

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

GESSICA MINA KIM JESUS

**CONTRIBUIÇÕES DA INOVAÇÃO ABERTA PARA A ECONOMIA
CIRCULAR: UM ESTUDO MULTIMÉTODO**

Bauru/SP

2024

GESSICA MINA KIM JESUS

**CONTRIBUIÇÕES DA INOVAÇÃO ABERTA PARA A ECONOMIA
CIRCULAR: UM ESTUDO MULTIMÉTODO**

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

Orientador: Prof. Dr. Daniel Jugend
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Paula de Camargo Fiorini

Bauru/SP

2024

J58c

Jesus, Gessica Mina Kim

Contribuições da inovação aberta para a economia circular: um estudo multimétodo / Gessica Mina Kim Jesus. -- Bauru, 2024
156 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Daniel Jugend

Coorientadora: Paula de Camargo Fiorini

1. Inovação aberta. 2. Economia circular. 3. Sustentabilidade. 4.
Inovação. 5. Indústria 4.0. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GESSICA MINA KIM JESUS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de junho do ano de 2024, às 09:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de GESSICA MINA KIM JESUS, intitulada **CONTRIBUIÇÕES DA INOVAÇÃO ABERTA PARA A ECONOMIA CIRCULAR: UM ESTUDO MULTIMÉTODO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. DANIEL JUGEND (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Faculdade de Engenharia - Câmpus Bauru , Prof. Dr. EDUARDO DE SENZI ZANCUL (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade de São Paulo (USP) - Escola Politécnica, Prof. Dr. GLAUCO HENRIQUE DE SOUSA MENDES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Prof. Dr. ADRIANO ALVES TEIXEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Administração / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) - Câmpus de Três Lagoas, Prof.ª Dr.ª LUCIANA ORANGES CEZARINO (Participação Virtual) do(a) Department of Management / Ca Foscari University of Venice. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: _

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

Prof. Dr. DANIEL JUGEND



DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu Deus, aos meus pais, professores e amigos por me apoiarem ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida e saúde física e mental para realizar os projetos maravilhosos que me são apresentados.

Aos meus pais, Rosangela e Kim, por todo apoio e conforto nas horas difíceis.

A todos os meus amigos da Pós Graduação pelas parcerias na academia e na vida, especialmente, Arthur, Janaina, Fernanda, Luís e Juliana.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Jugend, pela paciência, sabedoria, dedicação e trabalho exemplar à frente da pesquisa científica.

À minha coorientadora Dr^a Paula Fiorini, pela sensibilidade, inteligência e companheirismo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UNESP *Campus* Bauru, pelos valiosos ensinamentos e orientações ao longo das disciplinas, em especial os professores Enzo, Gladys, Andreia, Rejane, Crepaldi, que muito me ensinaram nessa caminhada.

A todos os servidores da UNESP *Campus* Bauru (secretaria, biblioteca, laboratórios, *etc*) pelo suporte acadêmico e administrativo.

RESUMO

A economia circular (EC) é uma abordagem promissora para melhorar a eficiência dos recursos e substituir o atual modelo de economia linear. No entanto, a transição para a EC está associada à capacidade de inovação tecnológica de produtos, serviços e processos, para manter o valor dos materiais por mais tempo nos sistemas de produção e consumo. Nesse contexto, o conceito de inovação aberta tem sido proposto para reduzir as barreiras de inovação e tecnológicas e, assim, facilitar a implementação da EC. Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi analisar como práticas de inovação aberta podem contribuir e impactar a implementação da EC. Para atingir esse objetivo, uma pesquisa multimétodo foi realizada em três etapas, com a elaboração de um artigo em cada etapa. Na primeira etapa foi realizada uma revisão sistemática da literatura para investigar qualitativamente como a inovação aberta poderia contribuir com a implementação da EC. Na segunda etapa foi adotada uma pesquisa *survey* com 163 empresas, para verificar as relações entre inovação aberta, EC, tecnologias da Indústria 4.0 e capacidade absorptiva. Por fim, na terceira etapa realizou-se uma análise qualitativa operacionalizada por dois estudos de caso no setor de mineração, para analisar como práticas de inovação aberta poderiam contribuir para a implementação da EC. Os resultados deste estudo mostram que o campo de investigação envolvendo a inovação aberta e EC ainda é recente na literatura, com a maioria dos estudos qualitativos realizados na Europa e Ásia. As principais práticas de inovação aberta em direção a EC adotadas e encontradas foram a colaboração com *stakeholders* e a abordagem de cocriação. Na etapa quantitativa, este estudo revelou uma influência positiva e significativa das práticas de inovação aberta para a implementação da EC, com destaque para a colaboração com ONGs, *startups*, governos regionais, universidades e centros de pesquisa. Além do impacto direto das tecnologias da Indústria 4.0 na EC, também foi observado uma mediação positiva das tecnologias da Indústria 4.0 na relação entre inovação aberta e EC. As tecnologias da Indústria 4.0 que mais se destacaram na pesquisa estão associadas à *big data*, sistemas ciber físicos e inteligência artificial. Os estudos de casos revelaram que na mineração, a implementação da EC está em estágio inicial com apoio de práticas de inovação aberta *inbound*, por meio do desenvolvimento de projetos de inovação com *startups*, universidades e consultores externos de P&D. Portanto, entende-se que os resultados desta tese contribuem para a literatura de gestão de operações sustentáveis, ao analisar os aspectos teóricos e práticos da inovação aberta orientada a circularidade.

ABSTRACT

Circular economy (CE) is a promising approach to improve resource efficiency and replace the current linear economic model. However, the CE transition is associated with the technological innovation capacity of products, services, and processes, to maintain the materials value for longer periods within production and consumption systems. In this context, the open innovation (OI) concept has been proposed to reduce innovation and technological barriers and, therefore, facilitate the CE implementation. The overall study objective was to analyze how OI practices can contribute to CE implementation. To achieve this goal, a multimethod research was conducted in three stages, with a paper elaborated for each stage. In the first stage a systematic literature review was conducted to qualitatively investigate how OI could contribute to the CE implementation. In the second stage a survey research with 163 companies was adopted to verify the relationships between OI, CE, Industry 4.0 technologies and absorptive capacity. Finally, in the third stage a qualitative analysis operationalized by two case studies in the mining sector was conducted to analyze how OI practices can contribute to the CE implementation. Results showed that the research field involving OI and CE is still recent in the literature, with the qualitative studies majority conducted in Europe and Asia. The main OI practices towards CE adopted and observed were stakeholder collaboration and co-creation approach. In the quantitative stage, this study revealed a positive and significant influence of OI practices on the implementation of CE, with a focus on collaboration with NGOs, startups, regional governments, universities, and research centers. Furthermore, Industry 4.0 technologies directly impact and mediate the relationship between OI and CE. The Industry 4.0 technologies that were most prominent in the research are associated with big data, cyber-physical system, and artificial intelligence. The case studies revealed that in the mining sector, the CE implementation is in its early stages with support from inbound OI practices through the development of innovation projects with startups, universities, and external R&D consultants. Therefore, this thesis contributes to the literature on sustainable operations management by analyzing the theoretical and practical aspects of OI oriented towards circularity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da tese.....	22
Figura 2 - Protocolo de seleção de artigos	48
Figura 3 - Distribuição dos artigos publicados por ano (n = 24).....	50
Figura 4 - Países com publicações (criado com mapchart.net).	50
Figura 5 – Abordagem metodológica das publicações.	52
Figura 6 - Temas da EC abordados nos artigos (à esquerda) e os níveis da EC (à direita).....	54
Figura 7 - Implicações potenciais da economia circular orientada pela inovação aberta.	61
Figura 8 - Modelo conceitual.	77
Figura 9 - Resultados da modelagem de equações estruturais	85
Figura 10 - <i>Sublevel stopping mining</i> da empresa A	104
Figura 11 - <i>Open-pit mining</i> da empresa B.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Os três principais artigos, conforme determinado pelo número de citações	52
Tabela 2 - Contribuições das teorias organizacionais para a economia circular orientada a inovação aberta	56
Tabela 3 – Perfil dos respondentes (N = 163)	79
Tabela 4 – Resultados finais para a média, desvio padrão, <i>outer loadings</i> , Alfa de Cronbach, confiabilidade composta e AVE	81
Tabela 5 – Validade discriminante – Critério Fornell-Larcker	82
Tabela 6 – Validade discriminante – resultados do HTMT	82
Tabela 7 – Resultados do modelo estrutural	83
Tabela 8 - Resultados das hipóteses.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Questões de pesquisa, objetivos específicos, justificativas e métodos de pesquisas dos artigos da tese.	20
Quadro 2 - Escolas do pensamento que contribuíram para a origem da economia circular	24
Quadro 3 - Resumo de algumas definições de economia circular encontradas na literatura ...	26
Quadro 4 - Práticas para medir a implementação da economia circular nas empresas	28
Quadro 5 – Definições de inovação aberta.....	30
Quadro 6 - Exemplos de práticas de inovação aberta inbound e outbound	33
Quadro 7 - Definição das tecnologias da Indústria 4.0	37
Quadro 8 - Forças motrizes e barreiras para implementação das tecnologias da Indústria 4.0	37
Quadro 9 – Perfil das empresas selecionadas para os estudos de caso.	103
Quadro 10 - Práticas ambientais e sociais desenvolvidas pela empresa A	105
Quadro 11 – Projetos ambientais e sociais desenvolvidas pela empresa B	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AVE	<i>Average Variance Extracted</i>
BDA	<i>Big data analytics</i>
BWT	<i>Boundary Work Theory</i>
CE	<i>Circular economy</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
CR	<i>Composite reliability</i>
DET	<i>Design Entropy Theory</i>
EC	Economia circular
EDCT	<i>Enterprise's Dynamic Capabilities Theory</i>
ESG	<i>Environmental, Social e Governance</i>
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
HTMT	<i>Heterotrait-monotrait</i>
I4.0	Indústria 4.0
IFNMG	Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
INT	<i>Industrial Network Theory</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MA	Manufatura Aditiva
MFA	<i>Material Flow Accounting</i>
MG	Minas Gerais
NIH	<i>Not Invented Here</i>
NSH	<i>Not Sold Here</i>
OI	<i>Open innovation</i>
OIT	<i>Open Innovation Theory</i>
ONG	Organização Não Governamental
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PROEJA	Programa Nacional de Integração da Educação Profissional com a Educação Básica na Modalidade de Educação de Jovens e Adultos
PSS	<i>Product Service Systems</i>
PULLS	<i>Peri urban living labs</i>

RBV	<i>Resource Based View</i>
RFID	Identificação por radiofrequência
SCADA	Sistemas de execução de manufatura e controle supervísório e aquisição de dados
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação
TPB	Theory of Planned Behavior
TT	Teoria da Transição
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UFVJM	Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri
VIF	<i>Variance Inflation Factor</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização e definição do problema	13
1.2 Objetivo da pesquisa e justificativas	19
1.3 Estrutura da tese	21
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 Economia circular	23
2.2 Inovação aberta	29
CAPÍTULO 3: ARTIGO 1 - COMO A INOVAÇÃO ABERTA PODE CONTRIBUIR PARA A ADOÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR? <i>INSIGHTS</i> DE UMA REVISÃO DE LITERATURA	39
3.1 Introdução	40
3.2 Revisão teórica	43
3.2.1 <i>Inovação aberta</i>	43
3.2.2 <i>Economia circular</i>	44
3.2.3 <i>Inovação aberta e economia circular</i>	46
3.3 Método de Pesquisa	47
3.3.1 <i>Identificação e seleção das publicações</i>	47
3.3.2 <i>Extração de dados</i>	48
3.4 Resultados	49
3.4.1 <i>Resultados da análise bibliométrica</i>	49
3.4.2 <i>Resultados da análise de conteúdo</i>	53
3.5 Discussões e implicações	58
3.6 Conclusões	61
CAPÍTULO 4: ARTIGO 2 - INOVAÇÃO ABERTA PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR: EXPLORANDO O PAPEL MEDIADOR DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	64
4.1 Introdução	65
4.2 Revisão teórica e desenvolvimento das hipóteses	68
4.2.1 <i>Inovação aberta</i>	68
4.2.2 <i>Inovação aberta e economia circular</i>	69
4.2.3 <i>Inovação aberta e tecnologias da Indústria 4.0</i>	71

4.2.4	<i>Indústria 4.0 e economia circular</i>	72
4.2.5	<i>O papel mediador das tecnologias da Indústria 4.0.</i>	74
4.2.6	<i>Teoria da capacidade absorviva</i>	74
4.3	Método de pesquisa	77
4.3.1	<i>Amostra e coleta dos dados.</i>	77
4.3.2	<i>Medidas e operacionalização</i>	79
4.3.3	<i>Análise de dados</i>	80
4.4	Resultados	80
4.4.1	<i>Modelo de mensuração</i>	80
4.4.2	<i>Modelo estrutural</i>	82
4.4.3	<i>Teste de hipótese.</i>	83
4.5	Discussões	85
4.6	Considerações finais	88
4.6.1	<i>Implicações teóricas</i>	88
4.6.2	<i>Implicações práticas</i>	89
4.6.3	<i>Limitações e pesquisas futuras</i>	90
CAPÍTULO 5: ARTIGO 3 - INOVAÇÃO ABERTA PARA A ECONOMIA		
CIRCULAR: ESTUDO DE CASOS NO SETOR DE MINERAÇÃO 91		
5.1	Introdução.....	92
5.2	Revisão teórica	95
5.2.1	<i>Economia circular na indústria de mineração.</i>	95
5.2.2	<i>Inovação aberta para uma indústria de mineração mais sustentável</i>	98
5.3	Método de pesquisa	101
5.4	Resultados	102
5.4.1	<i>Perfil das empresas.</i>	102
5.4.2	<i>A economia circular na empresa A</i>	105
5.4.3	<i>Inovação aberta para a economia circular na empresa A</i>	107
5.4.4	<i>A economia circular na empresa B</i>	108
5.4.5	<i>Inovação aberta para a economia circular na empresa B</i>	110
5.5	Discussões e implicações	110
5.6	Considerações finais	112
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES 114		
6.1	Contribuições teóricas.....	114
6.2	Implicações práticas.....	118

6.3	Limitações e direções futuras	120
REFERÊNCIAS	.....	122
APÊNDICES	.....	144
Apêndice A - Resumo dos artigos analisados no artigo 1	.....	144
Apêndice B – Carta convite e questionário de pesquisa referentes ao artigo 2	.....	150
Apêndice C – Roteiro de entrevista referente ao artigo 3	.....	153

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo apresenta a contextualização do tema, objetivos, justificativas e a estrutura desta tese. Na contextualização são abordados os temas relacionados à economia circular (EC), inovação aberta e Indústria 4.0 (I4.0) com a problematização das questões de pesquisas propostas nesta pesquisa. Em seguida, os objetivos de cada artigo juntamente com os métodos de pesquisas e justificativas adotados são apresentados para responder às questões de pesquisas. Por fim, a estrutura da tese é apresentada com as etapas realizadas neste estudo.

1.1 Contextualização e definição do problema

O conceito de economia circular (EC) ganhou destaque na última década como um “um sistema econômico regenerativo que requer uma mudança de paradigma para substituir o conceito de 'fim de vida' por reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar materiais em toda a cadeia de suprimentos” (Kirchherr *et al.*, 2023). Diferente da economia linear que é baseada principalmente na extração, produção e descarte, a EC propõe estratégias para estender a vida útil de produtos, materiais e recursos, mantendo-os por mais tempo possível dentro do conceito de sistema circular (Merli, 2018; Blomsma; Brennan, 2017). Estas estratégias envolvem a desaceleração, estreitamento e fechamento dos fluxos de materiais e energia nas cadeias de produção e consumo (Bocken *et al.*, 2016; Geissdoerfer *et al.*, 2017), e podem ocorrer nos níveis micro (produtos, empresas, consumidores), meso (eco parques industriais, cadeias de suprimentos, ecossistemas) ou macro (cidade, região, país) (Kirchherr *et al.*, 2017).

Para adotar modelos de negócios circulares, as empresas precisam repensar e inovar os seus modelos de negócios e a forma como propõem valor aos seus clientes, ao mesmo tempo, em que consideram também as facetas ambientais e sociais (Suchek *et al.*, 2021; Pieroni *et al.*, 2021). Inovar o modelo de negócio significa mudar a forma de criar, capturar e compartilhar valor, e esses objetivos estão cada vez mais correlacionados com as questões de sustentabilidade, particularmente em sua dimensão ambiental (Pieroni *et al.*, 2021). Formuladores de políticas públicas também têm discutido a implementação da EC como parte da estratégia de desenvolvimento regional/nacional. Por exemplo, o Conselho do Parlamento Europeu lançou em 2020 um novo Plano de Ação para a EC

centrado na prevenção e gestão de resíduos, objetivando desenvolver uma economia de baixo carbono, sustentável e eficiente em recursos, como extensão dos esforços iniciados em 2015 (Silva, 2021; Europarl, 2021).

Apesar dos esforços, a transição para a EC segue de forma lenta e não atingiu ainda um estágio amplo de implementação (Jesus *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). Assim muitos estudos têm se concentrado em identificar as principais barreiras para implementação da EC (De Jesus; Mendonça, 2018; Kirchherr *et al.*, 2018; Garcia-Quevedo *et al.*, 2020; Jabbour *et al.*, 2020; Ritzén; Sandström, 2017). Em empresas da União Europeia, as principais barreiras encontradas são de natureza tecnológica, social, econômica, ambiental e legislativa (Kumar *et al.*, 2019). Na Suécia, as barreiras relatadas se referem à capacidade financeira limitada, falta de informação, incerteza nos resultados (mercado e ambiental), baixo comprometimento da alta administração, falta de clareza nos objetivos estratégicos, baixa conscientização e qualificação de funcionários e escassez de tecnologia e equipamentos (Shahbazi *et al.*, 2019).

Especificamente, as barreiras tecnológicas têm sido consideradas como sendo uma das principais na adoção da EC (De Jesus; Mendonça, 2018; Shahbazi *et al.* 2016; Jabbour *et al.*, 2020). Estas barreiras se referem à falta de tecnologia e equipamentos adequados (De Jesus; Mendonça, 2018; Kumar *et al.*, 2019); falta de conhecimento, habilidade e capacidade dos funcionários (Kumar *et al.*, 2019; Jaeger; Upadhyay, 2020; García-Quevedo *et al.* 2020); falta de informações sobre *design* e produção de produtos sustentáveis (Jaeger; Upadhyay, 2020). Para Ritzén e Sandström (2017), as barreiras tecnológicas estão diretamente associadas com as restrições financeiras, uma vez que a adoção da EC exige mudanças significativas de produtos e processos de produção e o impacto dessas mudanças pode aumentar os custos da empresa.

Diante das dificuldades para ampliar a adoção da EC nas empresas, a inovação tem sido citada como a base das mudanças industriais para alcançar a EC (Kirchherr *et al.*, 2023). Segundo Prieto-Sandoval *et al.* (2018), a implementação do modelo circular requer inovações ambientais cíclicas e regenerativas na forma como a sociedade legisla, produz e consome. Isso significa, um trabalho conjunto de várias partes interessadas (produtores, consumidores, formuladores de políticas e acadêmicos) para realizar inovações tecnológicas em direção à EC (Kirchherr *et al.*, 2023).

Uma forma de estabelecer redes, alianças e estratégias para melhorar o desempenho inovador nas empresas é considerar o modelo de inovação aberta. Embora, a inovação orientada para a circularidade tenha sido discutida recentemente (Brown *et*

al., 2020; Brown *et al.*, 2021), o conceito de inovação aberta foi apresentado por Henry Chesbrough em 2003. Naquela oportunidade, Chesbrough (2003) defendia que no ambiente competitivo e globalizado as empresas não poderiam inovar de forma isolada, mas sim de forma colaborativa, enquanto participam de um processo cocriativo. Bogers, Chesbrough e Strand (2020) afirmam que a inovação aberta e sustentabilidade se integram quando as empresas precisam resolver problemas ambientais em um cenário de incerteza e alta complexidade, exigindo um esforço coordenado e colaborativo que se baseia nas competências complementares de várias organizações.

Esse conceito é reforçado por Payán-Sánchez *et al.* (2021), ao mostrar que 80% dos artigos de inovação aberta publicados nos últimos cinco anos têm intersecção com a sustentabilidade. Porém, ainda são poucas as investigações que relacionam a inovação aberta e a EC. Por exemplo, no nível micro da EC, a colaboração e a cocriação entre clientes e desenvolvedores de projetos podem aprimorar soluções de *design* e requisitos do usuário em sistemas produto-serviço (Cong *et al.*, 2020) e aumentar a conscientização dos consumidores para as práticas sustentáveis da EC (James *et al.*, 2019; Schroder *et al.*, 2019). No nível meso, a intermediação cooperativa entre empresas da rede de simbiose industrial da Finlândia tem ajudado a reduzir os dilemas de abertura e demonstração de valor dos resíduos (Patala *et al.*, 2020). No nível macro as comunidades inteligentes puderam ser ampliadas e amparadas por práticas de inovação aberta que envolvessem os cidadãos locais, pesquisadores, governantes para propor solução relacionadas à gestão de resíduos, questões energéticas, mobilidade sustentável, conectividade, dentre outras questões socioambientais.

Para ampliar o conhecimento e debate sobre as relações entre EC e inovação aberta, o primeiro artigo da tese buscou investigar como a inovação aberta poderia contribuir para adoção da EC, especialmente para reduzir as barreiras tecnológicas. Assim, o primeiro artigo da tese buscou responder a seguinte questão de pesquisa:

QPI: Como a inovação aberta pode contribuir para a implementação da economia circular?

Ao adotar as práticas da inovação aberta, as empresas podem aumentar sua capacidade para adquirir e explorar as tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) (Hizam-Hanafiah; Soomro, 2021). As tecnologias da I4.0, por sua vez, têm sido consideradas fundamentais na transição para adoção dos princípios da EC (Ranta *et al.*, 2021; Bag *et al.*, 2021a; Bag *et al.*, 2021b; Kumar *et al.*, 2021; Hoosain *et al.*, 2020; Rajput; Singh, 2020). Nessa linha, Rajput e Singh (2020) incluem a I4.0 como uma das principais

estratégias para abordar os 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar) no setor de manufatura, pois dentro desse novo paradigma, as máquinas e os seres humanos podem ser integrados com as operações no chão de fábrica para trabalhar de forma coordenada, em que os processos são automatizados para a transmissão de dados entre as plataformas físicas e digitais.

Além disso, as tecnologias da I4.0 podem permitir a redução do consumo de energia, emissão de carbono e, também, fornecer transparência aos produtos orientados por dados que promovam práticas éticas de responsabilidade do produtor e produção mais limpa (Rajput; Singh, 2020). Isso é possível, porque a infraestrutura de sensores em rede integrada ao ambiente da I4.0 fornece informações automatizadas em tempo real, que são assimilados por bancos de dados externos ou por sistemas ciber físicos, possibilitando promover melhorias de processos com rapidez (Rajput; Singh, 2020).

As tecnologias da I4.0 incluem *Internet* das coisas (IoT), computação em nuvem, sistemas ciber físicos, *big data*, manufatura aditiva e inteligência artificial (Pinheiro *et al.*, 2021; Bag *et al.*, 2021a; De Sousa Jabbour *et al.*, 2018). Diversos exemplos podem ser encontrados na literatura sobre como as tecnologias da I4.0 podem ajudar na adoção da EC. Na indústria de petróleo, a IoT pode fazer previsões de demanda de produtos refinados e resíduos, ajudando a reduzir estoques desnecessários e potenciais faltas para fechamento do fluxo de recursos (Ranta *et al.*, 2021). A manufatura aditiva em comparação com a usinagem tradicional pode consumir menos material e reduzir significativamente o peso dos materiais feitos de metais ou plásticos, dependendo da geometria do produto (Laskurain-Iturbe *et al.*, 2021). A combinação das tecnologias de computação em nuvem e de *big data* podem reduzir os custos logísticos relacionados ao reparo e coleta de lixo eletrônico (Modgil *et al.*, 2021).

Além disso, a digitalização proporcionada pelas tecnologias da I4.0 pode facilitar a promoção de modelos de negócios para a EC, pois permite melhorar a eficiência dos processos e dos produtos, fornecendo informações confiáveis para fechar os ciclos de recursos (Rajput; Singh, 2020; Cezarino *et al.*, 2019). Por exemplo, algumas empresas no Brasil vêm utilizando sensores, IoT, análise de *big data* e inteligência artificial para oferecer soluções baseadas no uso e não na propriedade do produto, dentro da proposta da economia de compartilhamento (Jabbour *et al.*, 2020). A economia de compartilhamento pode aumentar a pressão por produtos mais duradouros, melhorando a eficiência dos recursos, o que conseqüentemente reduz a necessidade de extração de materiais virgens da natureza (Jabbour *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o modelo de inovação aberta pode ajudar as organizações a desenvolverem as capacidades tecnológicas necessárias para adoção das tecnologias da I4.0 (Rocha et al., 2022; Lepore et al., 2023; Petruzzelli et al., 2021), pois os fluxos de entrada e saída de conhecimento podem complementar os recursos existentes para apoiar as atividades de inovação. Um exemplo, são as parcerias colaborativas com universidades e empresas de tecnologia no setor calçadista que geraram inovação baseada na tecnologia IoT, ao mesmo tempo que reduziram o impacto ambiental da cadeia produtiva de calçados (Lepore *et al.*, 2023). Centros de pesquisas e universidades também foram os principais parceiros “não industriais” para a transformação digital em direção à Indústria 4.0 em uma multinacional brasileira (Rocha *et al.*, 2022). De acordo com os autores, a colaboração com parceiros “não industriais” tem como objetivo fornecer pesquisa e desenvolvimento de tecnologia, planejamento conjunto, testes e desenvolvimento de padrões industriais.

