órgão. Economia. Desenvolvimento de Cooperação (OCDE), n. 10, set. 2005.

SUÁREZ-EIROA, B. **Princípios operacionais da economia circular para a sustentabilidade Desenvolvimento: Vinculando teoria e prática.** Journal of Cleaner Production, v. 214, p. 952–961. 2019.

SUDIN, E. **Design de produtos e processos para remanufatura bem-sucedida.** Estudos de Linköping em Ciência e Tecnologia. Dissertação de Doutorado, 2004.

SUTHERLAND, J. W.; RICHTER, J. S.; HUTCHINS, M. J.; DORNFELD, D.; MOLDÁVIA, A.; WELO, T. **O conceito de manufatura sustentável e suas definições: Uma revisão da literatura baseada em análise de conteúdo.** J. Limpo. Prod, 2017.

SUZANNE, E.; ABSI, N.; BORODINA, V. **Rumo à economia circular no planeamento da produção: Desafios e oportunidades.** Revista Europeia de Pesquisa Operacional. v. 287, p. 168-190. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.043>>. Acesso em: 16 set. 2024.

SUZANNE, E.; ABSI, N.; BORODINA, V.; HEUVEL, W. V. **Um problema de dimensionamento de lote de item único com capacidades de subproduto e estoque.** Revista Europeia de Pesquisa Operacional. v. 287, n. 3, p. 844-855. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.017>>. Acesso em: 16 set. 2024.

SUZANNE, E.; ABSI, N.; BORODINA, V.; HEUVEL, W. V. **Dimensionamento de lotes para simbiose industrial.** Computadores e Engenharia Industrial. v. 160, p. 107469. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107464>>. Acesso em: 16 set. 2024.

TAM, E.; SOULLIERE, K.; SAWYER-BEAULIEU, S. **Managing complex products to support the circular economy.** Resources, Conservation and Recycling, v. 145, p. 124–125, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.030>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

TAKATA, S.; SAKAI, T. **Modelagem de devoluções de produtos levando em consideração os modos de vendas.** Revista Internacional de Tecnologia de Automação, v. 3, p. 71-76. 2009.

TÓLIO, T.; BERNARD, A.; COLLEDANI, M.; KARA, S.; SELIGER, G.; DUFLOU, J.; BATTAIA, O.; TAKATA, S. **Projeto, gerenciamento e controle de sistemas de**

desmanufatura e remanufatura. CIRPA Annals, v. 66, p. 585-609. 20. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.001> >. Acesso em: 16 set. 2024.

UEDA, K.; NISHINO, N.; NAKAYAMA, H.; ODA, S.H. **Tomada de decisão e design institucional para gerenciamento do ciclo de vida do produto.** Anais do CIRP, v. 1, p. 54. 2005.

UMEDA, Y.; KONDOH, S.; SUGINO, T. **Análise de Reutilização usando 'Taxa Marginal de Reutilização'.** Anais do CIRP, v. 1, p.55. 2006.

URANO, K.; TAKATA, S. **Gerenciamento de reconfiguração de módulos para fábricas circulares sem discriminação entre produtos virgens e reutilizados: reengenharia da fabricação para a sustentabilidade.** Procedia CIRP, 2013.

USEPA. **Fabricação Sustentável.** 2022.

VELENTURF, A. P. M. **Circular economy and the matter of integrated resources.** Science of the Total Environment, v. 689, p. 963–969, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.449> >. Acesso em: 18 jun. 2024.

WANG, Y.; LIU, J.H. **Otimização de enxame caótico de partículas para planejamento de sequência de montagem.** Robótica e Manufatura Integrada por Computador, v.2, p. 26. 2010.

WANG, L.; WANG X.V.; GAO, L.; VANCZA, J. **Uma abordagem baseada na nuvem para a remanufatura de REEE.** Anais do CIRP, v. 1, p. 63. 2014.

WCED. **Nosso Futuro Comum.** Brochuras de Oxford. Oxford University Press: Oxford, Reino Unido, 1987.

WOLF, M.I; COLLEDANI, M; GERSHWIN, S.B; GUTOWSKI, T.G. **Um modelo de fluxo de rede para avaliação de desempenho e projeto de sistemas de separação de materiais para reciclagem.** Transações IEEE sobre Ciência e Engenharia de Automação, v. 10. 2013.

ZACCARELLI, S.B. **Programação e Controle da Produção.** São Paulo: Pioneira, n. 5, p. 292. 1979.

ZARTE, M.; PECHMANN, A.; NUNES, I. L. **Modelo de Inferência Fuzzy para Apoio à Decisão em Processos de Planejamento Produtivo Sustentável – Um Estudo de Caso**. Sustentabilidade, 2021.

ZARTE, Maximiliano; PECHMANN, Agnes; NUNES, Isabel L. **Problemas, necessidades e desafios de um planejamento produtivo baseado na sustentabilidade**. Sustentabilidade, v. 14, n. 7, p. 4092, mar. 2022.

ZHONG, S.; PEARCE, J. M. **Apertando o ciclo na economia circular: reciclagem e fabricação distribuídas acopladas com recyclebot e impressão 3-D RepRap**. Conserva Reciclar, v. 128, p. 48-58, 2018. Disponível em: <. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.449>>. Acesso em: 04 dez. 2024.

CERDÁ, T. E.; KHALILOVA, A. **Economia circular**. Revista Economia Industrial, 2016.

ZENG, S.X.; MENG, X.H.; YIN, H.T.; TAM, C.M.; SUN, L. **Impacto da produção mais limpa no desempenho empresarial**. J. Limpo. Prod. Elsevier Ltd, v. 18, p. 10. 2010.