Assim, para complementar os resultados do artigo 1 e ampliar a compreensão das relações entre inovação aberta, EC e tecnologias da I4.0, o segundo artigo da tese se propôs a responder as seguintes questões de pesquisa:

QP2: Qual o impacto da adoção da inovação aberta na implementação da economia circular?

QP3: Qual a contribuição das tecnologias da Indústria 4.0 na relação entre a inovação aberta e a economia circular?

Integrar o conceito de inovação aberta para lidar com questões de circularidade e sustentabilidade pode ajudar a desenvolver soluções mais eficazes e eficientes para as indústrias (Ahmad; Iraldo, 2024). Especificamente, a indústria de mineração tem passado por um processo de transição para operar em uma EC. Com uma contribuição de 0,5% do PIB global e responsável por 4 e 7% das emissões de gases de efeito estufa (Upadhyay *et al.*, 2021), a indústria de mineração é uma grande consumidora de energia, representando 15% do consumo global de eletricidade e 11% do uso global de energia (Pouresmaieli *et al.*, 2023). Além disso, países como Brasil, Chile, China e África do Sul possuem forte dependência econômica da atividade de mineração.

Com o crescimento da população ocorre um aumento natural no consumo de recursos minerais, intensificando, portanto, a demanda pelas atividades de mineração (Ma *et al.*, 2024). Historicamente, o crescimento das atividades de extração de minerais tem aumentado as chances de desastres ambientais. No Brasil os desastres ambientais associados à mineração incluem o rompimento das barragens de rejeito de Mariana em

2015 e de Brumadinho no ano de 2019, ambas no Estado de Minas Gerais (Santos; Bernardo, 2021). As explosões de rocha, terremotos que acontecem nos desastres ambientais da mineração geram vibrações que se propagam não apenas no terreno minerado, mas também por longas distâncias afetando edifícios, estruturas e outras barragens localizados na superfície (Zhang *et al.*, 2020). A implementação dos princípios da economia circular em instalações minerárias podem, portanto, aumentar a eficiência da produção e reduzir a pressão sobre o meio ambiente e sociedade, por meio de uma política de produção que priorize a circulação de recursos e, ao mesmo tempo, incentive a descarbonização (Ma *et al.*, 2024). Neste contexto e recentemente, vários estudos têm analisado implementação das práticas de EC na indústria de mineração (Sulista *et al.*, 2023; Palacios *et al.*, 2021, Ye *et al.*, 2022; Pouresmaieli *et al.*, 2023).

As principais práticas de EC adotadas pela indústria de mineração incluem a gestão de resíduos com reaproveitamento e reciclagem dos rejeitos minerais (Palacios *et al.*, 2021, Ye *et al.*, 2022; Sulista *et al.*, 2023), a preocupação em reduzir o consumo de energia, água e outros recursos naturais nas operações (Palacios *et al.*, 2021; Ruokonon, 2021) e aumento do uso de energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis (Pouresmaieli *et al.*, 2023). Paralelamente à adoção dessas práticas, os estudos também têm relatado barreiras e desafios concentrados nas dimensões tecnológicas, organizacionais e ambientais (Osei *et al.*, 2023; Sulista *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2020; Marinina *et al.*, 2022).

Proporcionar um ambiente favorável para a inovação, pode ajudar a reduzir as barreiras para uma mineração mais sustentável. Elokhova *et al.* (2023) afirmam que as inovações na indústria de mineração têm reduzido o consumo de eletricidade e água dos corpos hídricos naturais. A inovação tecnológica nas mineradoras tem o potencial de melhorar eficiência, produtividade, além estabelecer condições de segurança no trabalho em minas subterrâneas, por exemplo. A inovação aberta na mineração pode ajudar a complementar os recursos e conhecimento necessários para melhorar a capacidade inventiva do setor (Kinnunen *et al.*, 2019). A cooperação dos gestores de mineração com o governo e cientistas podem criar um ambiente favorável para a inovação sustentável (Brodny; Tutak, 2022).

Com uma abordagem complementar, o terceiro artigo da tese buscou ampliar a compreensão de como as práticas de inovação aberta podem estimular a inovação para a EC na indústria de mineração, propondo a seguinte questão de pesquisa:

QP4: Como as práticas de inovação aberta podem contribuir para a adoção da economia circular na indústria de mineração?

Ao responder as três questões de pesquisa, espera-se que os resultados desta tese ajudem a ampliar o conhecimento sobre relações entre inovação aberta e EC, fornecendo, da teoria à prática, as contribuições que orientem acadêmicos, gestores e formuladores de políticas públicas na condução de uma economia mais sustentável.

1.2 Objetivo da pesquisa e justificativas

Considerando as questões de pesquisas apresentadas anteriormente, o objetivo geral da tese é analisar como a inovação aberta pode contribuir e impactar a implementação da economia circular. Para isso, três etapas metodológicas foram planejadas, sendo cada etapa sistematizada no formato de um artigo científico. Na primeira etapa foi realizada um estudo exploratório e qualitativo, por meio da aplicação de uma revisão sistemática da literatura para identificar os principais trabalhos publicados na área de EC e inovação aberta. Esta primeira etapa buscou aumentar a compreensão sobre como a inovação aberta pode contribuir para a EC. A segunda etapa foi realizada por uma pesquisa *survey* com abordagem quantitativa, na qual buscou investigar as relações do modelo conceitual envolvendo inovação aberta, EC e tecnologias da Indústria 4.0, sob a teoria da capacidade absorptiva. Por fim, a terceira etapa envolveu a aplicação de dois estudos de caso na indústria de mineração para analisar de forma mais aprofundada como as práticas de inovação aberta podem contribuir para a EC. As questões de pesquisas, objetivos específicos, justificativas e métodos utilizados em cada etapa estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Questões de pesquisa, objetivos específicos, justificativas e métodos de pesquisas dos artigos da tese

Etapa	Questão de pesquisa (QP)	Objetivo específico (OE)	Justificativa	Método de pesquisa
Artigo 1	(QP1) Como a inovação aberta pode contribuir para a adoção da economia circular?	(OE1) Identificar e descrever como a inovação aberta pode ajudar a reduzir as barreiras para adoção da economia circular nos níveis micro, meso e macro.	A inovação aberta pode ajudar a reduzir as barreiras tecnológicas na adoção da economia circular (Brown <i>et al.</i> , 2020; Brown <i>et al.</i> , 2021).	Revisão sistemática da literatura
Artigo 2	(QP2) Qual o impacto da adoção da inovação aberta na implementação da economia circular?	(OE2) Verificar se a adoção das práticas de inovação aberta impactam positivamente a implementação da economia circular.	A inovação orientada à circularidade auxilia no acesso à recursos e conhecimentos complementares para implementar a economia circular (Brown <i>et al.</i> , 2021).	Survey e Modelagem de Equações Estruturais
	(QP3) Qual a contribuição das tecnologias da Indústria 4.0 na relação entre a inovação aberta e economia circular?	(OE3) Verificar se as tecnologias da Indústria 4.0 mediam a relação entre a inovação aberta e a implementação da economia circular.	A inovação aberta pode facilitar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (Rocha <i>et al.</i> , 2022; Lepore <i>et al.</i> , 2023). As tecnologias da Indústria 4.0 podem facilitar a economia circular (Rejeb <i>et al.</i> , 2022; Hettiarachchi <i>et al.</i> , 2022).	
Artigo 3	(QP4) Como as práticas de inovação aberta podem contribuir para a adoção da economia circular na indústria de mineração?	(OE4) Analisar como as práticas de inovação aberta contribuem para a adoção da economia circular na indústria de mineração.	A inovação aberta melhora o desempenho em inovação de produto e processo na indústria de mineração, em direção à uma economia mais circular (Brodny; Tutak, 2022a; Brodny; Tutak, 2022b).	Estudos de caso

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Embora a inovação aberta e a EC sejam temas amplamente estudados separadamente, poucos estudos têm analisados esses temas conjuntamente (Ahmad *et al.*, 2024). Assim, esta tese busca integrar os dois temas para responder as questões de pesquisas apresentadas no Quadro 1.

A elaboração do artigo 1 justifica-se pela falta de estudos que revisam sistematicamente a literatura entre inovação aberta e EC. Outra justificativa, é a falta de pesquisas que propõem discussões que ajudam a superar as barreiras tecnológicas na implementação da EC. Para considerar a inovação aberta como uma estratégia para superar as barreiras tecnológicas, foram considerados estudos anteriores que indicavam o

potencial da inovação orientada a circularidade (Brown *et al.*, 2020; Brown *et al.*, 2021) e o papel da inovação aberta em problemas ambientais complexos (Borgers *et al.*, 2020).

A elaboração do artigo 2 justifica-se pela escassez de estudos quantitativos que relacionam a inovação aberta, EC e as tecnologias da I4.0. Além disso, argumenta-se que a inovação aberta pode favorecer o desenvolvimento tecnológico, pois permite o acesso a recursos e conhecimentos externos que ajudam na criação e captura de valor do negócio (Chesbrough; Vanhaverbeke; West, 2017). Exemplos de como a inovação aberta pode favorecer a adoção de tecnologias da I4.0 podem ser encontradas em Rocha *et al.* (2022), Lepore *et al.* (2023) e Petruzzelli *et al.* (2021).

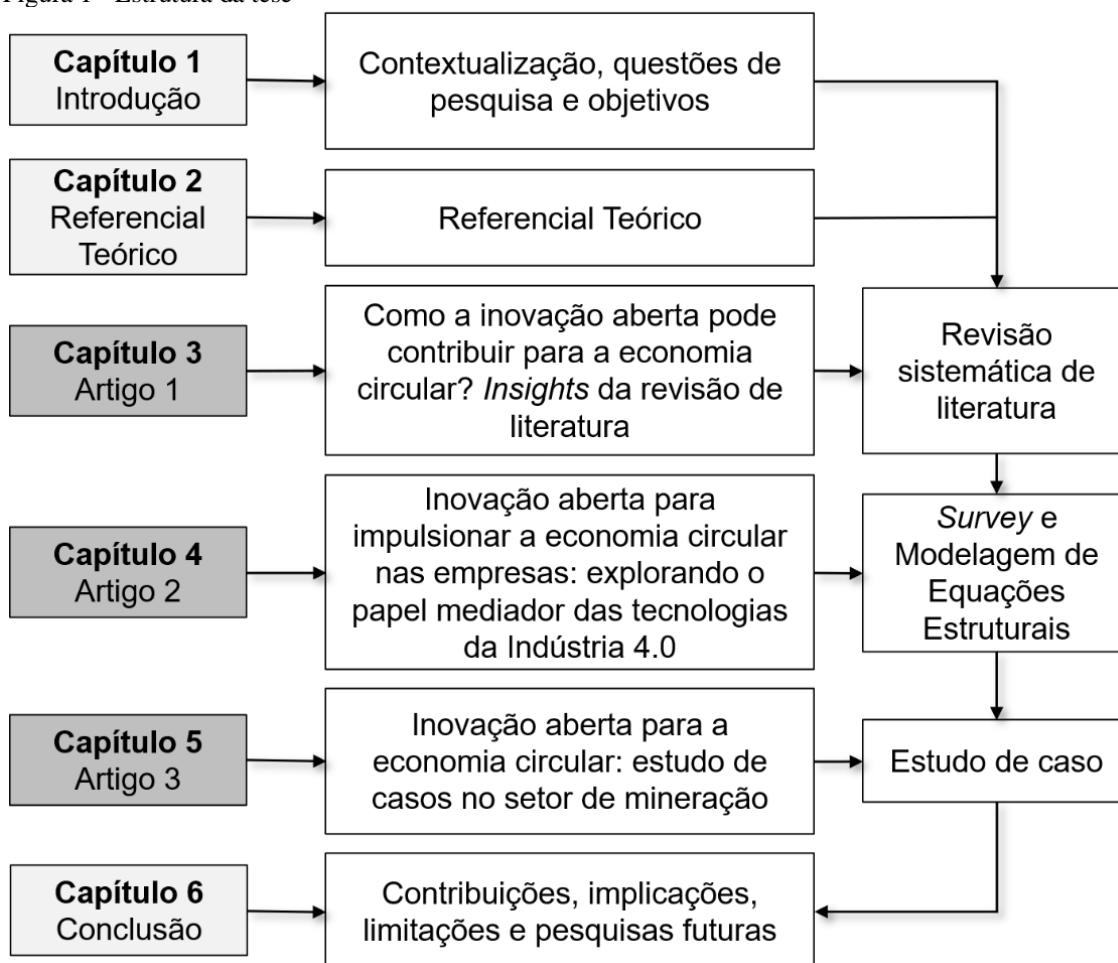
Por sua vez, as tecnologias da I4.0, como por exemplo, *big data*, inteligência artificial e internet das coisas são essenciais para que as empresas consigam implementar os princípios da EC (Bag *et al.*, 2020; Bag *et al.*, 2021b; Sousa Jabbour *et al.*, 2018). Assim, a adoção da inovação aberta tem o potencial, tanto para reduzir as barreiras tecnológicas quanto para favorecer o desenvolvimento de novas tecnologias que apoiem a EC.

Por fim, a elaboração do artigo 3 direcionado para a indústria de mineração, se justifica pela importância econômica do setor para as outras indústrias fornecendo materiais primários para a fabricação de produtos (como por exemplo, minério de ferro, ouro, lítio, cobre, bauxita, carvão, granito), além do impacto ambiental e social causado pelas atividades de extração e produção (Watts *et al.*, 2023). Como a descarbonização na indústria de mineração está associada com as iniciativas da EC (Upadhyay *et al.*, 2021), é importante analisar como as práticas de inovação aberta podem aumentar a capacidade de inovação de produtos e processos (Brodny; Tutak, 2022a; Brodny; Tutak, 2022b).

1.3 Estrutura da tese

A estrutura da tese é composta por seis capítulos, dos quais três capítulos são artigos completos (capítulos 3, 4 e 5). Os capítulos 1, 2 e 6 não são artigos, pois se referem à Introdução, Referencial Teórico e Conclusão, respectivamente. A Figura 1 sintetiza a estrutura da tese.

Figura 1 - Estrutura da tese



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Este primeiro capítulo de Introdução apresenta a contextualização, as questões de pesquisa, bem como os objetivos, os métodos de pesquisas e justificativas utilizados nos artigos da tese. No capítulo 2, será apresentado um referencial teórico dos temas principais da tese: inovação aberta e economia circular. O capítulo 3 apresentará o primeiro artigo da tese sobre a revisão sistemática da literatura mostrando como a inovação aberta pode contribuir para a EC. No capítulo 4, será apresentado o segundo artigo com a etapa quantitativa de teste das hipóteses da inovação aberta na implementação da EC. O capítulo 5 apresentará o terceiro artigo com os resultados de dois estudos de casos realizados na indústria de mineração para mostrar como as práticas de inovação aberta contribuem para a EC. Por fim, o capítulo 6 faz uma integração dos resultados da tese, mostrando as principais contribuições, implicações (teóricas e práticas), limitações e direções de pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

O segundo capítulo desta tese apresenta os conceitos e as características dos dois principais temas abordados neste estudo que são sobre a economia circular e a inovação aberta.

2.1 Economia circular

Os economistas ambientais Pearce e Turner (1990) introduziram o conceito de sistema econômico circular com base em estudos anteriores do economista ecológico Boulding (1966), como uma alternativa ao modelo de economia linear (produzir-usar-descartar). Boulding defendia que um sistema econômico circular deveria ser pré-requisito para a sustentabilidade da vida humana na Terra.

A Fundação Ellen Macarthur (FEM, 2023), principal instituição promotora da economia circular (EC) no mundo, atribui a origem da EC a diversas escolas do pensamento da área ambiental que desenvolveram e refinaram o seu conceito. Essas escolas do pensamento são a biomimética, economia do desempenho, ecologia industrial, *design* regenerativo, economia azul e berço a berço. Complementando essa visão, Hentges *et al.* (2021) adicionam outras abordagens e iniciativas sustentáveis, como a economia verde e a ecologia industrial, que também contribuíram para a discussão da EC. Um breve resumo dessas escolas de pensamento está apresentado no Quadro 2.

Embora a discussão sobre a EC tenha ganhado força nos últimos anos, o Quadro 2 mostra que as discussões começaram bem antes, na década de 50. Desde a década de 70, o conceito de EC vem despertando interesse e na última década a EC foi um dos temas mais debatidos por acadêmicos, empresários e formuladores de políticas públicas da área ambiental (Tang; Chau, 2022; Korhonen *et al.*, 2018). Esse interesse crescente pelo tema pode ser atribuído à necessidade global de desenvolver sistemas de produção e consumo mais sustentáveis, especialmente, diante da escassez de recursos naturais (Geng; Sarkis; Bleischwitz, 2019), as quais foram agravadas nos últimos anos.

Com a intensificação deste debate, várias tentativas para conceituar a EC surgiram na literatura. Por exemplo, a FEM (2015, p. 5) apresenta a EC como uma economia “restauradora e regenerativa por design”. Geissdoerfer *et al.* (2017, p. 766) conceituam a EC como “um sistema regenerativo no qual a entrada de recursos e resíduos, emissões e

vazamento de energia são minimizados por retardar, fechar e estreitar os ciclos de material e energia”.

Quadro 2 - Escolas do pensamento que contribuíram para a origem da economia circular

Escola do pensamento	Descrição	Promotor
Biomimética	A biomimética apresenta a natureza como a maior inspiração para resolver problemas humanos. Pois, entende que a natureza já resolveu a maioria dos problemas com os quais estamos lidando atualmente.	Schmitt (1957)
Economia de desempenho	A economia de desempenho transfere o foco da propriedade para a eficiência dos resultados. Essa abordagem busca aumentar o desempenho com o mínimo de consumo de energia e recursos materiais (Blomsma, 2018).	Stahel (1976)
Economia verde	A economia verde busca reduzir a extração de recursos naturais e minimizar a pegada de carbono de processos e produtos, a fim de melhorar os padrões sociais (Attahiru <i>et al.</i> , 2019; Milne e Mahanty, 2019; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente [PNUMA], 2014).	Nações Unidas (1987)
Pesquisa e Iniciativas de Emissões Zero (ZERI)	Com a filosofia de atingir zero emissões e desperdícios, o resíduo é apresentado pela primeira vez como um recurso (Kuehr, 2007).	Universidade das Nações Unidas (1994)
Ecologia industrial	Essa abordagem questiona o conceito de fim de vida apresentado no ZERI e mantém os recursos no ciclo de produção. Defende uma visão sistêmica dos processos de produção em que os resíduos podem servir de input, eliminando assim subprodutos indesejáveis.	Gertler (1997)
A economia azul	A economia azul usa os recursos disponíveis em sistemas em cascata, e transforma os desperdícios de um produto em insumo para criar um novo fluxo de caixa. Baseada em 21 princípios fundadores, a Economia Azul defende que as soluções sejam determinadas pelo ambiente local e pelas características físicas/ecológicas.	Pauli (2000)
Berço a berço	Berço a berço é uma filosofia de design que busca um completo impacto positivo, em que os resíduos de um processo são utilizados como recursos em outro. É uma inversão do conceito de ‘berço a túmulo’.	McDonough e Braungart (2002)

Fonte: Adaptado de FEM (2023) e Hentges *et al.* (2021)

Recentemente, a definição de Kircherr *et al.* (2017) foi atualizada para incorporar os facilitadores, que de acordo com os autores são descritos como a “aliança de partes interessadas (indústria, consumidores, formuladores de políticas, academia) e suas inovações e capacidades tecnológicas” (Kircherr *et al.*, 2023, p. 4). O Quadro 3 apresenta as principais definições de EC e suas respectivas diferenciações em relação às demais definições.

Diante do quadro conceitual de EC, Moraga *et al.* (2019) sugerem duas classificações para as definições de EC: a visão *stricto sensu* e a visão *latu sensu*. Na visão *stricto sensu*, a definição de EC delimita estratégias bem definidas, como por

exemplo, a desaceleração e o fechamento de recursos (Moraga *et al.*, 2019; Bocken *et al.* 2016). No qual a desaceleração busca estender ou intensificar o período de utilização do produto para reduzir o consumo de recursos e o fechamento de recursos busca transformar os resíduos dos fluxos lineares em recursos secundários para serem reinseridos na cadeia produtiva, tornando o fluxo de recursos circular (Bocken *et al.*, 2016).

A visão *latu sensu*, por outro lado, amplia o conceito de EC na compreensão de um sistema ou um modelo econômico (Moraga *et al.*, 2019). Essa visão pode apoiar o desenvolvimento sustentável, uma vez que incentiva a colaboração de partes interessadas como produtores, consumidores, pesquisadores e políticos, no desenvolvimento das dimensões econômica, social e ambiental (Kirchherr *et al.*, 2023; Prieto-Sandoval *et al.*, 2018).

As definições apresentadas no Quadro 3 também citam a implementação da EC, que pode ocorrer em três níveis: micro meso e macro (Kirchherr *et al.*, 2017; Prieto-Sandoval *et al.*, 2018). No nível micro, as empresas aplicam a EC para melhorar os processos de produção existentes e incentivar as inovações orientadas à sustentabilidade (Ormazabal *et al.*, 2016). No nível meso, as empresas se unem para formar uma rede de simbiose industrial com o objetivo de viabilizar a troca de informações e recursos, de modo que o resíduo descartado por uma empresa pode ser o insumo para outra empresa (Ormazabal *et al.*, 2016). E por último, com maior nível de abrangência, o nível macro considera a implementação da EC em cidades, municípios e províncias (Yuan *et al.*, 2006), por meio do desenvolvimento de políticas públicas ambientais e influência institucional.

Em uma classificação diferente, Geng, Sarkis e Bleischwitz (2019) apresentam que a implementação da EC pode ocorrer em quatro níveis: produtos, empresas, redes e políticas. Primeiro, os produtos precisam ser projetados para serem recicláveis e reutilizáveis, com base em cadeias de suprimentos verdes e produção mais limpa. Em segundo lugar, as empresas precisam de novos modelos de negócios para criar valor privado e público aos produtos. Em terceiro lugar, as redes de empresas e clientes que produzem e consomem os produtos precisam estar conectados. Em quarto lugar, as políticas públicas são necessárias para apoiar o sistema econômico circular (Geng; Sarkis; Bleischwitz, 2019).

Quadro 3 - Resumo de algumas definições de economia circular encontradas na literatura

Autor(es)	Definições	Diferencial da definição
Ellen MacArthur Foundation (2015, p. 5)	Uma economia que é restauradora e regenerativa por <i>design</i> e visa manter produtos, componentes e materiais em sua mais alta utilidade e valor em todos os momentos, distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos. É concebido como um ciclo de desenvolvimento positivo contínuo que preserva e aumenta o capital natural, otimiza a produção de recursos e minimiza os riscos do sistema através da gestão de estoques finitos e fluxos renováveis.	Apresenta os ciclos técnicos e biológicos
European Commission (2015)	Em uma economia circular, o valor dos produtos e materiais é mantido pelo maior tempo possível; os resíduos e a utilização de recursos são minimizados e os recursos são mantidos na economia quando um produto chega ao fim da sua vida útil, para serem utilizados repetidamente para criar mais valor.	Direciona os esforços de EC para estender o valor dos produtos
Geissdoerfer et al. (2017, p. 766)	Um sistema regenerativo no qual a entrada de recursos e resíduos, emissões e vazamento de energia são minimizados por retardar, fechar e estreitar os ciclos de material e energia. Isso pode ser alcançado por meio de projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem de longa duração.	Cita o uso consciente de energia, além de materiais e componentes. Apresenta estratégias para a EC, tais como, design de projeto, reparo, reutilização, remanufatura e reciclagem.
Murray, Skene, Haynes (2017, p. 377)	Um modelo econômico em que planejamento, recursos, compras, produção e reprocessamento são projetados e gerenciados, como processo e produto, para maximizar o funcionamento do ecossistema e o bem-estar humano.	Adiciona a perspectiva do desenvolvimento humano.
Prieto-Sandoval, Jaca, Ormazabal (2018, p. 610)	Um sistema econômico que representa uma mudança de paradigma na forma como a sociedade humana se relaciona com a natureza e visa evitar o esgotamento de recursos, fechar circuitos energéticos e materiais, e facilitar o desenvolvimento sustentável por meio de sua implementação nas micro (empresas e consumidores), meso (agentes econômicos integrados em simbiose) e macro (cidade, regiões e governos). Alcançar esse modelo circular requer inovações ambientais cíclicas e regenerativas na forma como a sociedade legisla, produz e consome.	Apresenta os níveis de implementação da EC para atingir o desenvolvimento sustentável. Cita a inovação como estratégia chave para alcançar a EC.
Korhonen et al. (2018, p. 547)	Uma iniciativa de desenvolvimento sustentável com o objetivo de reduzir os fluxos lineares de produção e consumo de materiais e energia dos sistemas sociais, aplicando ciclos de materiais, fluxos de energia renováveis e em cascata ao sistema linear. A EC promove ciclos de materiais de alto valor ao lado da reciclagem mais tradicional e desenvolve abordagens sistêmicas para a cooperação de produtores, consumidores e outros atores sociais no trabalho de desenvolvimento sustentável.	Cita a cooperação de produtores, consumidores e outros atores como estratégia chave para alcançar a EC.
Bressanelli, Perona, Saccani (2018, p. 4)	Um sistema econômico restaurador e regenerativo desde a concepção, implementado por um ou mais intervenientes na cadeia de abastecimento através de um ou mais dos quatro blocos de construção (concepção circular de produtos, modelos de negócio servitizados, logística reversa e facilitadores), a fim de substituir o conceito de fim de vida por materiais de redução, reutilização, reciclagem e recuperação na produção, processos de distribuição e consumo, tanto de materiais técnicos quanto biológicos, com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável.	Apresenta as estratégias de concepção circular, servitização, logística reversa e facilitadores para substituir o fim de vida dos produtos. Cita as estratégias 3Rs aplicadas aos ciclos técnicos e biológicos.

Kirchherr, Reike, Hekkert (2017, p.229)	Um sistema econômico que substitui o conceito de 'fim de vida' por reduzir, alternativamente reutilizar, reciclar e recuperar materiais nos processos de produção/distribuição e consumo. Atua nos níveis micro (produtos, empresas, consumidores), meso (parques ecoindustriais) e macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de realizar o desenvolvimento sustentável, criando simultaneamente qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social, em benefício das gerações atuais e futuras. Ela é viabilizada por novos modelos de negócios e consumidores responsáveis.	Apresenta os níveis de implementação da EC. Cita o desenvolvimento sustentável como finalidade da EC. Cita os modelos de negócios e consumidores responsáveis como facilitadores.
Kirchherr et al. (2023, p. 4)	Um sistema econômico regenerativo que requer uma mudança de paradigma para substituir o conceito de 'fim de vida' por reduzir, alternativamente reutilizar, reciclar e recuperar materiais em toda a cadeia de suprimentos, com o objetivo de promover a manutenção do valor e o desenvolvimento sustentável, criar qualidade ambiental, desenvolvimento econômico e equidade social, em benefício das gerações atuais e futuras. É facilitada por uma aliança de partes interessadas (indústria, consumidores, formuladores de políticas, academia) e suas inovações e capacidades tecnológicas.	Cita estratégias 3Rs na cadeia de suprimentos. Atualiza os facilitadores para <i>stakeholders</i> , inovações e capacidades tecnológicas.

Fonte: Adaptado de Montag (2023)

Independente da classificação adotada, observa-se um conjunto de práticas para implementação da EC fundamentadas na estrutura dos R's. Por exemplo, os princípios dos 3R's (reduzir, reusar e reciclar) estão no centro da Lei de Promoção da Economia Circular de 2008 (PRC, 2008; Liu *et al.*, 2017; Kirchherr *et al.*, 2017). Os princípios dos 4R's (reduzir, reusar, reciclar, recuperar) estão dispostos na Diretiva da Estrutura de Resíduos da União Europeia (Comissão Europeia, 2008; Kirchherr *et al.*, 2017). E mais recentemente, os princípios dos 10 R's (reduzir, reutilizar, recusar, repensar, remanufaturar, reparar, reformar, reaproveitar, reciclar e recuperar) tem sido proposto para medir a EC (Reike *et al.*, 2018).

Khan *et al.* (2021) sugerem que a medição do nível de implementação da EC nas empresas seja guiada por um conjunto de práticas que permita medir todas as fases do ciclo de vida do produto, desde o projeto do produto/design até a reciclagem. Pois, as empresas podem estar em fases diferentes de implementação da EC. As dez práticas de EC sugeridas por Khan *et al.* (2021) para medir a EC estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Práticas para medir a implementação da economia circular nas empresas

Fase	Prática
Projeto do produto/design	Usa produtos/ materiais para serem facilmente reformados/ remanufaturados ou reparados
Projeto do produto/design	Usa materiais biodegradáveis e/ou recicláveis
Consumo e obtenção dos recursos/matéria-prima	Usa embalagens biodegradáveis e/ou recicláveis
Consumo e obtenção dos recursos/matéria-prima	Utiliza subprodutos ou materiais reciclados de outras empresas no processo de produção
Produção	Fechamento dos ciclos no processo de produção, por exemplo, elimina vazamentos, desperdícios ou minimiza a geração de resíduos
Produção	Busca pela eficiência de material e energia do processo produtivo com foco na sustentabilidade
Produção	Transferência ou venda de subprodutos para outras empresas
Produção	Fornecimento de serviços de atualização/reparo/reforma dos produtos aos clientes
Coleta	Coleta dos produtos no fim de vida
Reciclagem	Reciclagem de resíduos gerados de produção da empresa

Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2021)

Apesar das práticas fornecidas pela literatura, a implementação da EC nas empresas ainda é um desafio. Por isso, muitos estudos tem analisado as barreiras para implementação da EC nas empresas (Kirchherr *et al.*, 2018; Ritzén; Sandström, 2017; Agyemang *et al.*, 2019; Jabbour *et al.*, 2020; García-Quevedo *et al.*, 2020; Jesus *et al.*,

2023). Além disso, na definição mais recente sobre EC oferecida por Kirzherr *et al.* (2023), é possível identificar uma preocupação em destacar os facilitadores para implementar a EC, apresentados como a colaboração entre os *stakeholders* (indústria, consumidores, formuladores de políticas, academia), inovações e capacidades tecnológicas. Para compreender como as colaborações poderiam impactar a implementação da EC, a próxima seção apresenta o conceito e as práticas relacionadas à inovação aberta.

2.2 Inovação aberta

O conceito de inovação aberta foi lançado em 2003 por Henry Chesbrough com a publicação do livro *Open Innovation: the new imperative for creating and profiting from technology*. Esse modelo de inovação sugere que as empresas podem se beneficiar de conhecimentos externos como por exemplo, de clientes, fornecedores, universidades e até mesmo de concorrentes para melhorar o seu desempenho em inovação (Chesbrough, 2003; Cheng; Huizingh, 2014).

O surgimento da inovação aberta diante da inovação fechada representou uma mudança de paradigma na forma de inovar (Cricelli *et al.*, 2023). Pois, o modelo tradicional de inovação fechada considerava apenas os recursos e conhecimentos internos da organização para promover a inovação, priorizando investimentos internos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e ideias de profissionais de dentro da organização (Camilleri *et al.*, 2023).

Portanto, compreender a inovação aberta é reconhecer que nem a empresa internamente não possui as habilidades e conhecimentos necessários para acompanhar as inovações do mercado e, por isso, a intensificação do acesso a fontes de conhecimentos internos e externos é fundamental para complementar os recursos internos e melhorar o desempenho em inovação (Chesbrough, 2003). Assim, a inovação aberta pressupõe que as empresas podem e devem usar ideias externas, bem como ideias internas, e caminhos internos e externos para o mercado, à medida que procuram avançar suas inovações (Borgers *et al.*, 2018).

O Quadro 5 apresenta algumas definições propostas para a inovação aberta. Na primeira definição, Chesbrough (2003) propõe que as ideias externas poderiam ser acessadas por meio da colaboração com *stakeholders* como clientes, fornecedores,

startups, especialistas, autoridades locais, laboratórios públicos e privados, escolas e universidades e ONGs, por exemplo. A quantidade de fontes externas consideradas no processo de inovação seria definida por Laursen e Salter (2006) como a abertura da empresa. Entretanto, Henkel (2006) discorda dessa visão ao considerar a abertura como a revelação de ideias antes ocultas dentro das organizações. Para Dahlander e Gann (2010), a abertura das empresas pode ser motivada por objetivos pecuniários (recompensas financeiras) ou não pecuniários (recompensas não financeiras) dos fluxos de entrada ou saída de conhecimento.

Quadro 5 – Definições de inovação aberta

Definições	Referência	Diferencial da definição
A inovação aberta consiste em inovar de forma colaborativa por meio do compartilhamento de recursos, conhecimentos e habilidades entre diversos <i>stakeholders</i> : empresas, <i>startups</i> , fornecedores estratégicos, clientes especialistas, autoridades locais, laboratórios públicos e privados, escolas e universidades e ONGs.	Chesbrough (2003)	Primeira definição de inovação aberta, apresenta as possíveis fontes externas de conhecimento para exploração.
Inovação aberta é o uso de entradas e saídas propositais de conhecimento para acelerar a inovação interna e expandir os mercados para uso externo da inovação, respectivamente.	Chesbrough <i>et al.</i> (2006)	Define a inovação aberta apresentando possíveis benefícios como aceleração da inovação e expansão de mercados.
A inovação aberta representa um processo de inovação distribuído baseado em fluxos de conhecimento intencionalmente gerenciados através limites organizacionais, utilizando mecanismos pecuniários e não pecuniários de acordo com o modelo de negócios da organização.	Chesbrough e Bogers (2014, p. 17).	Propõem que a inovação aberta pode ser motivada por mecanismos pecuniários e não pecuniários.
A inovação aberta refere-se a uma mentalidade da era da informação que envolve atividades colaborativas das empresas com partes interessadas internas e externas.	Camilleri <i>et al.</i> (2023, p. 4496)	Atualiza o conceito considerando a era da informação.
A inovação aberta é uma estratégia que as empresas adotam para inovar, incorporando conhecimento de fora e de dentro de suas empresas, explorando seu conhecimento e explorando o conhecimento de seu ambiente.	Carrasco-Carvajal <i>et al.</i> (2023)	Nenhum diferencial.
A inovação aberta é uma estratégia de inovação em que as organizações utilizam conhecimentos internos e externos para alavancar seu valor de negócio, mantendo assim uma vantagem competitiva sustentável.	Sá <i>et al.</i> (2023)	Define a inovação em termos de valor para sustentar uma vantagem competitiva.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Mais recentemente, Chesbrough e Bogers (2014, p. 17) incorporaram esses objetivos de abertura de Dahlander e Gann (2010) ao sugerir que a inovação aberta representa “um processo de inovação distribuído baseado em fluxos de conhecimento intencionalmente gerenciados através limites organizacionais, utilizando mecanismos pecuniários e não pecuniários de acordo com o modelo de negócios da organização”. Outras definições têm abordado a inovação aberta como uma estratégia da era da informação que agrega valor e vantagem competitiva sustentável aos negócios (Camilleri et al., 2023; Sá et al., 2023).

Desde o lançamento do conceito, a inovação aberta tem ganhado popularidade entre acadêmicos e praticantes (Nieto *et al.*, 2023). Várias pesquisas sobre inovação aberta têm sido realizadas abordando as práticas em pequenas e médias empresas (van de Vrande *et al.*, 2009; Popa *et al.*, 2017; Albats *et al.*, 2020), em grandes empresas (Spithoven; Vanhaverbeke; Roijakkers, 2013), e o papel da inovação aberta no contexto da pandemia do COVID-19 (Chesbrough, 2020). Mais recentemente, a inovação aberta tem sido discutida em contextos orientados para o desenvolvimento sustentáveis (Brown; Bocken; Balkenende, 2020; Bogers; Chesbrough; Strand, 2020; Eisenreich; Füller; Stuchtey, 2021) e digitalizados (Nieto *et al.*, 2023; Mubarak; Petraite, 2020).

Independente do contexto considerado, as atividades colaborativas entre empresas e partes interessadas internas e externas têm buscado gerar fluxos de conhecimento e ideias que possibilitem maior agilidade nos processos inovativos, uma vez que, os objetivos podem ser unificados pela visão compartilhada entres os parceiros. Além disso, as organizações que adotam a inovação aberta podem fornecer respostas mais rápidas às necessidades de inovação, se tornando mais flexíveis nas adequações de produtos e serviços (Lippolis; Ruggieri; Leopizzi, 2023).

Essa flexibilidade pode estimular a ambidestria organizacional, que é a capacidade das organizações de segregar unidades exploratórias de suas unidades tradicionais, desenvolvendo novos modelos de negócios, tecnologias, processos, estruturas e culturas flexíveis e autônomas (em paralelo aos existentes com mercados estabelecidos) (Lippolis; Ruggieri; Leopizzi, 2023). Na lógica ambidestra, o paradigma da inovação aberta pode se manifestar de três formas nas relações interorganizacionais de P&D que são os processos *inbound*, *outbound* e acoplado (Gassmann; Enkel, 2004; Dahlander; Gann, 2010).

O processo *inbound* é caracterizado pela presença de fluxos de entrada, gerados pela introdução de ideias e conhecimento inovadores de fontes externas, como por exemplo, clientes, parceiros de negócios, universidades, instituições de pesquisa, *etc* (Chesbrough, 2015; Gassmann; Enkel, 2004). O *inbound* auxilia na redução dos custos da atividade de inovação, aumentando o acesso ao conhecimento externo e, ao mesmo tempo, possibilitando a proteção do próprio capital intelectual da empresa (Roszkowska-Menkes, 2018).

Diferente do *inbound*, o processo *outbound* é caracterizado pelos fluxos de saída, gerados pelo compartilhamento de ideias e conhecimentos inovadores em favor de sujeitos externos à organização (Katz; Allen, 1982). Nesse processo o foco é a externalização do conhecimento e da inovação da empresa. O objetivo é levar ao mercado ideias que não se adequaram ao atual modelo de negócios da firma, mas que podem ser exploradas por meio de licenciamento ou *spin-off* para comercializar as tecnologias (Carrasco-Carvajal *et al.*, 2023).

Por fim, o processo acoplado é caracterizado pela coexistência de ambos os fluxos (*inbound* e *outbound*). No processo acoplado dois (ou mais) parceiros podem intencionalmente gerenciar os fluxos mútuos de conhecimento por meio de suas fronteiras organizacionais pelas atividades conjuntas de invenção e comercialização (Chesbrough; Vanhaverbeke; West, 2017). Este processo se concentra em parcerias colaborativas com organizações e indivíduos que possuem ativos complementares, englobando a cocriação dentro de redes de parceiros. Ao realizar atividades de inovação aberta acopladas, uma empresa decide compartilhar seu capital intelectual e ganha, em troca, o acesso ao conhecimento complementar dos sócios. O processo estimula as transferências de conhecimento bilaterais ou multilaterais e a aprendizagem mútua (Roszkowska-Menkes, 2018). Ao trabalhar de forma colaborativa, os parceiros compartilham riscos, reúnem competências complementares e realizam sinergias para conquistar objetivos em comum (Roszkowska-Menkes, 2018).

Além disso, ao combinar atividades de inovação aberta de entrada e saída, as empresas podem acumular benefícios, incluindo a redução de custos e riscos, a aquisição de conhecimento e o desenvolvimento de capacidades (Nieto *et al.*, 2023). Para Lippolis, Ruggieri e Leopizzi (2023), as empresas envolvidas em atividades de inovação aberta tendem a ser pioneiras na introdução de novos produtos e serviços, ao invés de atuarem apenas como seguidoras.

O Quadro 6 apresenta algumas práticas de inovação aberta na perspectiva do *inbound* e *outbound*.

Quadro 6 - Exemplos de práticas de inovação aberta *inbound* e *outbound*

Processo	Práticas
<i>Inbound</i>	Participa de projetos de inovação com parceiros externos, como clientes, concorrentes, institutos de pesquisa, consultores, fornecedores, governo ou universidades
	Depende da contribuição de parceiros externos, como clientes, concorrentes, institutos de pesquisa, consultores, fornecedores, governo ou universidades nos projetos de inovação
	Compra produtos relacionados ao P&D de parceiros externos
	Compra propriedade intelectual, como patentes, direitos autorais ou marcas, pertencentes a parceiros externos para serem usados nos projetos de inovação
<i>Outbound</i>	Vende licenças, como patentes, direitos autorais ou marcas registradas, para outras empresas para melhor se beneficiar do esforço de inovação
	Oferta acordos de <i>royalties</i> a outras empresas para melhor se beneficiar dos esforços de inovação
	Verifica todos os usos possíveis de propriedades intelectuais para se beneficiar
	Funda <i>spin-offs</i> para melhor se beneficiar de nossos esforços de inovação

Fonte: Adaptado de Popa *et al.* (2017)

Carrasco-Carvajal *et al.* (2023), sugerem que a inovação aberta é colaborativa, no qual as empresas se esforçam para compartilhar conhecimento com seus parceiros. Nessa perspectiva, as fontes de conhecimento externo ajudam a promover uma diversificação de ideias inovadoras que aumentam as chances de sucesso da empresa. A medição nessa perspectiva pode ser realizada por meio de duas variáveis: amplitude e profundidade. A amplitude se refere ao número de fontes externas ou canais de busca considerados confiáveis pela empresa para desenvolver suas atividades de inovação (Laursen; Salter 2006). E a profundidade se refere à busca externa sobre a profundidade com que as empresas se relacionam com várias fontes ou canais de busca externos (Laursen; Salter 2006).

Além disso, Carrasco-Carvajal *et al.* (2023) estabelecem que a inovação aberta pode ser medida por meio da abertura, definida como a capacidade da organização em colaborar com os clientes e outras empresas para desenvolver novos serviços. De outra forma, a abertura estabelece o grau com que uma organização “abre suas fronteiras” para colaborar com universidades ou outros agentes externos. A abertura pode ser medida pela vontade de colaborar ou de compartilhar sua experiência; a disposição do gestor máximo em colaborar; confiança em terceiros (Ahn *et al.*, 2016). Além disso, pode incluir também em sua medição a análise de colaborações com clientes, fornecedores, concorrentes,

consultores, universidades e centros de pesquisa que são essenciais para aprimorar e desenvolver novos produtos e processos (Agostini *et al.*, 2017).

Embora, os estudos comprovem que as empresas estão buscando colaborações para inovar e melhorar o seu desempenho competitivo (Roszkowska-Menkes, 2018), a inovação aberta ainda apresenta limitações e desafios. Para Ismael *et al.* (2023), apenas construir relacionamentos com parceiros externos não garante o bom desempenho da inovação aberta. Existem outros aspectos gerenciais que devem ser considerados na gestão, tais como, a definição clara dos objetivos, seleção de bons parceiros e comunicação eficaz com os parceiros. Quanto mais cedo os objetivos forem definidos e comunicados aos parceiros, melhor será o engajamento com o projeto. Além disso, a capacidade tecnológica para apoiar a comunicação é fundamental no processo de inovação aberta (Ismael *et al.*, 2023).

Ao contrário dos funcionários de uma empresa, as partes externas envolvidas não estão sujeitas aos mesmos códigos de conduta, regras e regulamentos das empresas (Shamah; Elssawabi, 2015). Assim, a falta de confiança pode comprometer a revelação de informações sobre detalhes comerciais sensíveis relacionados ao seu capital intelectual (Gomes *et al.*, 2021). Outro desafio é a aplicação da inovação aberta na indústria de serviços que ainda precisa avançar, com a mudança dos modelos de negócio de produto para serviço (Chesbrough, 2017).

Além disso, a síndrome do não inventado aqui (*not invented here, NIH*) tem sido apontada como barreira organizacional, que dificulta a implantação da inovação aberta (Chesbrough, 2017). Isso porque esta síndrome está associada à uma resistência dos colaboradores em aceitar ideias novas que surgem externamente à empresa. O preconceito contra ideias externas dificulta a construção de relacionamentos e a comunicação com parceiros externos, podendo prejudicar a eficácia da estratégia de *inbound*. O processo *outbound* que diz respeito à externalização de ideias internas também pode ser afetado por uma síndrome chamada de síndrome do não vendido aqui (*not sold here, NSH*). Nesse caso, os colaboradores têm medo de perder vantagem competitiva sobre ideias vendidas externamente (Amann *et al.*, 2022).

2.3 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 surgiu em 2011 por uma iniciativa do governo federal alemão em parceria com universidades e empresas privadas, o objetivo era estabelecer um plano estratégico para elevar o nível de produtividade e eficiência da indústria nacional (Frank *et al.*, 2019). Na proposta da Indústria 4.0, todas as atividades de trabalho da cadeia de valor seriam realizadas com abordagens inteligentes e fundamentadas nas tecnologias de informação e comunicação (TICs) (Frank *et al.*, 2019).

Dessa forma, nota-se que a Indústria 4.0 tem suas origens na manufatura avançada ou na manufatura inteligente. Uma vez que, a manufatura inteligente pode ser definida como um sistema de linhas flexíveis que se ajustam automaticamente aos processos de produção para vários tipos de produtos, a depender das condições de mudança (Schuh *et al.*, 2017). A manufatura inteligente possibilita aumentar a qualidade, a produtividade e a flexibilidade dos arranjos produtivos, além de permitir a customização em massa, com o consumo sustentável de recursos (Dalenogare *et al.*, 2018, De Sousa Jabbour *et al.*, 2018).

Schuh *et al.* (2014, p. 52) definem a Indústria 4.0 como "a integração da tecnologia da informação e comunicação no ambiente industrial". Para Lee *et al.* (2015), a Indústria 4.0 se configura como uma aplicação de sistemas conectados e embarcados com soluções de *software* que possibilitam o controle e monitoramento da produção por meio do processamento e análise das informações extraídas do processo produtivo. Resumindo, as tecnologias da Indústria 4.0 apoiam a tomada de decisão e, portanto, contribuem para o aumento da produtividade (Saucedo-Martínez *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2017).

A Indústria 4.0 é também chamada de quarta revolução industrial. A primeira revolução industrial iniciou no final do século XVIII e início do século XIX, e foi representada pela introdução de sistemas de fabricação mecânica utilizando vapor (Xu *et al.*, 2018). A segunda revolução industrial iniciou no final do século XIX, e foi simbolizada pela produção em massa através do uso de energia elétrica. A terceira revolução industrial começou em meados do século XX e introduziu a automação e a tecnologia microeletrônica na manufatura. E a quarta revolução industrial é representada pelo uso de sistemas ciber físicos (CPS) que desencadeou a digitalização e integração de ecossistemas industriais digitais, buscando soluções integradas (Xu *et al.*, 2018).

A Indústria 4.0 também pode ser referenciada como um conjunto de tecnologias digitais baseadas na informação e comunicação. No entanto, não existe um consenso na

literatura sobre a classificação das tecnologias que compõe a Indústria 4.0. Para Xu *et al.* (2018), as principais tecnologias são sistemas ciber físicos, internet das coisas e computação em nuvem. Para Frank *et al.* (2019), as tecnologias da Indústria 4.0 são classificadas em tecnologias de *front end* e tecnologias de base.

As tecnologia de *front end* são aquelas que se preocupam com as necessidades operacionais e de mercado, e portanto, interferem na transformação das atividades de manufatura com base em tecnologias emergentes (*smart manufacturing*), na forma como os produtos são oferecidos (*smart products*), na forma como as matérias primas e o produto são entregues (*smart supply chain*) e na forma como os trabalhadores realizam suas atividades com base no suporte de tecnologias emergentes (*smart working*) (Frank *et al.*, 2019). Já as tecnologias de base têm o objetivo de suportar todas as outras tecnologias de *front end*, e incluem internet das coisas, computação em nuvem, *big data* e *analytics* (Frank *et al.*, 2019). Uma vantagem das tecnologias de base é que elas possibilitam a interconectividade, além de fornecer inteligência aos novos sistemas de fabricação (Frank *et al.*, 2019). Na linha das tecnologias de base, Delenogare *et al.* (2018) apresenta uma série de tecnologias da Indústria 4.0, cujas definições estão apresentadas no Quadro 7.

Os benefícios gerados pela implementação das tecnologias da Indústria 4.0 são diversos. Xu *et al.* (2018) destacam que o uso das tecnologias no ambiente industrial permite rastrear automaticamente as informações relacionadas ao processo de controle de pedidos, produção, qualidade entrega e reengenharia de processos. Para Khin e Kee (2022), os benefícios percebidos estão relacionados à produtividade, eficiência, flexibilidade e redução de custos de produção. Além disso, é possível alcançar maiores graus de integração, comunicação, maior taxa de transferência de dados e também maior transparência do processo (Xu *et al.*, 2018). Nos processos de fabricação flexíveis, as tecnologias da Indústria 4.0 podem ajudar a analisar uma grande quantidade de dados em tempo real, melhorando a tomada de decisões estratégicas e operacionais (Delenogare *et al.*, 2018).

Quadro 7 - Definição das tecnologias da Indústria 4.0

Tecnologia	Definição/Usos
Projeto e fabricação auxiliados por computador	Desenvolvimento de projetos e planos de trabalho para produtos e manufatura baseados em sistemas informatizados.
Sistemas integrados de engenharia	Integração de sistemas de suporte de TI para troca de informações no desenvolvimento e fabricação de produtos.
Automação digital com sensores	Sistemas de automação com tecnologia embarcada de sensores para monitoramento através da coleta de dados.
Linhas de fabricação flexíveis	Automação digital com tecnologia de sensores nos processos de fabricação (e.g. identificação por radiofrequência – RFID), para promover Sistemas de Manufatura Reconfiguráveis e possibilitar a integração e rearranjo do produto com o ambiente industrial de forma econômica.
Sistemas de Execução de Manufatura e Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA)	Monitoramento do chão de fábrica com coleta de dados em tempo real utilizando SCADA e controle remoto da produção, transformando a programação de longo prazo em pedidos de curto prazo considerando restrições.
Simulações/análise de modelos virtuais	Elementos finitos, dinâmica dos fluidos computacional, etc. para projetos de engenharia e comissionamento baseado em modelos de projeto de sistemas, onde modelos sintetizados simulam propriedades do modelo implementado.
Coleta e análise de <i>big data</i>	Correlação de grandes quantidades de dados para aplicações em análise preditiva, mineração de dados, análise estatística e outros.
Sistemas Digitais de Produto-Serviço	Incorporação de serviços digitais em produtos baseados em plataformas IoT, sensores embarcados, processadores e softwares possibilitando novas capacidades.
Manufatura aditiva, prototipagem rápida ou impressão 3D	Máquinas versáteis de fabricação para sistemas flexíveis de manufatura, transformando modelos digitais 3D em produtos físicos.
Serviços de nuvem para produtos	Aplicação da computação em nuvem em produtos, ampliando suas capacidades e serviços relacionados.

Fonte: Delenogare *et al.* (2018)

O Quadro 8 apresenta as forças motrizes e as barreiras identificadas para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0.

Quadro 8 - Forças motrizes e barreiras para implementação das tecnologias da Indústria 4.0

Forças motrizes	Barreiras
<ul style="list-style-type: none"> • Concorrência crescente • Aumento da capacidade de inovação e produtividade • Expectativas dos clientes • Esforços para economizar energia e melhorar a sustentabilidade • Fatores financeiros e de desempenho • Apoio às atividades de gestão • Oportunidade de inovação no modelo de negócio 	<ul style="list-style-type: none"> • Escassez de Recursos humanos e financeiros • Problemas de padronização • Preocupações sobre segurança cibernética e questões de propriedade de dados • Risco de fragilidade • Integração tecnológica • Dificuldade de coordenação entre as unidades organizacionais • Falta de habilidades de planejamento e atividades • Resistência organizacional

Fonte: Horváth e Szabó (2019)

Para Khin e Kee (2022), os fatores que impulsionam a adoção da Indústria 4.0 nas organizações são os benefícios operacionais, oportunidades de mercado, resolução de problemas de trabalho, requisitos dos clientes, concorrência e imagem da empresa. Por outro lado, os fatores impeditivos são as restrições financeiras associadas à transformação digital e falta de mão de obra qualificada para trabalhar com projetos da Indústria 4.0 (Khin; Kee, 2022).

Essas barreiras se intensificam nos países emergentes, onde a adoção das tecnologias da I4.0 é mais proeminente do que em países desenvolvidos (Henriquez *et al.*, 2023). Segundo Delenogare *et al.* (2018), isso acontece porque as economias dos países emergentes estão mais focadas na extração e comercialização de *commodities*, e por isso, as empresas geralmente encontram-se em estágios mais atrasados em termos de adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Os autores citam também os fatores como a infraestrutura para o desenvolvimento das TICs, cultura, nível de educação e instabilidade econômica e política, que também interferem nos investimentos em tecnologias avançadas.

Após essas considerações teóricas, o próximo capítulo explora a relação entre inovação aberta e EC, mais especificamente como as práticas de inovação aberta podem contribuir para a implementação da EC. Os resultados da revisão sistemática da literatura são apresentados e discutidos com a literatura.

CAPÍTULO 3: ARTIGO 1 - COMO A INOVAÇÃO ABERTA PODE CONTRIBUIR PARA A ADOÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR? *INSIGHTS* DE UMA REVISÃO DE LITERATURA

A versão final em inglês deste artigo foi publicada em junho de 2021 no periódico European Journal of Innovation Management (<https://doi.org/10.1108/EJIM-01-2021-0022>).

Resumo: A inovação aberta pode ser uma abordagem relevante para reduzir as barreiras de implementação da EC. Entretanto, apesar desse potencial, ainda pouco se sabe sobre a integração entre os dois temas e como a inovação aberta pode contribuir para uma economia mais sustentável. Assim, o objetivo deste estudo foi investigar como a inovação aberta pode ajudar a superar as barreiras presentes para a adoção da EC. Baseado na revisão sistemática e de conteúdo da literatura, os resultados mostram que: (i) uso da inovação aberta na EC ainda é recente e tem enfatizado a colaboração com *stakeholders* e abordagem de cocriação; (ii) A colaboração com *stakeholders* tem sido aplicada para alinhar os objetivos das partes interessadas num esforço conjunto para resolver problemas ambientais nos três níveis da EC; (iii) A abordagem de cocriação tem sido adotada como uma estratégia para incentivar a participação de consumidores na construção de produtos ambientalmente sustentáveis e no fechamento de ciclos de reciclagem; (vi) A abordagem de cocriação também tem permitido o engajamento de membros de comunidades locais para estilos de vida mais sustentáveis com melhor uso de recursos e energia, o que pode favorecer a transição para EC no nível meso.

Palavras-chave: cocriação, sustentabilidade, colaboração com *stakeholders*.

3.1 Introdução

Nos últimos anos, a economia circular (EC) tem sido anunciada como uma abordagem promissora para o desenvolvimento sustentável (Bakker *et al.*, 2021; Ghisellini *et al.*, 2016; Korhonen *et al.*, 2018; Kirchherr *et al.*, 2017). Por exemplo, o plano de ação da EC proposto pela União Europeia aborda a extensão da vida útil do produto por meio da criação de regras sobre facilidade de reparo, disponibilidade de peças sobressalentes, facilitação do tratamento de fim de vida, e por normas para medir durabilidade, reutilização, reparo, reciclagem e a presença de materiais críticos (Comissão Europeia, 2014).

Esta abordagem de circularidade se difere do atual modelo de economia linear, o qual é focado nas atividades de extração, produção, uso e descarte de resíduos. Com uma proposta diferente da economia linear, a EC visa promover inovações nos sistemas de produção e consumo para reduzir, otimizar a produção e consumo de materiais e produtos visando alcançar um equilíbrio entre economia, meio ambiente e sociedade (Sauvé *et al.*, 2016; Kristensen; Mosgaard, 2020). Kirchherr *et al.*, (2017, p. 229) define EC como “um sistema econômico que substitui o conceito de fim de vida por reduzir, alternativamente reutilizar, reciclar e recuperar materiais nos processos de produção/distribuição e consumo”. Ela opera nos níveis micro, meso ou macro. O nível micro envolve empresas, produtos, consumidores; o nível meso envolve redes de simbiose industrial e eco parques industriais; e por fim, o nível macro envolve cidades, regiões, governos nacionais ou globais (Kristensen; Mosgaard, 2020; Kirchherr *et al.*, 2017; Ghisellini *et al.*, 2016).

Os modelos de negócios que tem apoiado a transição da economia linear para a circular tem integrado diversos aspectos associados à EC, tais como: gestão de resíduos sólidos (Amenta *et al.*, 2019; Chammass *et al.*, 2020), cidades inteligentes (Cappellaro *et al.*, 2019), produção mais limpa (Sousa-Zomer *et al.*, 2018), sistema produto-serviço (Pieroni; Mcalooone; Pigosso, 2019), economia de compartilhamento (Jabbour *et al.*, 2020), análise do ciclo de vida (Reinales; Zambrana-Vasquez; Saez-De-Guinoa, 2020). Trabalhos recentes também têm recomendado a adoção dos modelos de negócios circulares como forma de romper com os padrões tradicionais da linearidade (Tu; Chan; Chen, 2020; Prieto-Sandoval *et al.*, 2019; Laumann; Tambo, 2018). Por exemplo, empresas que buscam implementar a EC devem integrar estratégias do *design* de produto circular para reduzir a velocidade fechar os ciclos de recursos (Bocken *et al.*, 2016).

No contexto da EC são várias as pesquisas que têm investigado e revelado barreiras para a sua adoção (Jabbour *et al.*, 2020; De Jesus; Mendonça, 2018; Jaeger; Upadhyay, 2019; Kumar *et al.*, 2019; Agyemang *et al.*, 2018; Garcia-Quevedo *et al.*, 2020). Por exemplo, em empresas da União Europeia e Reino Unido, Kumar *et al.* (2019) classificaram essas barreiras em tecnológicas, sociais, econômicas, ambientais e legislativas. Em relação à inovação para a EC, Kirchherr *et al.* (2017) apresenta as barreiras tecnológicas, regulatórias, de mercado e culturais como as principais.

Dentre as barreiras para a adoção da EC são vários os estudos que destacam as tecnológicas como uma das principais (De Jesus; Mendonça, 2018; Shahbazi *et al.* 2016; Jabbour *et al.*, 2020). Essas barreiras tecnológicas para implementação da EC estão associadas a elementos como falta de tecnologias e equipamentos adequados para o desenvolvimento e produção de produtos ambientalmente sustentáveis (De Jesus; Mendonça, 2018; Kumar *et al.*, 2019); falta de conhecimentos e habilidades e capacitação de funcionários (Kumar *et al.*, 2019; Jaeger; Upadhyay, 2019; Garcia-Quevedo *et al.* 2020); falta de informações sobre *design* de produtos e produção para o desenvolvimento e produção de produtos ambientalmente sustentáveis (Jaeger; Upadhyay, 2019).

De modo geral, essas barreiras tecnológicas vão desde a existência ou não de tecnologia apropriada, exemplificadas pelos atrasos e/ou demora entre o desenvolvimento de produto e processos, demora entre a invenção e produção, além da falta de pessoal especializado (De Jesus; Mendonça, 2018). Além disso, alguns trabalhos já sugerem a importância de se investigar mecanismos para superar a imaturidade tecnológica como meio facilitador para a transição da economia linear para a circular (De Jesus; Mendonça, 2018; Jabbour *et al.*, 2020; Kapoor *et al.* 2020).

Apesar das barreiras tecnológicas serem relevantes para a adoção da EC, a literatura ainda não debateu como essa abordagem pode ajudar na transição de uma economia linear para uma EC, especialmente em termos de colaboração para a inovação (Brown *et al.*, 2020; Brown *et al.*, 2021). Além disso, a EC pode ser beneficiada pela adoção de práticas de inovação aberta, uma vez que a maioria dos projetos EC são colaborativos (Brown *et al.*, 2020) e, em muitos casos, dependentes da integração de novos conhecimentos e tecnologias externas. A inovação aberta pode representar, portanto, uma forma de reduzir as barreiras tecnológicas à adoção da EC, uma vez que, por definição, ela ‘abre’ os limites organizacionais para a colaboração e troca de conhecimento com as partes interessadas externas, aproveitando atividades e capacidades

complementares, acelerando a comercialização da inovação (Elmquist *et al.*, 2009; Ovuakporie *et al.*, 2021).

Além disso, ao apresentar propostas para intensificar a colaboração com as partes interessadas (por exemplo, fornecedores, clientes e parceiros) dentro da cadeia de valor, a inovação aberta aproveita conhecimentos externos, tecnologias e recursos para o desenvolvimento de novos produtos e processos (Clausen, 2013). Dessa forma, os modelos de negócios da inovação aberta permitem que as organizações integrem e comercializem recursos e capacidades complementares que agregam valor e maximizem os lucros da inovação (Chesbrough; Crowther, 2006), que também podem ajudar as empresas a adotar modelos de negócios circulares. Da mesma forma, a inovação direcionada à EC requer colaboração, ou seja, a troca de ideias e conhecimentos com diversos atores, como outras empresas, fornecedores e clientes (Brown *et al.*, 2021).

Para reduzir essa lacuna de pesquisa e avançar no debate contemporâneo, o objetivo deste artigo é investigar como a inovação aberta pode contribuir para a adoção da EC. Para isso, o presente estudo busca responder à seguinte questão: *Como a inovação aberta pode contribuir para a adoção da economia circular?* Além de realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL), foi realizado também uma análise qualitativa dos estudos para mostrar os principais temas relacionados às áreas de inovação aberta e EC, as teorias gerenciais utilizadas para compreender esses dois conceitos e também demonstrar como a inovação aberta pode contribuir para a adoção da EC. Atualmente, não se sabe quais ações e estratégias de inovação aberta devem ser adotadas e delineadas em apoio à transição para a EC. Portanto, este estudo busca identificar e analisar como a inovação aberta poderia contribuir para a implementação da EC nos três níveis de implementação (micro, meso e macro).

O artigo está organizado em seis seções. A seção 3.2 de revisão teórica segue esta introdução e apresenta os conceitos básicos de EC e inovação aberta. A seção 3.3 analisa o método de pesquisa, delineando os protocolos de busca e a coleta e seleção de trabalhos. A seção 3.4 apresenta os resultados esperados da pesquisa, seguida da discussão na seção 3.5. Por fim, a seção 3.6 apresenta as observações finais, juntamente com implicações teóricas e práticas, além de destacar limitações e tópicos de pesquisa para futuras investigações.

3.2 Revisão teórica

3.2.1 Inovação aberta

O conceito de inovação aberta pressupõe que as empresas podem e devem usar ideias internas e externas para melhorar e acelerar seus processos de inovação, ao mesmo tempo em que disponibilizam suas ideias, conhecimentos e tecnologias para o ambiente externo (Chesbrough, 2003a; Chesbrough, 2006). Devido à natureza dinâmica desses processos de inovação, Chesbrough (2017) propõe que o conceito de inovação aberta deve evoluir para incluir modelo de negócios e inovação de serviços em contextos internos por meio de colaborações, comunidades e ecossistemas.

Tradicionalmente, existem três fluxos de conhecimento de inovação aberta: o processo *inbound*, o processo *outbound* e o processo acoplado (Chesbrough, 2017; Enkel *et al.*, 2009). O processo *inbound* envolve a busca de conhecimento externo para fortalecer a base de conhecimento interno e a capacidade de inovação da empresa (Chesbrough, 2017). O que precede o conceito desse processo é o pressuposto de que as empresas precisam de conhecimento e tecnologias que estão além de sua capacidade interna. Portanto, o *inbound* visa suprir essa necessidade e melhorar a capacidade de inovação de uma determinada empresa (Laursen; Salter, 2006). A capacidade absorptiva de uma empresa também deve ser considerada nesse processo. Embora as parcerias tradicionais sejam centradas em fornecedores e clientes, outros atores (como universidades, empresas de consultoria e até concorrentes) têm sido considerados para a absorção de conhecimentos externos (Laursen; Salter, 2014).

O processo *outbound* segue um fluxo inverso ao *inbound*. Uma vez que os resultados dos esforços internos de inovação podem ter repercussões que não agregam valor ao negócio principal de uma empresa (Barham *et al.*, 2020; Enkel *et al.*, 2009), as empresas podem optar por transferir ou vender esses resultados (ou ideias), multiplicando a tecnologia por meio da disponibilização de ideias para o ambiente externo (Enkel *et al.*, 2009). O *outbound* também pode ser feito por razões sem fins lucrativos (Barham *et al.*, 2020), em que as empresas compartilham ideias de inovação puramente com o objetivo de promover o desenvolvimento do setor (por exemplo, Bogers *et al.*, 2020). O *outbound* pode ocorrer, por exemplo, por meio de contratos de licença tecnológica ou da criação de *startups* e *spin-offs* (Chesbrough, 2006; Parida *et al.*, 2012).

Finalmente, o processo acoplado é caracterizado pela existência dos dois fluxos *inbound* e *outbound*. Para realizar o processo acoplado, as empresas colaboram e cooperam com as partes interessadas, por exemplo, estabelecendo parcerias (por meio de alianças estratégicas ou *joint ventures*) entre si, fornecedores, clientes, universidades e consultores, com o objetivo de estabelecer um caminho bidirecional, em que a abordagem de cocriação e o conceito de dar e receber são fundamentais (Enkel *et al.* 2009). No processo acoplado, as empresas desenvolvem e comercializam a inovação em conjunto por meio de uma combinação de processos *inbound* (para obter conhecimento externo) e *outbound* (para levar ideias ao mercado). Nesta etapa, a abordagem de cocriação de valor permite a maximização dos benefícios produtivos e sustentáveis do desempenho dos negócios (Sjödín *et al.*, 2016).

3.2.2 *Economia circular*

Assim como a inovação aberta foi uma mudança de paradigma na gestão da inovação, a economia circular (EC) é também uma proposta promissora para atingir o desenvolvimento sustentável e romper com o paradigma da economia linear. O conceito de EC tem suas raízes na ecologia industrial, que prevê uma forma de simbiose entre diferentes empresas e processos de produção (Andersen, 2007), para promover a minimização de utilização de recursos naturais e a geração de resíduos, assim como a adoção das tecnologias mais limpas (Andersen, 1999). A aplicação dos princípios de redução, reuso, reaproveitamento e remanufatura também propostos pela EC nas etapas de desenvolvimento de produtos, fabricação e consumo também não é algo recente na literatura. Abordagens como *design* regenerativo (Lyle, 1994), ecologia industrial (Erkman, 1997), do berço-ao-berço (Braungart *et al.*, 2007), *ecodesign* (Van Hemel; Cramer, 2012) já têm sido propostos por pesquisadores há décadas. Então, qual a novidade da EC, seria vinho velho em garrafas novas? (Bakker *et al.*, 2021), fazendo uma analogia com a definição de inovação aberta (Trott; Hartmann, 2009).

No entanto, diferente da economia linear, a EC é restaurativa e regenerativa por princípio (EMF, 2015). O seu objetivo é manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de valor o tempo todo, e para isso utiliza-se do fechamento dos ciclos técnicos e biológicos. O ciclo técnico envolve estratégias de gestão de estoques de materiais finitos, como recuperação e restauração, por exemplo. Já o ciclo biológico

gerencia o fluxo de materiais renováveis, de modo que os nutrientes renováveis (biológicos) possam ser regenerados (EMF, 2015). Além de reduzir as externalidades ambientais negativas, a EC conserva os valores de amenidade, reduz a extração excessiva de recursos, promove fluxos residuais compatíveis com a capacidade de assimilação dos sistemas biológicos e aumenta a capacidade regenerativa dos sistemas de suporte à vida (Andersen, 2007).

O *framework* ReSOLVE para a adoção da EC, proposto pela Fundação Ellen MacArthur (EMF, 2015) vem sendo utilizado em diversas pesquisas (Mendoza *et al.*, 2017; Jabbour *et al.*, 2020). O ReSOLVE recomenda a adoção da EC em seis dimensões: regenerar, compartilhar otimizar, ciclo, virtualizar e troca. Com enfoque regenerativo, a EC busca minimizar o desperdício de materiais e energia (Geissdoerfer *et al.*, 2017), priorizando modelos de negócios que substituem o conceito de sistema aberto pelo sistema fechado, por meio da redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais na cadeia de produção e consumo (Kirchherr *et al.*, 2017). Isso significa que ela prioriza o fechamento de ciclos para reduzir a necessidade de extração de matéria-prima virgem, prolongando a vida útil do produto e mantendo os materiais por mais tempo na cadeia de valor (Webster, 2015).

Finalmente, a EC pode ser analisada e adotada nos níveis micro, meso ou macro (Yuan *et al.*, 2006; Kristensen; Mosgaard, 2020), com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável (Kirchherr *et al.*, 2017; Yuan *et al.*, 2006; Andersen, 2007), juntamente com o crescimento econômico sem causar externalidades negativas sobre o meio ambiente como esgotamento de recursos naturais e degradação ambiental (Murray *et al.*, 2017; Hofmann, 2019; Andersen, 2007). O nível micro da EC refere-se a empresas que estão centradas na própria melhoria de processos e desenvolvimento de negócios, geralmente essas empresas apresentam maturidade na forma como conduzem a gestão ambiental e por consequência conseguem gerar um impacto positivo na lucratividade e na reputação entre os clientes (Ormazabal *et al.*, 2016). No nível meso as empresas avançam para trocar recursos entre si, por meio de simbiose industrial, o qual beneficia tanto a economia regional quanto o ambiente natural (Geng *et al.*, 2012). E por último, o nível macro envolve um escopo mais abrangente, como cidade, região, país ou globo, para desenvolver estratégias ambientais por meio de políticas públicas e influência institucional (Yuan *et al.*, 2006).

3.2.3 Inovação aberta e economia circular

A inovação tem sido argumentada como fator chave para impulsionar a transição para a EC (De Jesus; Mendonça, 2018; Pieroni *et al.*, 2019). No contexto da EC, a inovação ocorre não apenas nos sistemas de produção, distribuição e no ciclo de fim de vida dos produtos, mas também nos padrões de consumo (Sauvé *et al.*, 2016; Kristensen; Mosgaard, 2020). Os modelos de negócios circulares que buscam, por exemplo, o comportamento da cadeia de suprimentos e o desenvolvimento de novos produtos alinhados aos princípios da EC (Bocken *et al.*, 2016), demandam produto, processo e valorizam a inovação como elementos fundamentais (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Brown *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a inovação aberta tem potencial para impulsionar a transição para a EC, uma vez que visa ampliar os fluxos de conhecimento, acelerando o processo de inovação, bem como aumentando os mercados em benefício externo dos resultados da inovação (Chesbrough, 2003b). Por exemplo, Hu *et al.* (2017) observaram que a aquisição de tecnologias externas ajuda as empresas a responder de forma eficiente às regulamentações ambientais. Estudos recentes também sugerem que as parcerias com atores externos são um elemento fundamental para a adoção da EC (Brown *et al.*, 2020; Brown *et al.*, 2021).

Um exemplo do uso da inovação aberta em um contexto ambiental foi apresentado por Bogers *et al.* (2020), em que um cervejeiro dinamarquês desenvolveu uma garrafa de fibra verde, utilizando a abordagem inovação aberta em colaboração com parceiros complementares da cadeia de suprimentos. Brown *et al.* (2021) apresentaram um projeto de construção circular na Europa onde vários atores foram integrados na fase de projeto para fornecer experiências e capacidades para o desenvolvimento de tecnologias altamente eficientes em termos energéticos, o uso de materiais biológicos e o pagamento para o uso de serviços de construção (como elevadores). Zucchella e Previtali (2019) destacaram um caso de ecossistema circular no qual os agricultores viram as culturas de arroz e trigo aumentarem significativamente como resultado do compartilhamento de conhecimento e do trabalho com colaboradores de empresas inovadoras.

Esses exemplos mostram que a inovação aberta tem a capacidade de conduzir a transição para a EC, reduzindo barreiras tecnológicas à sua adoção, como a falta de conhecimento, a disponibilidade de soluções técnicas e as modificações necessárias aos

projetos de produtos e processos produtivos (Ritzén; Sandström, 2017; De Jesus; Mendonça, 2018). Isso porque o emprego dos conceitos de inovação aberta tende a abrir limites organizacionais, incentivando a colaboração e a troca de conhecimentos e tecnologias com diversos atores, (Chesbrough, 2003a; Ovuakpori *et al.*, 2021) que, por sua vez, normalmente favorece o desenvolvimento de projetos inovadores voltados para a EC (Brown *et al.*, 2021)

3.3 Método de Pesquisa

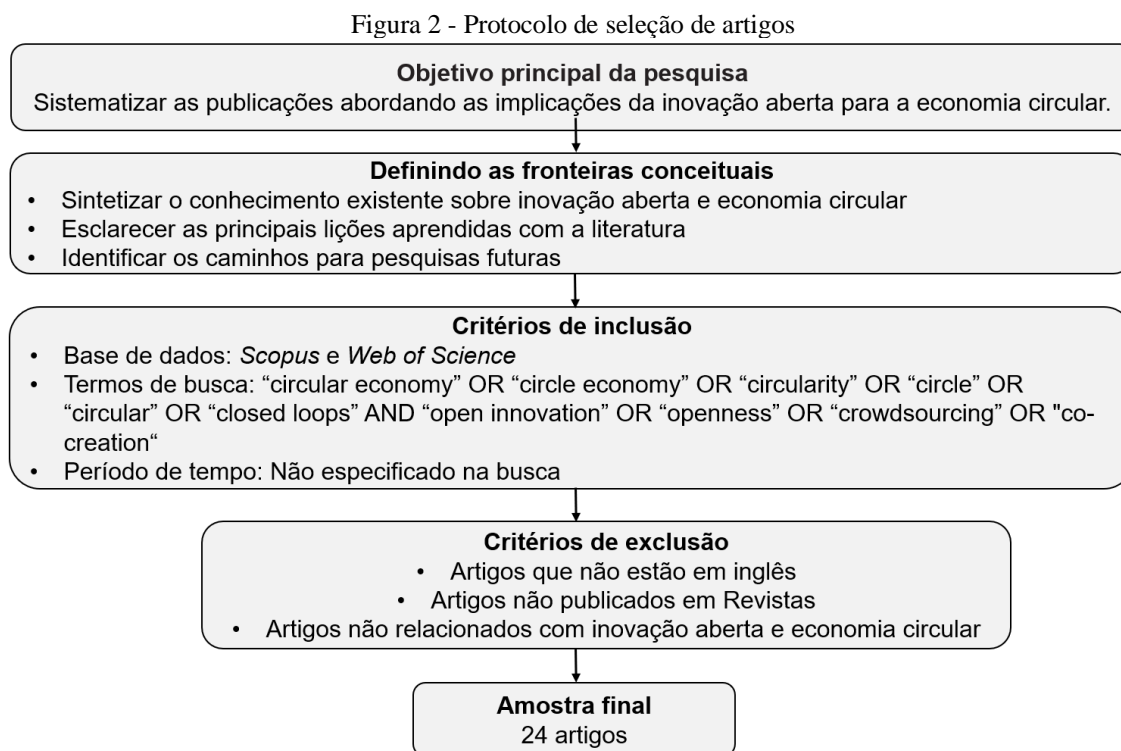
3.3.1 Identificação e seleção das publicações

Para investigar as relações entre inovação aberta e EC, e especialmente como a inovação aberta poderia apoiar a adoção da EC, este estudo adotou a revisão sistemática da literatura (RSL) como método de pesquisa, seguindo os procedimentos de trabalhos recentes em sustentabilidade ambiental (Jabbour *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2018). A RSL combina a pesquisa bibliométrica para expor uma visão geral da literatura relevante sobre o tema de interesse (Fahimnia *et al.*, 2015), e a análise de conteúdo dos artigos para propor lições e direções de pesquisas futuras (Bhimani *et al.*, 2019; Gaur; Kumar, 2018). Para buscar os artigos foram utilizados os termos chave de EC e inovação aberta, referenciados nos estudos de Fernandes *et al.* (2020) e Randhawa *et al.* (2016). Os termos chave aplicados para título, resumo e palavras-chave foram: “*circular economy*” OR “*circle economy*” OR “*circularity*” OR “*circle*” OR “*circular*” OR “*closed loops*” AND “*open innovation*” OR “*openness*” OR “*crowdsourcing*” OR “*co-creation*”. As bases de dados *Scopus* e *Web of Science* foram utilizadas para seleção e busca dos artigos.

O protocolo de revisão sistemática sugerido por Lu *et al.* (2018) e aplicado por Jabbour *et al.* (2020) foi seguido nesta pesquisa. A pesquisa foi realizada em novembro de 2020 e retornou 433 artigos publicados na base *Scopus* e 284 da base *Web of Science*. Nas duas bases foram considerados apenas documentos do tipo artigos publicados em revistas no idioma inglês, ou seja, artigos publicados em congressos e capítulos de livro foram excluídos. Com isso, foram excluídos 230 artigos da base *Scopus* e 102 artigos da base *Web of Science*.

Por fim, após a retirada dos artigos duplicados (110 artigos duplicados), foi realizada a leitura dos títulos e resumos dos artigos para selecionar aqueles alinhados ao

tema de interesse. Após os filtros, leitura dos resumos e exclusão dos artigos repetidos, a amostra resultou em 24 artigos, encaminhados para leitura do texto completo. A Figura 2 apresenta os critérios de pesquisa e seleção do artigo.



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

3.3.2 Extração de dados

O processo de extração de dados dos artigos foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, as informações referentes à parte bibliométrica, como ano de publicação, revista e número de citações foram extraídas. Na segunda etapa, foi conduzido a leitura dos artigos completos para compreender o panorama de pesquisa na área e como a inovação aberta poderia auxiliar na adoção da EC. Para isso, os artigos foram lidos visando identificar:

1. Contexto do estudo: país analisado no artigo, podendo ser classificado como uma economia em desenvolvimento ou desenvolvida;
2. Objetivo da pesquisa;
3. Abordagem metodológica utilizada no artigo;
4. Setor econômico ou a área especificada no artigo;
5. Nível de abrangência da EC: micro, meso ou macro;

6. Abordagem da inovação aberta: refere-se aos processos adotados em inovação aberta para colaboração entre parceiros, que pode ser *inbound*, *outbound* ou acoplado;
7. Teorias organizacionais utilizadas para apoiar as conclusões do estudo;
8. Implicações potenciais para EC orientada pela inovação aberta: identificar como a implementação da inovação aberta pode contribuir para a adoção da EC.

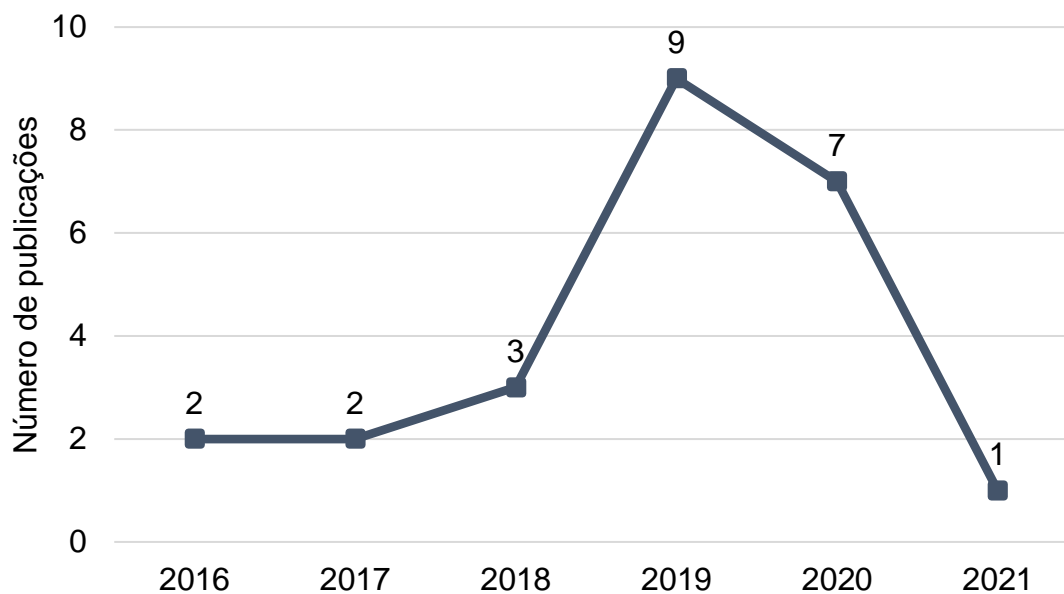
Todos os dados extraídos na análise de conteúdo dos artigos estão apresentados no Apêndice A. A seção de resultados a seguir apresenta os resultados tanto da parte bibliométrica quanto da análise de conteúdo, para propor *gaps* e estabelecer lições da EC orientada pela inovação aberta.

3.4 Resultados

3.4.1 Resultados da análise bibliométrica

Nessa seção são apresentados os resultados da análise bibliométrica com a inclusão das categorias referentes ao contexto do estudo, método de pesquisa e setor da EC para fornecer um panorama geral das publicações. A Figura 3 ilustra a distribuição cronológica das publicações. Os artigos foram publicados de 2016 a 2021. Assim, a integração entre os temas inovação aberta e EC é recente, uma vez que abrange os últimos cinco anos. O número de publicações cresceu 200% de 2018 para 2019. Desde 2016 o número de publicações tem aumentado significativamente, no qual 71% dos artigos analisados foram publicados nos últimos 3 anos e um terço deles no primeiro semestre de 2020. Esse resultado indica um interesse crescente pelo tema, no qual a EC como resultado de desenvolvimento global tem intensificado a busca pelos conhecimentos teóricos e práticos sobre esse assunto (Ferasso *et al.*, 2019).

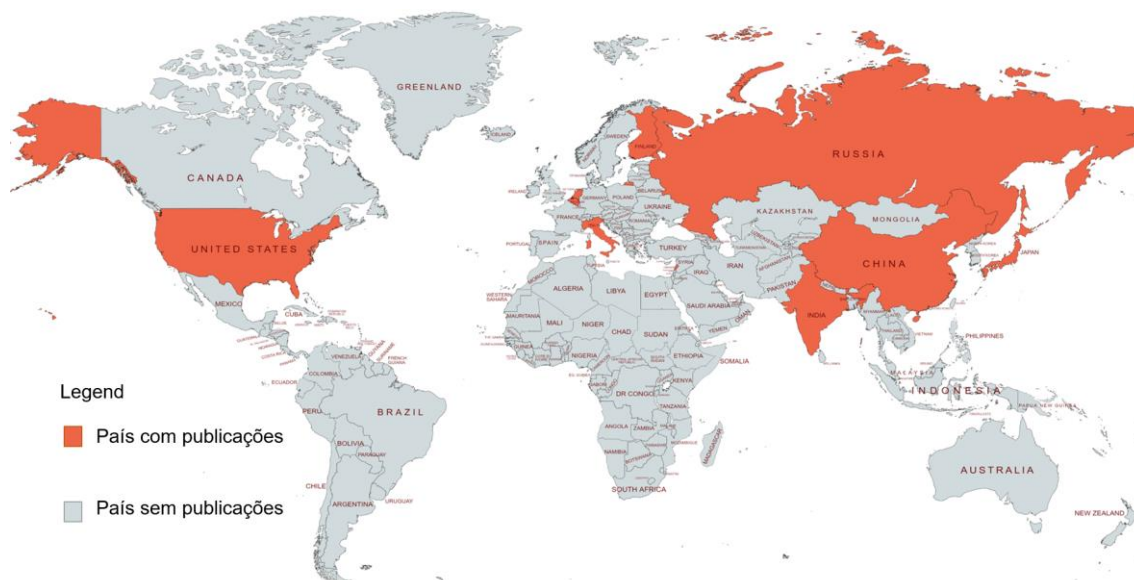
Figura 3 - Distribuição dos artigos publicados por ano (n = 24).



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A análise da distribuição geográfica das publicações sobre EC e inovação aberta centraliza a maioria dos artigos na Europa (Figura 4).

Figura 4 - Países com publicações (criado com mapchart.net).



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O continente europeu concentra 61% das publicações dos amostra (Holanda (7); Itália (4); Bélgica (1); Finlândia (1); Rússia (1)). Em seguida, o continente asiático

aparece com três estudos sobre o tema. O continente americano tem apenas um artigo publicado nos Estados Unidos e o continente africano ainda não tem artigos publicados nas bases pesquisadas. A participação da China e dos demais países asiáticos demonstram o interesse pelo tema fora da Europa. Porém, para uma visão ampla de como a diversidade cultural, econômica, social e política pode influenciar na relação da inovação aberta com a EC, pesquisas são incentivadas em todos os continentes. Este resultado levou à primeira recomendação desse estudo:

GAP 1: Investigar como as características locais relacionadas à cultura, economia e política, e em diferentes regiões do mundo, podem influenciar nas relações que buscam implementar a EC orientada pela inovação aberta.

A Tabela 1 mostra o ranking dos três artigos mais citados em ambas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. As principais revistas e periódicos são *Journal of Cleaner Production* (4), *Sustainability* (4), *Urban Planning* (3), *Design Journal* (3). Como a Figura 5 mostra, o método de pesquisa mais utilizado nas pesquisas é a abordagem qualitativa com aplicação de estudos de casos. O uso da abordagem qualitativa e estudo de casos é compreensível, uma vez que se trata de um tema emergente e que ainda está em fase de exploração. Comumente, alguns desses artigos abordaram uma região ou uma cidade para aplicação do estudo de caso (Cappellaro *et al.*, 2019, Chammas *et al.*, 2020, Amenta *et al.*, 2019, Dabrowski *et al.*, 2019) e não uma empresa, isto é, focam nas abordagens meso e macro da EC. Vale ressaltar, no entanto, que a abordagem qualitativa com utilização de estudos de casos, apesar de mostrar com profundidade determinadas situações, fornece uma pequena base para generalizações (Yin, 1989). Assim a segunda recomendação desta pesquisa é:

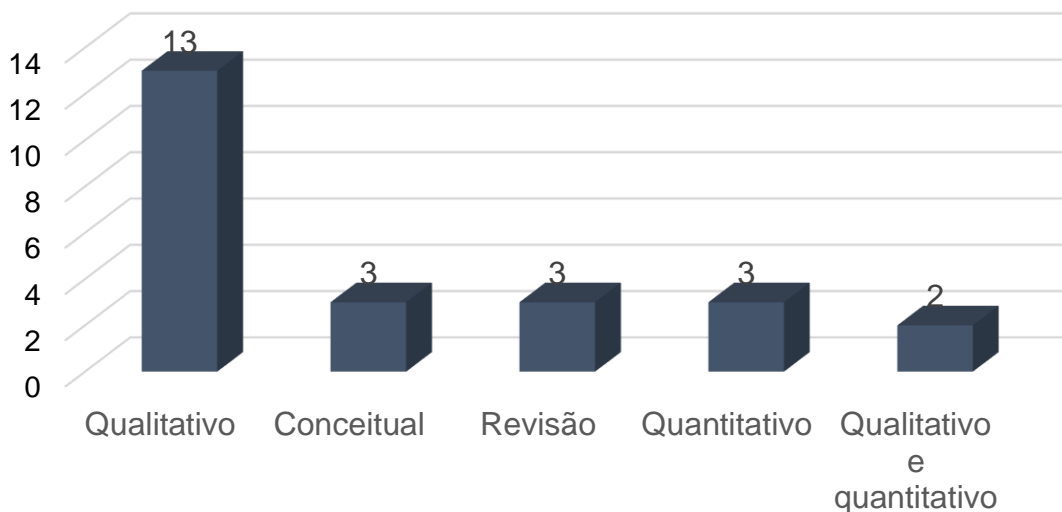
GAP 2: Apresentar resultados derivados de estudos quantitativos que permitam fazer generalizações do uso da inovação aberta para o desenvolvimento da EC em diferentes contextos.

Tabela 1 - Os três principais artigos, conforme determinado pelo número de citações

Autor (ano)	Principal contribuição da pesquisa	Journal	Total citações ^a	
			Scopus	Web of Science
Leising <i>et al.</i> (2018)	Apresenta como novas formas de colaboração na cadeia de suprimentos podem contribuir para a transição para a EC no setor de construção holandês.	<i>Journal of Cleaner Production</i>	49	41
Gorissen <i>et al.</i> (2016)	Apresenta uma abordagem transformadora de inovação de modelo de negócios inspirada na teoria de transição que combina elementos de pensamento sistêmico, visão inspirada em valor, <i>design</i> reflexivo e cocriação, pioneira em consórcios de centros de reutilização na província de Limburg, Bélgica.	<i>Sustainability</i>	24	20
Gupta <i>et al.</i> (2016)	Defende uma reformulação da teoria da inovação aberta, de modo que empresas e comunidades sejam capazes de equilibrar a necessidade de reciprocidade e responsabilidade, e se respeitarem, terão sucesso em criar uma economia compartilhada robusta, resiliente e ágil.	<i>Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity</i>	18	Não está nesta base

^a O número total de citações foi relatado com base nos dados dos bancos de dados *Scopus* e *Web of Science* em 1 de junho de 2020. Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 5 – Abordagem metodológica das publicações



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Com relação ao setor ou áreas especificadas no contexto da EC, as áreas periurbanas foram objetos de estudo de 22% dos artigos da amostra. Essas áreas localizam-se entre territórios urbanos e rurais, que são vulneráveis e propensas a se transformarem em paisagens residuais porque geralmente são caracterizadas por funções mistas e/ou assentamentos monofuncionais, bem como pela fragmentação em um

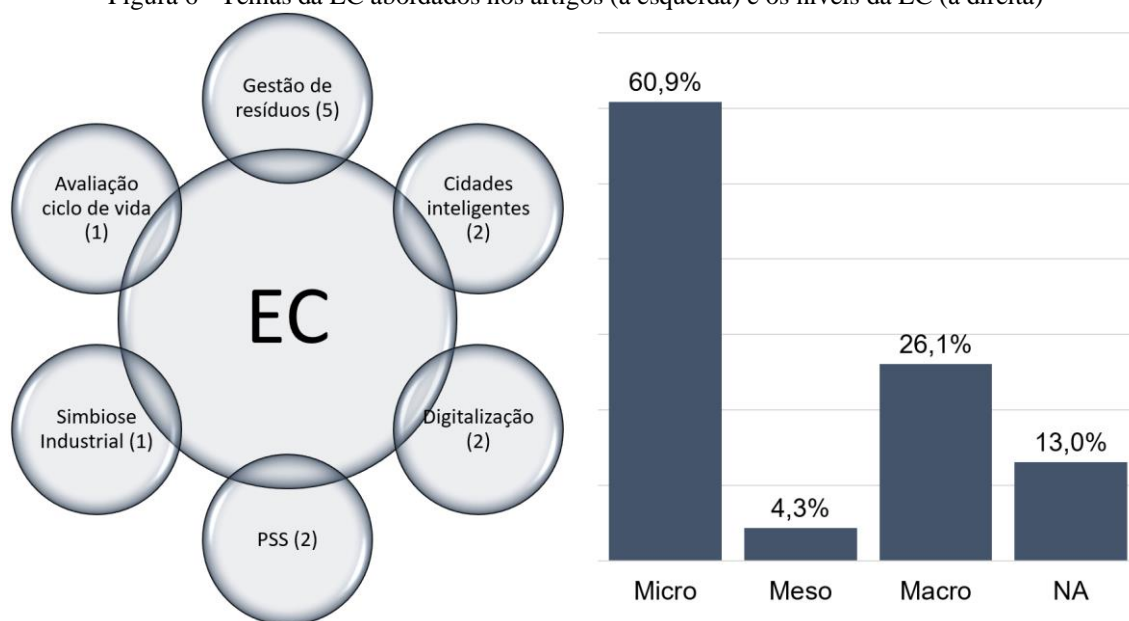
território de baixa densidade que costuma ser atravessado por grandes redes de infraestrutura (Amenta *et al.*, 2019). De modo geral, os artigos propõem utilizar estratégias de cocriação e PULLs (*peri urban living labs*) para orientar soluções ambientais de recuperação das áreas periurbanas, por meio da implementação da EC (Amenta *et al.*, 2019; Dąbrowski *et al.*, 2019; Arciniegas *et al.*, 2019). Os PULLs são espaços físicos e virtuais, criados especialmente para proporcionar um ambiente de cocriação de soluções ecoinovadoras com parcerias público-privado-comunidade (Repair, 2017).

3.4.2 Resultados da análise de conteúdo

Esta seção apresenta os resultados das categorias referentes ao nível de abrangência da EC, abordagem da inovação aberta e teorias subjacentes. Começando pelos níveis de abrangência, a EC é um conceito que tem sido aplicado em diferentes áreas da sustentabilidade ambiental (Khitous *et al.*, 2020; Kirchherr *et al.*, 2017). Nesse sentido, a Figura 6 à esquerda mostra os principais temas abordados nos artigos analisados que fazem menção à EC, como gestão de resíduos, sistema produto-serviço (PSS), simbiose industrial, digitalização *etc.* A Figura 6 também apresenta a distribuição dos artigos em relação aos níveis micro, meso e macro. A maioria dos artigos (60,9%) tem abordado o nível micro da EC, com pesquisas envolvendo empresas, consumidores, produtos e serviços. Poucos artigos abordaram o nível meso (4,3%) e macro (26,1%). Considerando que a importância de se investigar e adotar a EC nos três níveis (Khitous *et al.*, 2020), e que a maioria das pesquisas que relacionam EC e inovação aberta concentram-se no nível micro nossa terceira recomendação é:

GAP 3: Explorar a aplicação da inovação aberta nos níveis meso e macro da EC.

Figura 6 - Temas da EC abordados nos artigos (à esquerda) e os níveis da EC (à direita)



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Com relação à abordagem de implementação da inovação aberta, ela pode ser aplicada sob três processos denominados: *inbound*, *outbound* e acoplado (Chesbrough 2017; Enkel *et al.*, 2009). Porém, os resultados revelam que quando a inovação aberta está relacionada com a EC, o processo acoplado envolvendo a cocriação é predominante em relação aos outros processos, sendo citado em 91% dos artigos selecionados. Em alguns casos, a palavra inovação aberta não é citada no artigo, mas o artigo foi selecionado pela palavra cocriação que apareceu no título, resumo ou palavras-chave, conforme determinado pelo protocolo de busca e seleção dos artigos.

No processo acoplado as empresas desenvolvem e comercializam em conjunto a inovação por meio da combinação dos processos de dentro para fora e de fora para dentro. Nesse espectro, ferramentas e *softwares* podem apoiar o processo colaborativo de desenvolvimento de estratégias inovativas para suportar os modelos de negócio sustentáveis (Arciniegas *et al.*, 2019). Tendo em vista a importância do processo de cocriação na EC orientada pela inovação aberta, a identificação e compreensão dos facilitadores e *drivers* podem ser úteis para apoiar o processo de cocriação de valor com parceiros internos e externos no contexto da EC. Portanto, a quarta recomendação desse estudo é:

GAP 4: Identificar os facilitadores e drivers que contribuem para a aplicação das práticas da EC orientado pelo processo acoplado de cocriação.

Da mesma forma que os facilitadores ajudam a promover a aplicação da EC orientada pelos processos de cocriação da inovação aberta, a identificação das barreiras pode ser útil para verificar em quais situações as práticas colaborativas entre parceiros para cocriação podem ser dificultadas. Portanto, a quinta recomendação deste estudo sugere:

GAP 5: Identificar as barreiras que dificultam a aplicação das práticas da EC orientada pelo processo acoplado de cocriação.

Com relação às teorias organizacionais que abordam às pesquisas sobre o tema, as teorias encontradas foram a Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior*, TPB), Teoria do Design da Entropia (*Design Entropy Theory*, DET), Teoria das Capacidades Dinâmicas da Empresa (*Enterprise's Dynamic Capabilities Theory*, EDCT), Teoria do Trabalho de Fronteira (*Boundary Work Theory*, BWT), Visão Baseada em Recurso (*Resource Based View*, RBV), Teoria da Rede Industrial (*Industrial Network Theory*, INT), Teoria da Transição (*Transition Theory*, TT) e Teoria da Inovação Aberta (*Open Innovation Theory*, OIT). Uma breve definição de cada teoria, bem como as lições aprendidas com a aplicação dessas teorias nas pesquisas pode ser visualizada na Tabela 2. Apesar das teorias encontradas, mais da metade dos artigos revisados não citaram nenhuma teoria organizacional em seus estudos (65% da amostra). Diante desse resultado, a sexta recomendação desse estudo é:

GAP 6: Explorar como as teorias organizacionais podem ser utilizadas para a aplicação das práticas da EC orientada pelo processo de inovação aberta.

As teorias organizacionais já existentes e consolidadas na literatura ajudam a entender comportamentos e práticas adotados por empresas e consumidores em diferentes contextos. Por exemplo, a visão baseada em recursos chama atenção para os diferentes tipos de recursos que podem existir dentro das empresas, e a importância que cada tipo carrega para sustentar vantagens competitivas (Barney, 1991). No entanto, foi possível verificar que novas teorias estão sendo propostas para apoiar o processo de transição para modelos de negócio mais sustentáveis, como por exemplo a Teoria do *Design* da Entropia. Essa teoria ao ser utilizada junto com o processo de cocriação busca facilitar o desenvolvimento do *smart PSS* trazendo melhor desempenho e satisfação do usuário (Cong *et al.*, 2020).

Tabela 2 - Contribuições das teorias organizacionais para a economia circular orientada a inovação aberta

Teoria subjacente	Breve explicação da teoria	Possibilidades de adoção da teoria para impulsionar a inovação aberta em aplicações da EC
<i>Theory of Planned Behavior (TPB)</i>	A TPB estabelece que o comportamento humano individual é em função da intenção de comportamento, que por sua vez, é formada pela combinação das atitudes, das normas subjetivas e da percepção individual sobre o comportamento percebido (Ajzen, 1991).	A TPB pode ajudar a compreender comportamentos ambientalmente sustentáveis de indivíduos para cocriar conhecimento orientado para a solução (Chammas <i>et al.</i> , 2020).
<i>Design Entropy Theory (DET)</i>	A DET foi proposta para atuar no desenvolvimento de <i>smart PSS</i> , principalmente nas etapas de cocriação de valor, interação de <i>design</i> e <i>design</i> com consciência de contexto (Cong <i>et al.</i> , 2020).	A DET pode ser utilizada no processo de desenvolvimento de <i>smart PSS</i> , uma vez que pode estimular o processo de cocriação de valor entre clientes e parceiros (Cong <i>et al.</i> , 2020).
<i>Enterprise's Dynamic Capabilities Theory (EDCT)</i>	A EDCT considera as capacidades para integrar, construir e reconfigurar competências internas e externas para lidar com ambientes que mudam rapidamente (Tecce <i>et al.</i> , 1997).	A promoção das capacidades dinâmicas possui potencial para tornar as empresas mais flexíveis para se adaptar às mudanças demandadas pela EC (Peng <i>et al.</i> , 2020).
<i>Boundary Work Theory (BWT)</i>	A BWT investiga as práticas que permitam a interação e ação coordenada entre a organização focal e outros atores, enquanto acomoda os atores para terem sua própria perspectiva de valor, consideração e interesses específicos (Carlile, 2002).	Em modelos de negócios sustentáveis, o trabalho de fronteira pode ajudar na compreensão das relações estabelecidas entre organizações e múltiplos <i>stakeholders</i> com o objetivo de explorar, negociar, realinhar ou até mesmo fechar as fronteiras organizacionais quando necessário (Velter <i>et al.</i> , 2020).
<i>Resource Based View (RBV)</i>	A RBV considera as competências, as capacidades e as habilidades como sendo a base de conhecimento produtivo e organizacional e, por sua vez, a fonte mais importante da vantagem competitiva, da heterogeneidade e da lucratividade das firmas (Barney, 1991).	A VBR pode capitalizar as tendências da EC, destacando a importância de atender as condições para as novas atualizações de recursos e capacidades das empresas (Parida; Wincent, 2019).
<i>Industrial Network theory (INT)</i>	A INT propõe que as redes são compostas por três elementos: atores, recursos e atividades; os quais podem combinar, trocar ou criar recursos entre empresas (Hakansson, 1987).	A INT pode ser útil para apoiar a estruturação de redes de organizações com propósito de estabelecer parcerias voltados a modelos de negócios circulares (Leising <i>et al.</i> , 2018).

<i>Transition Theory (TT)</i>	A TT visa mudar a cultura, estruturas e práticas dominantes de sistemas que necessitam de mudanças para se tornar mais sustentáveis, conectando inovações no nível micro ao nível macro (Grin <i>et al.</i> , 2010).	A TT pode auxiliar na formulação de estratégias para acelerar os processos de mudanças para se alinhar-se aos princípios da EC (Gorissen <i>et al.</i> , 2016).
<i>Open Innovation Theory (OIT)</i>	A OIT sugere que empresas precisam abrir suas fronteiras para permitir o fluxo de conhecimento para criar oportunidades de processos de inovação cooperativa com parceiros, clientes e fornecedores (Gassmann; Enkel, 2004).	A fim de gerar inovações sustentáveis no contexto da EC, a abertura das fronteiras proposta pela OIT pode permitir o fluxo de conhecimento com a colaboração de partes interessadas (Gupta <i>et al.</i> , 2016).

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

3.5 Discussões e implicações

Os resultados revelam que a maioria dos estudos publicados, que lidam coletivamente com temas de inovação aberta e EC, enfatizam a colaboração dos *stakeholders* e a abordagem de cocriação (ver Apêndice A). Sob a lente da inovação aberta e considerando a integração de ideias e conhecimentos externos às empresas, e especialmente o *inbound*, a adoção da cocriação tende a impulsionar o envolvimento das partes interessadas no desenvolvimento de soluções alinhadas com os princípios da EC (Amenta *et al.*, 2019).

Observou-se que a aquisição de conhecimentos e tecnologias decorrentes da abordagem de cocriação, em conjunto com a colaboração das partes interessadas, pode reduzir barreiras e facilitar a transição para a EC, pelas seguintes razões principais (Figura 7): (1) satisfação do cliente; (2) conscientização do consumidor sobre a EC; (3) aumento do uso de plataformas de compartilhamento; (4) melhoria do desempenho organizacional; (5) desenvolvimento de comunidades inteligentes; (6) soluções para problemas ambientais; e (7) resolução de dilemas nas redes do simbiose industrial. Os seguintes parágrafos tratam de cada uma dessas possíveis implicações.

1. Satisfação do cliente: a abordagem de cocriação tende a facilitar o desenvolvimento de soluções para a EC, uma vez que tem potencial para acelerar o ciclo de desenvolvimento de projetos de produtos, processos e serviços, ao mesmo tempo em que melhora a experiência e satisfação dos usuários (Pencarelli, 2020; Cong *et al.*, 2020). Isso pode ser explicado por uma compreensão aprimorada entre soluções de *design* e requisitos do usuário, resultado da adoção da abordagem de cocriação no início do projeto de desenvolvimento inteligente do PSS (Cong *et al.*, 2020). Um exemplo do setor turístico, no qual o processo de cocriação facilitou o compartilhamento de recursos na integração dos mundos físico e digital e, como tal, enriqueceu a experiência turística dos clientes (Pencarelli, 2020).
2. Conscientização do consumidor da EC: os estudos indicaram que a colaboração e cocriação envolvendo os consumidores tem sensibilizado os envolvidos para as práticas da EC (James *et al.*, 2019; Schroder *et al.*, 2019). Uma das razões para isso é que a abordagem de cocriação e o *design* participativo facilitam a interação e a comunicação entre empresas e consumidores, aumentando a conscientização sobre a importância do consumo sustentável. A interação das empresas com os consumidores pode empoderar o senso de responsabilidade dos consumidores, permitindo o

desenvolvimento de cenários futuros com a inclusão do planejamento do ciclo de vida do produto ambientalmente sustentável (James *et al.*, 2019). Schroder *et al.* (2019) também destacam que os processos de cocriação desenvolvidos em conjunto com partes interessadas não tradicionais, como grupos de cidadãos e representantes do setor informal, podem promover estilos de vida mais sustentáveis nas cidades. Um exemplo é o caso de uma organização de compartilhamento de carros que criou conferências com o objetivo de reunir ideias e reduzir a emissão de carbono das cidades (Schroder *et al.*, 2019).

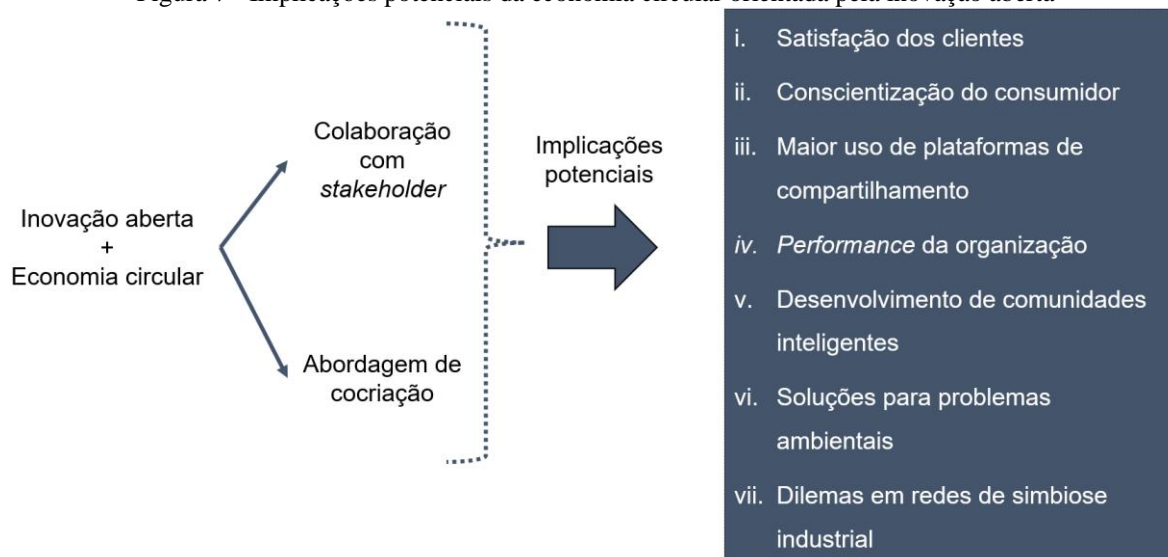
3. Aumento do uso de plataformas de compartilhamento: considerando a importância do *design* para a adoção da EC, o processo de cocriação durante a etapa de *design* pode estimular o desenvolvimento de plataformas *online*, melhorar o relacionamento com as partes interessadas e impulsionar a sustentabilidade (Leube; Walcher, 2017; Valentine *et al.*, 2017). As plataformas também podem ser adotadas de forma útil para coletar informações sobre as necessidades do cliente em projetos EC guiados pelo processo de cocriação (Cong *et al.*, 2020).
4. Melhoria do desempenho organizacional: os estudos de Parida e Wincent (2019) e Peng *et al.* (2020) observaram que a abordagem de cocriação, quando aplicada ao contexto da EC pode melhorar o desempenho operacional das empresas. Peng *et al.* (2020) verificaram que nas empresas de logística chinesas, os recursos compartilhados e atividades de cocriação de valor no círculo ecológico melhoraram o desempenho das empresas. Parida e Wincent (2019) observaram que a abordagem de cocriação com parceiros do mesmo ecossistema pode maximizar os benefícios da sustentabilidade, aumentar a produção e melhorar o desempenho financeiro das empresas.
5. Desenvolvimento de comunidades inteligentes: a cocriação aplicada em uma comunidade inteligente geralmente significa que membros da mesma comunidade participam mais ativamente das decisões do governo local, resultando em uma troca de conhecimento entre grupos científicos, cidadãos, empresas e administrações locais (Cappellaro *et al.*, 2019). Cappellaro *et al.* (2019) mostram que ações integradas de sustentabilidade, abordando questões ambientais, energéticas e sociais por meio de laboratórios de convivência urbana e a abordagem de cocriação, podem ajudar na transição para a EC em Roma, Itália. Isso reforça a importância da responsabilidade compartilhada por uma transição para a EC (como mencionado na

implicação 2). Para promover a abordagem de cocriação no nível meso da EC, estudos sobre cidades inteligentes também propuseram a adoção de facilitadores como laboratórios vivos, tecnologias de informação e comunicação, infraestrutura e treinamento (Cappellaro *et al.*, 2019; James *et al.*, 2019).

6. Soluções para problemas ambientais: no contexto da recuperação de áreas periurbanas, os laboratórios vivos têm sido destacados, uma vez que os PULLs fazem uso do processo de cocriação (Amenta *et al.*, 2019). Nesse escopo, estudos sugerem que a abordagem de cocriação pode impulsionar o trabalho integrado de empresas e comunidades para resolver problemas locais (Amenta *et al.*, 2019; Amenta; Van Timmeren, 2018; Gupta *et al.*, 2016), que também tem se mostrado útil na transição para a EC em áreas periurbanas (Amenta; Van Timmeren, 2018). Nesse sentido, Soltani *et al.* (2015) também observaram que a participação e colaboração de diversos *stakeholders* (como pesquisadores, autoridades públicas, empresas, líderes comunitários e cidadãos) pode acumular conhecimento de forma colaborativa e sinérgica e encontrar soluções para questões relativas aos resíduos sólidos.
7. Dilemas nas redes de simbiose industrial (SI): há dois dilemas que as empresas participantes da rede do SI normalmente enfrentam: o dilema de abertura e o dilema da demonstração de valor (Patala *et al.*, 2020). A intermediação cooperativa na rede pode ajudar a reduzir esses dilemas, uma vez que uma maior coordenação e compartilhamento de informações entre os atores da rede pode melhorar atividades como a identificação do valor dos resíduos e materiais residuais (Patala *et al.*, 2020).

Apesar da quantidade de implicações apresentadas na Figura 7, os achados deste estudo também indicam práticas que incentivam a colaboração entre parceiros e a implementação da abordagem de cocriação, que pode incluir redes de parceria entre instituições privadas e públicas e comunidades locais. Zhang e Meng (2021) apresentam um modelo de cocriação de valor na cadeia de fornecimento de circuito fechado de eletrônicos, com a participação de fabricantes e varejistas. Nesse modelo, o fabricante é responsável por promover a cocriação de valor na remanufatura e cooperar com o remanufaturador para otimizar as configurações da rede e os processos de reciclagem de produtos eletrônicos residuais. A participação dos consumidores nesse processo também é considerada, uma vez que quanto mais consumidores participam do processo de reciclagem (ou seja, devolvendo seus produtos usados), maior o número de peças remanufaturadas, reduzindo assim os custos operacionais de produção para a fábrica.

Figura 7 - Implicações potenciais da economia circular orientada pela inovação aberta



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

No entanto, atrair a participação das partes interessadas (por exemplo, consumidores, empresas, comunidades e governos) não é uma tarefa fácil. Zhang e Meng (2021, p. 13) citam que “o fabricante deve construir um site oficial ou fórum de comunicação do consumidor organizado para fornecer aos consumidores canais para participar da personalização, desenvolvimento de aplicativos e outras atividades de criação de valor”. Essa recomendação reforça os achados em outros estudos que indicam o uso de ambientes virtuais e/ou físicos para promover a interação entre os participantes para sustentar a EC orientada pela inovação aberta (Amenta *et al.*, 2019; Dabrowsk *et al.*, 2019; Arciniegas *et al.*, 2019; Repair, 2017).

3.6 Conclusões

Entre as principais barreiras para a adoção da EC, a literatura tem enfatizado a falta de conhecimento e tecnologias. Nesse contexto, a inovação aberta pode ter um papel pertinente na adoção da EC nos níveis micro, meso e macro. Buscando contribuir para este debate contemporâneo, esta pesquisa adotou tanto uma revisão sistemática quanto uma análise de conteúdo da literatura, e foi observado que o uso da inovação aberta na EC ainda é um fenômeno recente, que tem direcionado seus resultados para a colaboração com as partes interessadas e a abordagem de cocriação. A colaboração dos *stakeholders* pode impulsionar o uso da inovação aberta para a EC, uma vez que a interação e cooperação entre

diferentes *stakeholders* (como fornecedores, clientes, institutos de pesquisa, universidades e comunidades) pode contribuir para uma intensificação dos fluxos de conhecimento. Essa colaboração pode favorecer o *inbound* e *outbound* em direção às soluções para a EC. No final, a preocupação em integrar *stakeholders* em projetos da EC traz conhecimentos e tecnologias do ambiente externo para uma determinada empresa (*inbound*), da mesma forma que conhecimentos e tecnologias gerados por uma empresa podem ser disponibilizados ao ambiente externo e aos *stakeholders* envolvidos em outros projetos de EC (*outbound*).

A abordagem de cocriação também tem sido importante para a integração da inovação aberta e EC, pois pode facilitar o desenvolvimento de tecnologias e conhecimentos em conjunto com os diferentes atores envolvidos em projetos de produtos, processos, cadeias de suprimentos e outras soluções orientadas para a EC. A preocupação em integrar diversos *stakeholders* em projetos de EC pode intensificar o trabalho de cocriação, que é a criação de soluções para a EC em conjunto com empresas, fornecedores, clientes, representantes governamentais e comunitários, concorrentes entre outros.

Considerando as implicações teóricas desta pesquisa, o presente estudo é um dos primeiros a apresentar, analisar e fornecer um panorama geral das publicações que relacionam inovação aberta e EC. Nesse sentido, buscou-se esclarecer como a inovação aberta impulsiona a EC na redução das barreiras para adoção da EC. Além disso, os resultados identificam e analisam as teorias organizacionais que têm sido utilizadas para explorar o tema. Com base na discussão teórica apresentada, são propostas seis lacunas de pesquisa e sete potenciais implicações da inovação aberta para a EC, que podem ser exploradas em estudos futuros.

Para os gestores, as implicações potenciais sintetizada na Figura 7 podem orientar os interessados em aplicar a EC orientada pela inovação aberta. Além disso, foram identificadas ações de nos níveis micro, meso e macro e suas respectivas relações com a inovação aberta (Apêndice A). Da mesma forma, gestores de diferentes organizações e atuantes nos setores público e privado poderiam utilizar esses resultados em suas atividades de EC, especialmente aquelas que demandam novos conhecimentos e tecnologias. Os achados do presente estudo também sugerem a relevância para os profissionais e interessados em EC e envolvendo clientes no processo de cocriação de produtos e sistemas de produtos e serviços, uma vez que essa prática se mostrou uma das mais relevantes nos estudos que integram EC e inovação aberta. Apresentou-se alguns motivos positivos para as empresas envolverem consumidores

nesse processo de desenvolvimento, o que também pode incentivar os gestores a adotarem a inovação aberta em seus esforços em relação à EC.

Para os formuladores de políticas públicas nas áreas de meio ambiente e inovação, os resultados sugerem a importância desses formuladores de políticas na coordenação da integração de múltiplos *stakeholders* em relação à EC. Por exemplo, a integração dos *stakeholders* com consumidores, empresas, universidades e governos tende a favorecer o desenvolvimento de comunidades e cidades inteligentes (James *et al.*, 2019; Cappellaro *et al.*, 2019); além disso, a cocriação aplicada em comunidades inteligentes pode promover a participação ativa dos membros, aumentando a conscientização sobre o uso racional de recursos e energia (Cappellaro *et al.*, 2019). Os formuladores de políticas públicas também poderiam incluir a abordagem de cocriação na gestão de áreas periurbanas, uma vez que os resultados aqui apresentados sugerem que a cocriação fornecida pelos PULLs ajuda a traçar estratégias que visam melhorar a qualidade de vida das pessoas que vivem nas comunidades locais (Amenta *et al.*, 2019), facilitando a transição para a EC em áreas periurbanas (Amenta; Van Timmeren, 2018).

Finalmente, esta pesquisa apresenta limitações metodológicas que são reconhecidas. A principal delas é que o estudo é teórico, tendo selecionado artigos contendo palavras-chave específicas dos critérios de pesquisa. Reconhece-se, portanto, que pode haver publicações abordando o tema da pesquisa que não foram incluídas na amostra selecionada. Outra limitação é o fato de que apenas os bancos de dados *Scopus* e *Web of Science* foram usados para procurar os documentos. Embora sejam bases de dados de pesquisa acadêmica relevantes, elas não incluem todos os documentos sobre o assunto. Para futuras pesquisas, sugere-se estudos específicos que investiguem e avancem as seis lacunas propostas neste estudo. Além disso, pesquisas empíricas (estudos de caso, quantitativos e longitudinais) que investiguem como a inovação aberta pode colaborar com a adoção da EC também podem aprimorar a compreensão dessa questão para demonstrar e analisar as práticas e desafios enfrentados pelas empresas e organizações que atuam em diversos ambientes de negócios. Da mesma forma, considerando o foco no contingenciamento, estudos futuros poderiam investigar, por meio de pesquisas qualitativas, como as implicações identificadas e propostas neste artigo se comportam em diferentes países, regiões ou setores econômicos.

CAPÍTULO 4: ARTIGO 2 - INOVAÇÃO ABERTA PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR: EXPLORANDO O PAPEL MEDIADOR DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

A versão final em inglês deste artigo foi aceita para publicação no periódico Creativity and Innovation Management.

Resumo: As barreiras tecnológicas são reconhecidamente uma das principais na transição em direção a economia circular. Nesse contexto, a utilização do modelo de inovação aberta pode ser útil para auxiliar empresas a adotarem a economia circular. Apesar da sinergia entre a inovação aberta e a economia circular ainda são poucos os estudos que investigam as suas relações em empresas. Com o objetivo de diminuir esse *gap* de pesquisa, esse trabalho analisou como os esforços de inovação aberta podem afetar a adoção da economia circular e o papel das tecnologias da Indústria 4.0 nessa relação. Além disso, o modelo de pesquisa desenvolvido nesse estudo utilizou a capacidade absorptiva como elemento moderador. Após a coleta de dados com 163 empresas que atuam no Brasil, os principais achados desse estudo indicaram que: (i) a utilização do modelo de inovação aberta favorece a adoção da economia circular; (ii) as tecnologias da Indústria 4.0 além de impactar positivamente a adoção da economia circular, também medeiam positivamente a relação entre inovação aberta e economia circular; (iii) a capacidade absorptiva não demonstrou moderar a relação entre inovação aberta e economia circular. Esses resultados trazem implicações teóricas para os campos de inovação e gestão da sustentabilidade. Além disso, fornecem indicações para praticantes ao confirmar a efetividade dos esforços de colaboração interorganizacional para ampliar a economia circular em suas empresas. Assim, revelamos que as práticas de inovação aberta, como a colaboração com *stakeholders* e a abordagem de cocriação, podem ajudar no desenvolvimento de inovações circulares e serem impulsionadas pelas tecnologias da Indústria 4.0

Palavras-chave: capacidade absorptiva, gestão do conhecimento, modelagem de equações estruturais, colaboração interorganizacional, cocriação, tecnologias digitais.

4.1 Introdução

Economia circular (EC) é um conceito que tem sido intensamente debatido nos ambientes de pesquisa, empresarial e de políticas públicas nos últimos anos (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Kircherr *et al.*, 2023). A EC pode ser definida como um sistema regenerativo que visa mudar o paradigma de ‘fim da vida’, reduzindo, reutilizando, reciclando e recuperando materiais em toda a cadeia produtiva, a fim de promover a manutenção do valor e o desenvolvimento sustentável (Kircherr *et al.*, 2023). O modelo econômico circular foi proposto devido ao atual modelo econômico linear (extrair-produzir-descartar) ser insustentável (Arroyabe *et al.*, 2021), e resultar no agravamento dos problemas ambientais, como as mudanças climáticas, escassez de matérias-primas e perda da biodiversidade.

Apesar desse crescente debate, apenas cerca de 8.6% da economia global é circular (Circle Economy, 2021), indicando que a transição para uma EC ainda é um desafio atual (Kircherr *et al.*, 2023; Jesus *et al.*, 2019) e incipiente nas empresas e sociedade. Assim, compreender as barreiras que dificultam a adoção da EC tem sido a preocupação de muitos estudos (e.g., Ritzén; Sandström, 2017; Kirchherr *et al.*, 2018; Mishra *et al.*, 2022; Jesus *et al.*, 2023), que classificaram essas barreiras em dimensões tecnológicas, financeiras, culturais e sociais. Especialmente, as barreiras tecnológicas têm sido frequentemente destacadas, tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento (Ritzén; Sandström, 2017; De Jesus; Mendonça, 2018; Kirchherr *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2019; Jaeger; Upadhyay, 2020; Garcia-Quevedo *et al.*, 2020). Isso porque, muitas tecnologias associadas a produtos circulares e aos seus respectivos processos produtivos ainda se encontram em desenvolvimento (Takacs *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Por exemplo, pode-se haver dificuldades tecnológicas e de conhecimento em desenvolver produtos que utilizam novos materiais ou materiais provenientes de reuso, remanufatura ou reciclagem. Da mesma forma, pode-se haver desafios tecnológicos associados à introdução de processos produtivos que utilizem energia renovável.

Nesse contexto, as tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) têm se mostrado facilitadoras na adoção de modelos de negócios circulares (Halloui *et al.*, 2022; Hettiarachchi *et al.*, 2022; Ranta *et al.*, 2021), principalmente se tais tecnologias forem utilizadas de maneira integrada (De Sousa Jabbour *et al.*, 2022; Lei *et al.*, 2023). Por exemplo, a inteligência artificial e os robôs industriais podem reduzir a poluição, as emissões de gases de efeito estufa e o consumo de energia (Bianchi *et al.*, 2019). A Internet das coisas (*Internet of*

Things, IoT) pode ser utilizada no rastreamento de produtos e serviços para melhorar o consumo de combustível da máquina e tornar o produto mais econômico e desejado pelos consumidores (Ranta *et al.*, 2021). A manufatura aditiva (MA) tem se destacado para obter maior eficiência dos materiais (Tavares *et al.*, 2023).

Embora as tecnologias da I4.0 possam facilitar a transição para a EC, é importante ressaltar que as relações entre as tecnologias da I4.0 e EC ainda não são claras devido, sobretudo, por serem dois temas emergentes (Mardani *et al.*, 2022). Além disso, alguns estudos vêm mostrando um baixo nível de implementação das tecnologias da I4.0 nas empresas (Akbari; Hopkins, 2022; Josef-Peter Schöggel *et al.*, 2023). Para que as tecnologias facilitem a transição para a EC, é necessário adaptar as competências e os recursos da empresa para responder a um ambiente de negócios dinâmico e em mudança (Rejeb *et al.*, 2022). Aumentar a capacidade de inovação por meio de práticas de inovação aberta pode, desta maneira, permitir a colaboração com parceiros-chave para o desenvolvimento tecnológico e ambiental (Hallioui *et al.*, 2022; Rejeb *et al.*, 2022).

Porém, ainda são poucos os estudos que endereçam a inovação aberta no contexto da EC, sendo a maioria deles qualitativos (e.g., Jesus; Jugend, 2023). Estudos quantitativos que investigaram como as práticas da inovação aberta estão afetando a sustentabilidade ainda são limitados (Camilleri *et al.*, 2023). Nesse contexto, Camilleri *et al.* (2023) sugerem que as relações de colaboração das empresas com consultores ou organizações externas podem aumentar sua vantagem competitiva, pois os *stakeholders* externos podem ajudar no desenvolvimento de inovações sustentáveis. Allal-Chérif *et al.* (2023) notaram que a colaboração de longo prazo com fornecedores pode facilitar a criação de valor econômico sustentável. Zhang *et al.* (2023) ressaltam que a inovação aberta pode contribuir para a vantagem competitiva sustentável de empresas. Assim, considerando a possibilidade de a inovação aberta contribuir para a adoção da EC, esse estudo visa prioritariamente responder a seguinte questão de pesquisa: *Qual o impacto da adoção das práticas de inovação aberta na implementação da EC?* Em complemento, busca-se entender: *Qual a relação entre a inovação aberta e as tecnologias da Indústria 4.0 na adoção da CE?*

Soma-se a isso o fato de que para sustentar a inovação em um ambiente dinâmico, as empresas devem ter a capacidade de renovar constantemente a sua base de conhecimentos (Jantunen, 2005). Nesse sentido, a capacidade de absorção (CA) pode ter efeito sinérgico com a inovação, pois se refere à capacidade de uma empresa avaliar, entender, assimilar,

absorver e principalmente aplicar o conhecimento obtido de fontes externas (Cohen; Levinthal, 1990).

Na área ambiental, Siddik *et al.* (2023), sugerem que a CA pode contribuir para a implementação de práticas sustentáveis, pois modera positivamente a relação entre EC e sustentabilidade organizacional. Esse resultado reforça o argumento de que empresas com CA bem desenvolvida podem assimilar, converter e explorar o conhecimento para gerar competências e capacidades ambientais, os quais podem impulsionar o desempenho em sustentabilidade (Siddik *et al.*, 2023). Recentemente, Marrucci *et al.* (2022) sugeriram também que a CA pode impulsionar a adoção da EC.

Embora os temas da CA e EC apresentem uma sinergia, ainda existem poucos estudos que investigaram como a CA pode facilitar a transição para a adoção da EC (Marrucci *et al.*, 2021a; Siddik *et al.*, 2023). Nessa linha, Bhupendra e Sangle (2021) reforçam a necessidade de estudos que explorem modelos causais constituídos por fatores de CA especialmente considerando aspecto de sustentabilidade ambiental. Nesse sentido, é relevante investigar também como a CA modera as relações que envolvem a inovação aberta e as tecnologias da I4.0 na adoção da EC.

Empresas localizadas no Brasil foram selecionadas como amostra para esta pesquisa. Nesse âmbito destaca-se que as iniciativas de EC têm sido desenvolvidas em um ritmo acelerado na indústria brasileira (De Sousa Jabbour *et al.*, 2022). Uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria no Brasil indicou que 76,5% das empresas brasileiras adotam alguma prática de EC e 88,2% consideram a EC uma estratégia importante para a empresa (CNI, 2019). A busca pela inovação tecnológica para alavancar a transformação digital na indústria brasileira também tem sido uma preocupação dos gestores. Sobre isso, uma pesquisa da KPMG relatou que 82% das grandes empresas de manufatura localizadas no Brasil possuem iniciativas relacionadas às tecnologias da I4.0 implementadas (KPMG, 2021). Esses resultados mostram que o Brasil está no nível ‘nascente’ de prontidão para a I4.0 (De Sousa Jabbour *et al.*, 2022).

O artigo está organizado da seguinte forma. A seção 4.2 apresenta os conceitos e o desenvolvimento das hipóteses. A seção 4.3 descreve os procedimentos metodológicos para seleção da amostra e a coleta de dados. A seção 4.4 apresenta os principais resultados da análise estatística. A seção 4.5 discute os resultados. Finalmente, a seção 4.6 descreve as conclusões e apresenta as implicações teóricas e gerenciais do estudo.

4.2 Revisão teórica e desenvolvimento das hipóteses

4.2.1 Inovação aberta

A inovação aberta é um conceito que se refere à prática de buscar ideias, conhecimentos e recursos externos e internos às empresas para impulsionar o processo de inovação (Chesbrough; Bogers, 2014). Diferentemente do modelo de inovação fechada, em que a empresa busca desenvolver internamente todas as etapas do processo inovador, na inovação aberta a empresa colabora com parceiros externos, como fornecedores, clientes, universidades, especialistas e *startups* para melhorar seus resultados em inovação (West; Bogers, 2014; Hutton *et al.*, 2021). Para isso, a organização estabelece canais de comunicação e colaboração com os atores externos, com o objetivo de compartilhar conhecimentos, experiências, tecnologias e recursos financeiros. Essa troca de informações e recursos possibilita o surgimento de novas ideias, a aceleração do processo de inovação e a ampliação das capacidades da organização.

Gassmann e Enkel (2004) propuseram três fluxos da inovação aberta: *inbound*, *outbound* e acoplado. O fluxo *inbound* é focado em obter conhecimento externo de partes interessadas específicas fora dos limites da empresa, como por exemplo, fornecedores e clientes. O fluxo *outbound* atua no sentido inverso, direcionando e comercializando soluções ou ideias nascidas dentro da empresa que têm potencial, mas não se alinham com o *core business* ou estratégia da empresa. Essas ideias podem ser vendidas ou integradas a um mercado diferente ou como base para uma nova *startup* (Attalah *et al.*, 2023). E terceiro, o fluxo acoplado ocorre quando as empresas não apenas colaboram com parceiros externos, mas firmam alianças com concorrentes para manter negócios ou alcançar determinados segmentos de mercado (Gassmann; Enkel, 2004).

Ao adotar a inovação aberta, as empresas reconhecem que não detém todos os recursos e conhecimentos necessários para inovar de maneira eficiente e por isso há orientações para a colaboração com fontes externas e internas para a inovação. Os benefícios da inovação aberta são, além do acesso a uma gama mais ampla de ideias e perspectivas, o compartilhamento de custos e riscos envolvidos nos processos de P&D (Ovuakporie *et al.*, 2021). Esses benefícios podem ser particularmente úteis para que empresas melhorem suas tecnologias em direção à aplicação de inovações sustentáveis para a economia circular

(Brown *et al.*, 2021) e à adoção das tecnologias da I4.0 (Lepore *et al.*, 2023; Petruzzelli *et al.*, 2021).

4.2.2 Inovação aberta e economia circular

Poucos trabalhos têm analisado conjuntamente e de maneira integrada os temas de inovação aberta e EC (e.g., Brown *et al.*, 2021; Cong *et al.*, 2020; Cappellaro *et al.*, 2019; Amenta *et al.*, 2019). A EC é um conceito que busca promover o uso responsável e cíclico dos recursos (Kirchherr *et al.* 2023). Para Stahel (2016, p. 435) em uma EC, os “descartes tornam-se recursos para outros”. Baseada em uma economia de baixo carbono e zero desperdício, a EC propõe um modelo de uso eficiente dos recursos e retenção de valor a longo prazo dentro dos limites de proteção ambiental e benefícios socioeconômicos (Morsetto, 2020). Kirchherr *et al.* (2023) conceituam a EC como um sistema econômico regenerativo e que promove o desenvolvimento sustentável pela substituição do conceito de ‘fim de vida’ pela redução, reuso e recuperação de materiais.

A adoção da EC pode ser realizada nos níveis micro, meso ou macro (Ghisellini *et al.* 2016; Prieto-Sandoval *et al.*, 2018, Kirchherr *et al.* 2017). No nível micro, as práticas da EC são aplicadas dentro das empresas e visam, sobretudo, desenvolver produtos, processos e tecnologias que favoreçam o fechamento dos ciclos de recursos (Ghisellini *et al.*, 2016). No nível meso, existe uma integração das práticas aplicadas, por exemplo, em eco parques industriais e simbiose industrial (Kirchherr *et al.* 2017). E no nível macro, as práticas da EC são aplicadas em contextos mais abrangentes, como em cidades ou países (Prieto-Sandoval *et al.*, 2018).

Os princípios 9R’s (reduzir, reutilizar, recusar, repensar, remanufaturar, reparar, reformar, reaproveitar, reciclar e recuperar) têm sido utilizados para operacionalizar e medir a EC (Bag *et al.*, 2021b). De fato, as ações de reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar materiais em processos de produção, distribuição e consumo tem sido centrais no fechamento de ciclos de recursos para substituir o fim de vida dos produtos (Kirchherr *et al.*, 2017). Khan *et al.* (2021) sugerem que a medição da EC nas empresas seja medida por meio de práticas que considerem diferentes fases de aplicação da EC nas áreas de *design*, produção, consumo, coleta, reciclagem e recursos.

Nesse contexto, dois aspectos emergem da relação entre a inovação aberta e a EC: a colaboração com *stakeholder* para a inovação e a abordagem de cocriação (Eisenreich *et al.*,

2021; Jesus; Jugend, 2023). Dentre outros fatores, a inovação aberta por meio da colaboração intersetorial pode impulsionar a aquisição e criação de novas capacidades, proporcionando maior conhecimento do mercado e da tecnologia (Köhler *et al.*, 2022). Arroyabe *et al.* (2021) pontuam que o desenvolvimento das soluções de ciclo fechado depende da cooperação e colaboração entre diferentes organizações e que facilitem o desenvolvimento de soluções compatíveis com a EC.

Esse ambiente colaborativo e aberto, tem se mostrado relevante para impulsionar as inovações orientadas para a sustentabilidade, conforme definida no conceito de inovação aberta sustentável, o qual considera um processo *inbound*, pelo qual o conhecimento externo pode ser absorvido para apoiar o desenvolvimento interno de inovações orientadas para a sustentabilidade (Bogers *et al.*, 2020). Desta forma, a inovação aberta pode apoiar a inovação de sistemas produtivos visando a sustentabilidade (Lippolis *et al.*, 2023). Nessa linha, Camilleri *et al.* (2023) notaram que a colaboração com consultores externos pode aumentar a vantagem competitiva das empresas ao promover inovações sustentáveis na diversificação em diferentes mercados e na geração de novos fluxos de receita.

A colaboração entre diferentes atores como clientes, empresa, fornecedores, universidades, dentre outros, também tem se mostrado elemento relevante para promover uma mudança no modelo de negócios e enfrentar os desafios ambientais (Marrucci *et al.*, 2021; Bogers *et al.*, 2020; Mishra *et al.*, 2019). Devido à intensificação da transferência de conhecimento tecnológico, Prieto-Sandoval *et al.* (2019) mostraram que colaborações de pequenas e médias empresas com universidades podem impulsionar a ecoinovação. Triguero *et al.* (2022) sugerem que as parcerias entre empresa e governo ajudam as empresas a acessar fontes externas, tecnologia e informações para diminuir a incerteza e o risco associado às ecoinovações circulares.

A parceria com fornecedores para promover inovação sustentável tem sido destacada por alguns estudos (Bogers *et al.* 2020; Marrucci *et al.*, 2021a). Por exemplo, Cricelli *et al.* (2021) observaram que colaboração entre empresas e instituições de pesquisa torna mais provável a introdução de inovações em logística reversa. Marrucci *et al.* (2021a) verificaram um caso em que a colaboração com fornecedores permitiu o desenvolvimento de novas tecnologias e embalagens baseados em material reciclado. Patala *et al.* (2020) notaram que a colaboração e atuação de intermediários nas redes de simbiose industrial facilitam a troca de informações para reuso de resíduos e/ou materiais descartados.

Baseada na colaboração, a cocriação também tem sido recomendada para incentivar a inovação sustentável e a EC (Jesus; Jugend, 2023; Cappellaro *et al.*, 2019; Amenta *et al.*, 2019). Por exemplo, o processo de cocriação envolvendo pesquisadores e especialistas possibilitou que áreas periurbanas na Holanda e Itália fossem recuperadas (Amenta *et al.*, 2019). Os laboratórios criados para cocriação com membros da comunidade do distrito de Centocelle em Roma permitiu um plano de ações com enfoque da EC, para resolver questões ambientais, energéticas e sociais do distrito (Cappellaro *et al.*, 2019). Estabelecer redes de colaboração com os clientes para desenvolver produtos mais sustentáveis pode melhorar a experiência e satisfação dos usuários (Pencarelli, 2020; Cong *et al.*, 2020). Isso pode ocorrer por meio de melhor compreensão entre soluções de *design* sustentável e requisitos do usuário (Cong *et al.*, 2020). Nesse sentido, Parida e Wincent (2019) sugerem que a abordagem de cocriação com parceiros em um mesmo ecossistema pode maximizar os benefícios da sustentabilidade, aumentar a produção e melhorar o desempenho financeiro das empresas. Assim, a primeira hipótese deste estudo é:

H1: As práticas de inovação aberta têm um impacto positivo na adoção da economia circular.

4.2.3 Inovação aberta e tecnologias da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 (I4.0) foi apresentada na Feira de Hannover em 2011 e oficialmente introduzida em 2013 como uma estratégia alemã para revolucionar a indústria (Xu *et al.*, 2018). De acordo com Upadhyay *et al.* (2023), a I4.0 ou quarta revolução industrial foi alcançada pela aplicação industrial da eletrônica e da tecnologia da informação. As tecnologias comumente associadas ao contexto da EC são internet das coisas (IoT), computação em nuvem, sistemas ciber físicos (CPS), *big data analytics* (BDA), manufatura aditiva (MA) e inteligência artificial (Pinheiro *et al.* 2021, Bag *et al.*, 2020).

A IoT constitui a tecnologia que permite a interação e cooperação entre pessoas, dispositivos, coisas ou objetos por meio do uso de telecomunicações sem fio modernas, como identificação por radiofrequência, sensores, *tags*, atuadores e telefones celulares (Xu *et al.*, 2018). A computação em nuvem possibilita que um grande volume de dados possa ser carregado de um centro de computação em nuvem para o armazenamento, o que facilita a fabricação e a produção, além disso, esses dados podem ser compartilhados e alocados de forma dinâmica (Xu *et al.*, 2018).

O CPS caracteriza-se por um sistema capaz de integrar a computação e processos físicos, de modo que, computadores e redes embarcados monitoram e controlam o processo físico, geralmente com *loops de feedbacks* (Lee *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2018). A tecnologia BDA considera a aplicação de técnicas avançadas de análise de dados para gerenciar grandes conjuntos de dados (Soroka *et al.*, 2017). A inteligência artificial é essencial para criar dispositivos, coisas e objetos inteligentes nas fábricas 4.0 (Xu *et al.*, 2018). Por fim, a MA descreve um conjunto de tecnologias que permitem a produção de um espectro crescente de bens por meio de camadas ou impressão 3D de materiais (Tavares *et al.*, 2023).

Estudos recentes têm investigado como as tecnologias da I4.0 podem melhorar a adoção da inovação aberta (ver por exemplo, Mubarak *et al.*, 2021; Strazzullo *et al.*, 2021). No entanto, poucas pesquisas têm avaliado a relação inversa, ou seja, como a aplicação da inovação aberta pode contribuir para I4.0 (Rocha *et al.*, 2022; Lepore *et al.*, 2023; Petruzzelli *et al.*, 2021). Dentre os estudos que endereçam esses temas de maneira integrada, Rocha *et al.* (2022) sugerem que as empresas precisam colaborar com parceiros para cocriar soluções digitais como parte da implementação da I4.0. Rocha *et al.* (2022) destacam ainda que as colaborações em pesquisa e desenvolvimento são facilitadoras e aceleradoras para a digitalização na manufatura. Lardo *et al.* (2020) também encontraram efeitos positivos da prática de colaboração (base da cocriação de valor) em *hubs* italianos de inovação digital para impulsionar a transformação digital das pequenas e médias empresas.

Petruzzelli *et al.* (2021) verificaram que a amplitude e a profundidade da inovação aberta estão positivamente relacionadas à adoção das tecnologias da I4.0. Lepore *et al.* (2023) investigaram o impacto do engajamento em práticas de *inbound* na adoção das tecnologias da I4.0, e encontraram que a colaboração de PMEs com universidades por meio de redes formais e informais pode ajudar na exploração de conhecimento para adoção de tecnologias da I4.0, por meio de tecnologias como IoT, robôs automatizados e impressão 3D. Assim, a segunda hipótese deste estudo é:

H2: As práticas de inovação aberta têm um impacto positivo na adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

4.2.4 Indústria 4.0 e economia circular

Estudos anteriores têm sugerido que a I4.0 é como um arcabouço de tecnologias digitais que podem facilitar a transição para EC (e.g, Bag *et al.*, 2021a; Ranta *et al.*, 2021;

De Sousa Jabbour *et al.*, 2018; Rejeb *et al.*, 2022). Dentre as tecnologias citadas no contexto da EC estão a internet das coisas (IoT), *big data analytics* (BDA), manufatura aditiva (MA), inteligência artificial, computação em nuvem, sistemas ciber físicos (CPS) (De Sousa Jabbour *et al.*, 2018; Hettiarachchi *et al.*, 2022; Ranta *et al.*, 2021).

Na aplicação da IoT, a comunicação em tempo real tem possibilitado a viabilização de modelos de *loop* e otimização para promover a EC (Ding *et al.*, 2023). Ranta *et al.* (2021) sugerem que os dados de monitoramento da IoT possam ser usados para melhorar o consumo de combustível da máquina, a fim de reduzir os fluxos de recursos e, ao mesmo tempo, tornar o produto mais desejado e econômico para o consumidor final. Laskurain-Iturbe *et al.* (2021) sugerem que a tecnologia de *big data* tem permitido analisar um grande conjunto de dados sobre especificações de compra otimizando processos de recuperação e a reciclagem de produtos. A manufatura aditiva também tem sido frequentemente associada aos princípios da EC (Sauerwein *et al.*, 2019; Hettiarachchi *et al.*, 2022). Sauerwein *et al.* (2019) relatam que a adoção da MA pode favorecer a ampliação do ciclo de vida dos produtos, facilitando reparos e atualizações. Outros estudos têm mostrado que a MA pode facilitar a reciclagem (Woern; Pearce, 2017; Behm *et al.*, 2018; Laskurain-Iturbe *et al.*, 2021).

A inteligência artificial pode contribuir com a EC por meio de previsões mais acuradas sobre a disponibilidade de resíduos e a demanda por produtos no mercado (Ranta *et al.*, 2021). Além disso, a inteligência artificial pode ainda auxiliar o desenvolvimento de novos produtos que atendam às necessidades de clientes, ao mesmo tempo em que aumentam a otimização do gerenciamento de estoques (Rejeb *et al.*, 2022).

Evidências de estudos empíricos sobre a EC habilitada pela computação em nuvem e CPS ainda são escassas na literatura (Halloui *et al.*, 2022). Os exemplos sugerem que a computação em nuvem pode facilitar a virtualização ou desmaterialização dos produtos físicos para impulsionar modelos de negócios circulares (Demestichas; Daskalakis, 2020). Segundo Rejeb *et al.* (2022), a computação em nuvem pode ainda permitir a integração e otimização de recursos e capacidades de fabricação em grande escala, ao possibilitar compartilhamento contínuo de informações e manufatura ágil, orientada a serviços, verde e inteligente, minimizando a pegada de carbono em ambientes sem papel.

Rejeb *et al.* (2022) apresentaram contribuições da tecnologia CPS para a EC, tais como: melhor transparência das operações de EC por meio de coleta de dados mais eficientes e melhor visibilidade das informações; virtualização das atividades de EC para garantir operações mais eficientes em toda a cadeia de suprimentos circular; melhora no consumo de

recursos. Diani e Colledani (2020) sugerem os CPS como um dos mais promissores para a facilitar os processos de reciclagem. Diante disso, a terceira hipótese deste estudo é:

H3: As tecnologias da Indústria 4.0 tem um impacto positivo na adoção da economia circular.

4.2.5 O papel mediador das tecnologias da Indústria 4.0

Até o presente momento, nenhuma pesquisa ainda buscou analisar o papel mediador das tecnologias das tecnologias da I4.0 na relação entre inovação aberta e EC. No entanto, os estudos existentes consideram as tecnologias da I4.0 um elemento relevante para mediar a adoção da EC em busca do desempenho sustentável (e.g., Kamble; Gunasekaran, 2021; Faisal, 2023; De Sousa Jabbour *et al.* 2023). Kamble e Gunasekaran (2021) verificaram que as tecnologias da I4.0 apoiam o desenvolvimento de um ambiente de EC eficiente. Ghaitan *et al.* (2023) apoiam esse argumento, ao verificar que as tecnologias da I4.0 tem impacto mediador positivo na adoção da EC para alcançar um desempenho sustentável de empresas da Arábia Saudita.

De Sousa Jabbour *et al.* (2023) analisaram a mediação das tecnologias da I4.0 na relação entre EC e resiliência organizacional e encontraram um papel mediador significativo das tecnologias da I4.0, que junto com a integração de clientes possibilitou que as organizações estivessem mais preparadas para as oportunidades e as ameaças do mercado na adoção da EC. Faisal (2023) observou que as tecnologias digitais são mediadoras para as cadeias de suprimentos que caminham na direção do desperdício zero.

Considerando as tecnologias específicas da I4.0, Al-Khatib (2023) verificou que a IoT pode fornecer um efeito de mediação positiva na relação entre as capacidades dinâmicas e EC em pequenas e médias empresas manufatureiras da Jordânia. A MA também pode mediar a adoção da EC, pois, aumenta a eficiência dos recursos, ao mesmo tempo que diminui barreiras e *trade-offs* para ambientes mais sustentáveis. Diante desses elementos, a quarta hipótese deste estudo é:

H4: As tecnologias da I4.0 medeiam positivamente a relação entre a inovação aberta e economia circular.

4.2.6 Teoria da capacidade absortiva

A teoria da capacidade absorptiva (CA) define a capacidade da empresa de assimilar e utilizar o conhecimento adquirido (Cohen; Levithal, 1990). Isto é, esta teoria sugere que uma empresa com CA pode reconhecer e assimilar novos conhecimentos gerados externamente, integrar conhecimentos externos e internos e explorá-los para desenvolver novas aplicações para fins comerciais (Cohen; Levinthal, 1990; Zahra; George, 2002).

A CA é considerada uma capacidade dinâmica que apoia a inovação tecnológica das empresas (Arcidiacono *et al.*, 2022). Empresas que possuem alta CA podem aprender e absorver novos conhecimentos e tecnologias, por meio do reconhecimento, assimilação e aplicação do conhecimento, enquanto aquelas com baixa CA podem ter dificuldades para fazê-lo (Jenatabadi *et al.*, 2023). Portanto, a CA é considerada uma capacidade chave para a inovação nas empresas (Arcidiacono *et al.*, 2022; Lichtenthaler; Lichtenthaler, 2009).

Zahra e George (2002) propuseram a CA como uma capacidade dinâmica que pode ser incorporada às rotinas e processos de uma empresa com a finalidade de promover a mudança e evolução organizacional. Em ambientes dinâmicos, o desenvolvimento de uma CA pode ser fundamental para alcançar uma vantagem competitiva (Teece *et al.*, 1997a).

No contexto ambiental, estudos recentes têm mostrado que a capacidade de absorção tende a favorecer o desempenho em sustentabilidade (Dzhengiz; Niesten, 2020; Aboelmaged; Hashem; 2019). Isso porque as empresas com altos níveis de capacidade de absorção podem ser mais capazes de assimilar, transformar e explorar o conhecimento externo e desenvolver altos níveis de competências e capacidades ambientais (Dzhengi; Niesten, 2020). Para Aboelmaged e Hashem (2019), a CA estimula a inovação nas empresas para alcançar melhores níveis de sustentabilidade.

No contexto da inovação aberta, a CA tem sido considerada uma capacidade crítica para gerenciar o conhecimento interno e externo (Lichtenthaler; Lichtenthaler, 2009; Huang; Rice, 2009). Isso porque a CA é uma capacidade dinâmica da gestão do conhecimento que reconfigura propositalmente os recursos ao longo do tempo para melhorar os resultados de inovação (Huang; Rice, 2009).

As tecnologias da I4.0 também podem se beneficiar da CA, pois permite que as empresas se envolvam em estratégias de inovação, para selecionar conhecimento externo, em ambientes de mudanças rápidas, como é o caso da I4.0 (Müller *et al.*, 2021). Além disso, Passot *et al.* (2022) mostram que as tecnologias digitais, como IoT, computação em nuvem, realidade aumentada e virtual e inteligência artificial podem ser assimiladas pela CA para melhorar o gerenciamento das cadeias de suprimentos das empresas.

Em relação à EC, estudos têm mostrado que a CA pode contribuir de forma positiva para a adoção da EC (Siddik *et al.*, 2023; Marrucci *et al.*, 2021a; 2021b; 2022). Por exemplo, Marrucci *et al.* (2021a) mostram que a adoção da CA nas PMEs, apoiada por fontes externas como universidades, fornecedores, clientes, concorrentes e consultores pode ajudar a fechar os ciclos de recursos nos sistemas produtivos. Além disso, a integração de conhecimentos e tecnologias externas para dentro da organização, pode facilitar a operacionalização de atividades mais sustentáveis habilitando novos modelos de negócios circulares (Marrucci *et al.*, 2021b).

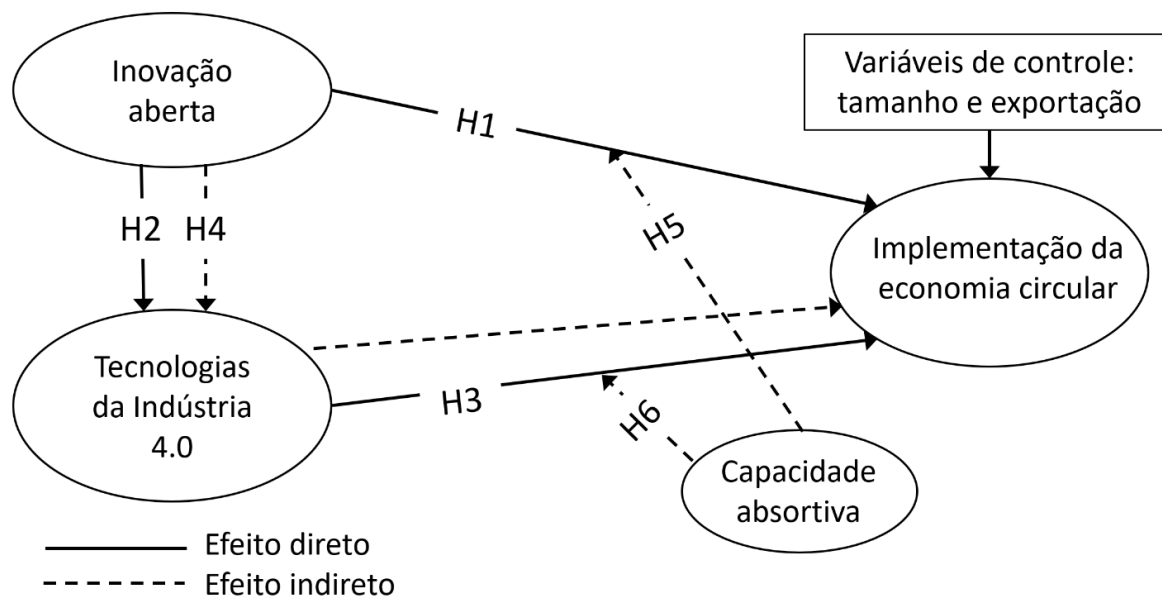
Embora existam estudos sobre os impactos da CA na inovação e sustentabilidade organizacional, poucos trabalhos têm avaliado o efeito moderador da CA nas relações envolvendo EC, inovação aberta e tecnologias da I4.0. Dentre os estudos, Siddik *et al.* (2023) verificaram que a CA modera positivamente a relação entre as práticas da EC e a performance ambiental. Li *et al.* (2022) encontraram uma moderação positiva da CA no uso de robôs industriais para reduzir a emissão de carbono. Considerando esse contexto, as seguintes hipóteses foram formuladas:

H5: A capacidade absorptiva modera positivamente a relação entre a inovação aberta e economia circular.

H6: A capacidade absorptiva modera positivamente relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e economia circular.

A partir das hipóteses formuladas, a Figura 8 apresenta o modelo conceitual de pesquisa a ser testado na etapa quantitativa.

Figura 8 - Modelo conceitual



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Além disso, as variáveis de controle selecionadas nesse modelo de pesquisa (Figura 8) foram o tamanho da empresa e a exportação (se a empresa exporta ou não seus produtos). Essas variáveis foram escolhidas, pois normalmente, as empresas grandes dispõem de mais recursos e capacidades para melhorar seu desempenho organizacional e ambiental, além de receberem maior pressão de *stakeholders* para implementar as práticas de EC (Arroyabe *et al.*, 2021; Pinheiro *et al.*, 2021). Em relação às atividades de exportação, Ferreira e Fuson-Nerini (2019) sugerem que ações orientadas para a exportação tendem a aumentar a circularidade e melhorar a eficiência dos recursos. Além disso, as redes de parceiros localizadas no exterior podem apoiar a adoção da EC, intensificando práticas como reparação e reutilização de produtos (Rizos; Bryhn, 2022).

4.3 Método de pesquisa

4.3.1 Amostra e coleta dos dados

Para atingir os objetivos da pesquisa, este estudo adotou um método quantitativo, no qual os dados foram coletados por meio de um questionário estruturado. Primeiro, identificou-se os indicadores dos construtos de EC, inovação aberta, tecnologias da I4.0 e

CA validados pela literatura. Segundo, realizou-se um pré-teste para melhorar a qualidade do questionário. Nove participantes, sendo cinco profissionais da indústria e quatro acadêmicos avaliaram o questionário, verificando se as perguntas mensuravam adequadamente o construto e a validade de conteúdo (ou seja, se todos os aspectos importantes do construto estavam sendo cobertos). O pré-teste também corrigiu a clareza do texto do questionário, tornando as perguntas mais compreensíveis para a aplicação. Após o *feedback* desses especialistas, o questionário foi ajustado tanto na forma quanto no conteúdo para criar a versão final disponível no Apêndice B. O questionário foi desenvolvido e aplicado em português com representantes de indústrias localizadas no Brasil.

O questionário foi distribuído eletronicamente por meio da plataforma QuestionPro durante os meses de maio de 2022 a janeiro de 2023. Foram abordados aleatoriamente cerca de 550 representantes de empresas (diretores, gerentes, presidentes e CEO's) com mensagens iniciais enviadas por *email* institucional e/ou rede social profissional do LinkedIn. Os contatos das empresas foram obtidos por meio dos registros disponibilizados pelas associações e sindicatos das indústrias brasileiras. Cada empresa foi representada por um respondente em nossa amostra.

Foram coletados 172 questionários. No entanto, 9 respostas foram descartadas, porque os setores indicados eram relacionados a serviços ou empresas governamentais (2 questionários), ou porque não haviam sido concluídos completamente (7 questionários). Finalmente, 163 questionários foram considerados para o propósito desta pesquisa. O tamanho da amostra foi verificado com a análise do software G*power para calcular o tamanho amostral mínimo necessário para análise. Com tamanho efetivo = 0,15, significância = 0,05 e nível de poder = 0,95, o resultado do tamanho amostral mínimo exigido foi de 107 casos. Os parâmetros utilizados estão de acordo para executar o PLS-SEM, pois a amostra atende as recomendações para um poder estatístico de pelo menos 80% (Hair *et al.*, 2017).

O perfil da amostra (N=163) apresenta que a maioria dos respondentes ocupam a posição de gerentes (42%) em grandes empresas com mais de 500 funcionários (62%). Os principais setores analisados foram construção civil (61), têxtil e vestuário (50), automotivo (23), manufatura (16). Outros setores como papel e celulose (4), metal (3), energia, petróleo e gás (2), químico (1), eletroeletrônico (1), tecnologia da Informação (1) e móveis e decoração (1) apareceram com menos frequência. Aproximadamente 75,5% das empresas

estão no mercado há mais de 20 anos (75,5%) e 57,1% exportam seus produtos. A Tabela 3 mostra o perfil dos respondentes da amostra.

Tabela 3 – Perfil dos respondentes (N = 163)

Características	Categorias	Frequência	Porcentagem (%)
Setor	Construção Civil	61	37,4
	Têxtil e vestuário	50	30,7
	Manufatura	16	9,8
	Automotiva	23	14,1
	Papel e celulose	4	2,5
	Outros	9	5,5
Idade	Até 1 ano	2	1,2
	2 a 5 anos	8	4,9
	6 a 10 anos	10	6,1
	11 a 19 anos	20	12,3
	20 anos ou mais	123	75,5
Tamanho	1 a 10	5	3,1
	11 a 19	0	0,0
	20 a 99	14	8,6
	100 a 499	43	26,4
	500 ou mais	101	62,0
Cargo	Presidentes e CEO	11	6,7
	Diretores	23	14,1
	Gerentes (produção, compras, operações, projetos, marketing, P&D, qualidade)	70	42,9
	Engenheiros	7	4,3
	Coordenadores e supervisores (P&D, produção, compras, vendas)	30	18,4
	Analistas (inovação, produção, planejamento, meio ambiente, qualidade)	22	13,5
Exportação	Sim	93	57,1
	Não	70	42,9

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

4.3.2 Medidas e operacionalização

Para medir a implementação da EC nas empresas, foi utilizado um conjunto de dez práticas proposto por Khan *et al.* (2021). A inovação aberta foi medida por meio de oito itens que contemplam práticas de *inbound* e *outbound* inovação aberta fornecidos por Popa *et al.* (2017) e Naqshbandi; Jasimuddin (2018) e Oltra *et al.*, 2014. As tecnologias da I4.0 foram representadas por seis tecnologias (Pinheiro *et al.*, 2021; Bag *et al.*, 2020) e também seis itens foram utilizados para medir a capacidade absorptiva (Aboelmaged; Hashem, 2019; Zacharia *et al.*, 2011). Todos os itens foram medidos com a escala tipo Likert de sete pontos (1 = discordo totalmente, 7 = concordo totalmente). A escala de sete pontos foi utilizada para

preservar as escalas das fontes originais e por apresentar-se mais confiável do que a escala de cinco pontos, permitindo maior diferenciação nas escolhas dos respondentes (Preston; Colman, 2000).

O tamanho da empresa e a atividade de exportação foram classificadas como variáveis de controle. O tamanho da empresa foi medido pela quantidade de funcionários, que também indicou o porte da empresa (micro 1-19 funcionários, pequena 20-99 funcionários, média 100-499 funcionários e grande empresa (mais de 500 funcionários) (Jugend *et al.*, 2018). A atividade de exportação foi medida por meio de uma variável binária (1- a empresa não exporta seus produtos ou 2 - a empresa exporta seus produtos).

4.3.3 *Análise de dados*

Para a análise dos dados adotou-se a modelagem PLS-SEM de dois estágios (Hair *et al.*, 2019). No primeiro estágio, foi avaliado a validade e confiabilidade do modelo de medição e no segundo estágio foi avaliado o modelo estrutural para testar as relações entre os construtos. O *software* SmartPLS versão 4.0.9.3 foi utilizado para avaliar o modelo conceitual da pesquisa que utiliza a modelagem de equações estruturais. As medidas como coeficiente de determinação, relevância preditiva e coeficientes de caminho, dentre outras foram avaliadas na validação do modelo de mensuração e avaliação do modelo estrutural.

O *Partial Least Squares-Structural Equation Modelling* (PLS-SEM) foi selecionado porque o modelo conceitual a ser analisado nesta pesquisa é complexo, envolvendo relações de moderação e mediação, além de interações por meio de variáveis de controle em um estudo exploratório. Além disso, o método PLS-SEM vem sendo amplamente utilizado na gestão de operações (Hair *et al.*, 2019) e também no contexto da EC (Khan *et al.*, 2021; De Sousa Jabbour *et al.*, 2022).

4.4 Resultados

4.4.1 *Modelo de mensuração*

Primeiro, avaliou-se o modelo de medição para verificar a confiabilidade, validade convergente e validade discriminante das variáveis latentes e manifestas do modelo. A confiabilidade foi avaliada pelo Alfa de Cronbach e Confiabilidade Composta (*Composite Reliability*, CR). Normalmente, valores acima entre 0,70 e 0,95 são considerados adequados

para esses parâmetros (Hair *et al.*, 2019). Para os *outer loadings*, uma carga baixa ($<0,50$) indica a exclusão do indicador, a menos que haja suporte teórico para a manutenção. Para melhorar a qualidade do modelo de medição, os indicadores CA5, EC7, EC8, IA3, IA7 foram excluídos por apresentarem carga baixa inferiores a 0,50. A validade convergente foi avaliada pelo valor da AVE. A Tabela 4 mostra que todos os valores de AVE foram superiores a 0,50, recomendação para que os indicadores expliquem, no mínimo, 50% da variabilidade do construto (Hair *et al.*, 2019).

Tabela 4 – Resultados finais para a média, desvio padrão, *outer loadings*, Alfa de Cronbach, confiabilidade composta e AVE

Variáveis latentes	Item	Média	DP	Outer loadings	Alfa de Cronbach	CR	AVE				
Capacidade absorptiva (CA)	CA1	6,031	1,359	0,865	0,943	0,948	0,815				
	CA2	5,791	1,399	0,900							
	CA3	5,908	1,314	0,940							
	CA4	5,779	1,306	0,925							
	CA6	5,822	1,427	0,882							
Economia circular (EC)	EC1	4,816	1,777	0,785	0,880	0,897	0,555				
	EC2	4,736	1,826	0,857							
	EC3	4,644	1,927	0,786							
	EC4	5,460	1,532	0,792							
	EC5	5,123	1,657	0,848							
	EC6	4,387	2,155	0,515							
	EC9	5,509	1,735	0,712							
	EC10	4,006	2,020	0,591							
	Tecnologias da Indústria 4.0 (TI)	TI1	5,012	1,915				0,752	0,825	0,834	0,536
		TI2	5,914	1,496				0,610			
TI3		5,037	1,870	0,784							
TI4		4,221	2,096	0,810							
TI5		3,061	2,291	0,636							
TI6		3,117	2,091	0,779							
Inovação aberta (IA)	IA1	5,552	1,602	0,737	0,822	0,830	0,533				
	IA2	5,442	1,563	0,747							
	IA4	4,160	2,187	0,754							
	IA5	3,503	2,062	0,823							
	IA6	2,509	1,923	0,572							
	IA8	4,080	2,125	0,723							

Nota: os itens com *outer loadings* $<0,5$ foram excluídos da análise (CA5, EC7, EC8, IA3, IA7); DP = desvio padrão; CR = *composite reliability*; AVE = *average variance extracted*. Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A validade discriminante foi avaliada pelo critério de Fornell-Larcker. Este critério compara a raiz quadrada dos valores do AVE com as correlações das variáveis latentes (Fornell; Larcker, 1981). Assim, a raiz quadrada do AVE de cada construto deve ser maior que sua correlação mais alta com qualquer outro construto. A Tabela 5 mostra que os

resultados satisfazem o critério de Fornell-Larcker, e por isso possuem boa validade discriminante.

Tabela 5 – Validade discriminante – Critério Fornell-Larcker

Variáveis latentes	1.	2.	3.	4.
1. Capacidade absorptiva	0,903			
2. Economia circular	0,477**	0,745		
3. Tecnologias da Indústria 4.0	0,491**	0,533**	0,732	
4. Inovação aberta	0,621**	0,559**	0,626**	0,730

Note: **Significância de 0.01 (2-tailed). Os valores da raiz quadrada da AVE (*square roots of average variances*) estão mostrados na diagonal principal e devem ser maiores que as correlações.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O critério heterotrait-monotrait (HTMT) é uma abordagem alternativa para avaliar a validade discriminante. O HTMT é um valor produzido comparando-se a AVE de cada construto (com base em cargas consistentes) com suas correlações de construto consistentes ao quadrado (Henseler *et al.*, 2016). Se o valor do HTMT for menor que 0,90, existe validade discriminante entre dois construtos reflexivos (Hair *et al.*, 2019). A Tabela 6 mostra que todos os valores de HTMT foram menores que 0,90, logo esses resultados indicam que o modelo proposto apresentou confiabilidade e validade aceitáveis.

Tabela 6 – Validade discriminante – resultados do HTMT

Variáveis latentes	1.	2.	3.	4.
1. Capacidade Absortiva				
2. Economia circular	0,534			
3. Tecnologias da Indústria 4.0	0,560	0,619		
4. Inovação aberta	0,721	0,663	0,752	

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

4.4.2 Modelo estrutural

O teste de viés de método comum foi realizado para verificar a colinearidade das medidas estabelecidas. Primeiro, constatou-se que o maior fator de inflação de variância (VIF) das variáveis foi 2,438 (Tabela 7), portanto abaixo do valor de referência (VIF < 3,3), indicando a ausência de um viés de método comum (Kock, 2015). Em seguida, avaliou-se a variância total explicada (*Harman Single Factor*) (Harman, 1976), e os resultados mostraram que o primeiro fator representou apenas 35,10% (< 40%) da variância total. Portanto,

concluiu-se que o viés do método comum não ameaçou os resultados. A Tabela 7 mostra os resultados do modelo estrutural.

Tabela 7 – Resultados do modelo estrutural

Variável latente	R ²	Adj. R ²	f ²	Q ²	VIF
Inovação aberta			0,037		2,438
Capacidade absorptiva					2,004
Economia circular	0,438	0,412		0,304	1,681
Tecnologias da Indústria 4.0	0,402	0,398	0,063	0,388	1,593

Notas: R² = coeficiente de determinação; f² = tamanho do efeito; Q² = relevância preditiva; VIF = variance inflation factor. Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O modelo avaliado possui um valor de R² e R² ajustado que pode ser considerado satisfatório, variando entre 0,402-0,438 e 0,398-0,412. Segundo Chin (1998) esses valores estão incluídos na categoria moderada. Logo, o modelo proposto explica 43,8% da variação da EC e 40,2% da variação das tecnologias da I4.0. A validade preditiva (Q²) também foi considerada significativa, pois os valores encontrados foram positivos variando entre 0,304 e 0,388. Essa descoberta significa uma precisão preditiva média do modelo de caminhos PLS (Hair *et al.*, 2019). O efeito resultante também foi considerado satisfatório, com as variáveis inovação aberta e tecnologias da I4.0 apresentando valores de 0,037 e 0,063, respectivamente. Como regra geral, valores maiores que 0,02, 0,15 e 0,35 representam tamanhos de efeito f² pequenos, médios e grandes (Hair *et al.*, 2019).

4.4.3 Teste de hipótese

O teste de hipótese foi conduzido usando uma abordagem de *bootstrapping* para 5000 subamostras e usando um nível de significância de 5% *one tailed*. Conforme apresentado na Tabela 8, todas as hipóteses do modelo foram suportadas (H1, H2, H3 e H4), exceto as hipóteses de moderação (H5 e H6). Analisando os efeitos diretos, os resultados revelam que a inovação aberta está positivamente associada à EC ($\beta = 0,225$, $p = 0,013$) e às tecnologias da I4.0 ($\beta = 0,634$, $p = 0,000$). Além disso, as tecnologias da I4.0 estão positivamente relacionadas à EC ($\beta = 0,248$, $p = 0,001$). Portanto, as hipóteses (H1, H2 e H3) que analisam os efeitos diretos foram suportadas.

O efeito indireto de inovação aberta na EC foi significativo a 1% ($\beta = 0,157$, $p = 0,002$), suportando a hipótese H4. Isso significa que as tecnologias da I4.0 medeiam parcialmente a relação entre inovação aberta e EC, uma vez que os efeitos diretos e indiretos são significativos. Segundo Hair *et al.*, (2017), existem três tipos de mediação: mediação

complementar, mediação competitiva e mediação somente indireta (Hair *et al.*, 2017). Nesse caso, uma mediação complementar foi observada, pois os efeitos diretos e indiretos da relação entre inovação aberta e EC foram significativos e apontaram para a mesma direção.

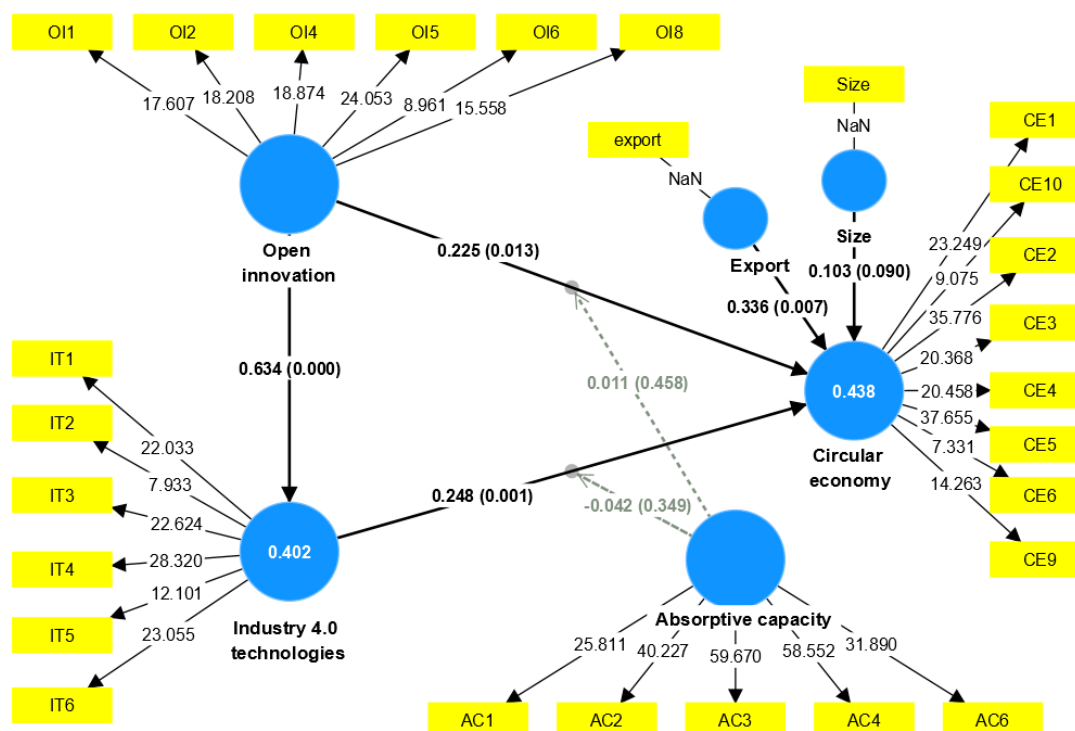
Para a análise de moderação, não encontramos evidências estatísticas que comprovassem a moderação da CA na relação entre inovação aberta e EC e também na relação entre as tecnologias da I4.0 e EC. Logo, as hipóteses H5 e H6 não foram suportadas. A Figura 9 apresenta os resultados da modelagem de equações estruturais. Em relação às variáveis de controle, apenas a exportação foi significativa para a implementação da EC ($\beta = 0,336$; $p = 0,007$). O tamanho da empresa não apresentou um efeito significativo para controlar a implementação da EC ($\beta = 0,103$; $p = 0,090$).

Tabela 8 - Resultados das hipóteses

Hipóteses e efeitos	Original Sample (O)	Sample Mean (M)	Standard Deviation (STDEV)	T Statistics ((O/STDEV))	p-valor	Decisão
Efeito direto						
H1: IA --> EC	0,225	0,222	0,102	2,218	0,013	Suportado
H2: IA --> TI	0,634	0,638	0,044	14,537	0,000	Suportado
H3: TI --> EC	0,248	0,250	0,081	3,058	0,001	Suportado
Efeito de mediação na EC						
H4: IA --> TI --> EC	0,157	0,160	0,055	2,844	0,002	Suportado
Efeito de moderação na EC						
H5: CA --> IA --> EC	0,011	0,008	0,101	0,105	0,458	Não suportado
H6: CA --> TI --> EC	-0,042	-0,039	0,108	0,387	0,349	Não suportado

Nota: IA = Inovação aberta; EC = economia circular; TI = Tecnologias da Indústria 4.0; CA = Capacidade absorptiva. Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 9 - Resultados da modelagem de equações estruturais



Nota: OI = Inovação aberta; CE = Economia circular; IT = Tecnologias da Indústria 4.0; AC = Capacidade absorptiva. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.5 Discussões

Embora existam vários estudos sobre as relações entre EC e tecnologias da I4.0, são poucos estudos que têm analisado o impacto da inovação aberta na EC e, ainda, que verificaram a relação mediadora das tecnologias da I4.0 entre a inovação aberta e a EC. Os achados deste estudo contribuem com esse *gap* ao apresentar resultados de como a inovação aberta pode influenciar a adoção da EC diretamente e, também, indiretamente por meio das tecnologias da I4.0. Sob a lente teórica da capacidade absorptiva, considerou-se que a capacidade de identificar e assimilar o conhecimento externo poderia moderar a relação entre inovação aberta e tecnologias da I4.0 e também a relação entre tecnologias da I4.0 e EC.

Os resultados mostraram que a inovação aberta tem um impacto positivo na EC (H1 suportada). Este resultado é particularmente um destaque dos achados desta pesquisa, porque apesar de estudos anteriores indicarem uma sinergia entre a inovação aberta e EC, este estudo apresenta resultados quantitativos que mostram que, os esforços da inovação aberta podem contribuir com a adoção da EC em empresas.

Os achados desta pesquisa reforçam a proposta de Brown *et al.* (2021) sobre a necessidade de colaboração com parceiros adequados para a inovação em direção a EC. Nessa linha, os resultados indicam que a parceria com ONGs, *startups* e governos regionais para o desenvolvimento de P&D foi o item mais relevante para o construto inovação aberta (*outer load* = 0,823). Seguido pela parceria com universidades, escolas técnicas, ou instituições de pesquisa (*outer load* = 0,754). Esses resultados também reforçam estudos anteriores, os quais indicam que a colaboração pode ser um elemento relevante no acesso às oportunidades de negócios, criando um ambiente favorável para a inovação de produtos sustentáveis (Köhler *et al.*, 2022; Marrucci *et al.*, 2021a; Triguero *et al.*, 2022).

Quanto à adoção da EC nas firmas, a prática mais relevante observada foi a priorização do uso de materiais biodegradáveis e/ou recicláveis (*outer loading* = 0,857). O uso de materiais biodegradáveis e/ou recicláveis tende a facilitar a implementação dos ciclos técnicos ou biológicos para menor extração de matéria virgem e menor degradação ambiental (EMF, 2013). Outra prática relevante para adoção da EC foi a preocupação da empresa em aumentar a eficiência de material e energia do processo produtivo com foco na sustentabilidade (*outer loading* = 0,848). De fato, a reutilização mais eficiente de recursos e a redução global de recursos, como energia podem reduzir os impactos ambientais negativos para favorecer o crescimento econômico, social e ambiental (Arroyabe *et al.*, 2021; Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Além dos achados acima complementarem pesquisas anteriores sobre inovação aberta e EC que abordaram o tema por meio de estudos de casos ou revisões teóricas (e.g., Brown *et al.*, 2020; Cong *et al.*, 2020; Amenta *et al.*, 2019; Bogers *et al.* 2020; Marrucci *et al.*, 2021a; Jesus; Jugend, 2023); os resultados agregam à literatura ao sugerirem que a inovação aberta pode contribuir com a superação de uma das principais barreiras envolvidas na transição para a EC, que são as barreiras tecnológicas (e.g., Ritzén; Sandström, 2017; De Jesus; Mendonça, 2018; Wang *et al.*, 2022).

Nesse sentido, a inovação aberta se relaciona positivamente com as tecnologias da I4.0 (H2 suportada), indicando que empresas mais engajadas com as práticas de inovação aberta *inbound* e *outbound* podem estar mais propensas à aplicação de tecnologias da I4.0 (Lardo *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2022; Petruzzelli *et al.*, 2021). No modelo, demonstrou-se que as tecnologias da I4.0 estão diretamente relacionadas com a adoção da EC (H3 suportada). Além disso, as tecnologias 4.0 medeiam parcialmente a relação entre inovação aberta e EC (H4 suportada). Assim, investimentos em inovação aberta podem resultar em

benefícios diretos e indiretos tanto para as tecnologias da I4.0 quanto para a EC. Esse resultado está de acordo com os resultados da investigação de Schöggel *et al.* (2023), que também encontraram uma relação positiva entre I4.0 e EC. Assim, esse estudo reforça o argumento de que as tecnologias da I4.0 são relevantes na adoção da EC (Hettiarachchi *et al.*, 2022; Lei *et al.*, 2022; Hallioui *et al.*, 2022; Ranta *et al.*, 2021), e destaca o efeito indireto das tecnologias da I4.0 na relação entre inovação aberta e EC.

A partir das exposições anteriores, torna-se evidente a importância da colaboração interorganizacional, assim como das práticas de inovação aberta (Mignacca *et al.*, 2022) para impulsionar a transição para a EC (Eisenreich *et al.*, 2021) e desenvolvimento da maturidade da I4.0 nas empresas. Este resultado é especialmente relevante para empresas no contexto de países emergentes, que buscam ações que efetivamente impulsionem o seu desenvolvimento tecnológico e sustentável, diante das novas demandas para atuação no mercado global.

Em relação à aplicação das tecnologias da I4.0, a tecnologia *big data* foi considerada a mais relevante (*outer loading* = 0,810), seguida pelas tecnologias CPS e inteligência artificial, com *outer loading* iguais a 0,784 e 0,779, respectivamente. A relevância das tecnologias *big data* e inteligência artificial já era esperado, pois estão entre as principais tecnologias que promovem a implementação da EC (Lei *et al.*, 2022; Hallioui *et al.*, 2022). No entanto, a relevância de CPS foi um resultado inesperado. Embora Diani e Colledani (2020) ressaltem o potencial dos CPS, poucos estudos até o momento tinham trazido evidência do papel dos CPS no desenvolvimento de práticas de ciclo fechado (Lee *et al.*, 2015).

Sobre o papel moderador da CA na adoção da EC, os resultados deste estudo não encontraram evidências para suportar as hipóteses H5 e H6. Duas justificativas são apresentadas a seguir. Em primeiro lugar, argumenta-se que apesar da relevância da CA, os estudos que relacionam a CA e EC são recentes e exploratórios (Marrucci *et al.*, 2021b; Marrucci *et al.*, 2022). Assim, discussões adicionais sobre custos e cultura organizacional para aplicação da CA não foram amplamente discutidos no contexto da EC. Por exemplo, Kang *et al.* (2022) apresentam que os custos associados à aquisição, assimilação e transformação de novos conhecimentos para empresas exportadoras que buscam ingressar em mercados internacionais podem exceder os retornos financeiros associados à exploração dos novos conhecimentos. Além disso, as empresas podem apresentar dificuldades em articular as dimensões da CA para transformar o conhecimento externo na implementação

de práticas de EC (Ibarra-Cisneros et al., 2020). Em segundo lugar, a falta de evidência da moderação pode estar relacionada à estrutura de medição da CA. Pois, este estudo mediu a CA como um construto de primeira ordem, ao invés de considerar um construto de segunda ordem, que separa as capacidades de absorção em potencial e realizada (Zahra; George, 2002).

Sobre o tamanho das empresas, embora alguns estudos apontem uma dificuldade das pequenas empresas implementarem a EC (Mishra *et al.*, 2022; García-Quevedo *et al.*, 2020), este estudo não encontrou evidências para mostrar que o tamanho da empresa é uma variável significativa para a EC. Por outro lado, a exportação foi uma variável de controle significativa. Esse resultado sugere que empresas exportadoras estão mais expostas a mercados e legislações mais rigorosos, o que pode estar incentivando a adoção de práticas da EC para comercialização de produtos em países estrangeiros.

4.6 Considerações finais

Este estudo analisou como a inovação aberta e as tecnologias da I4.0 contribuem para a adoção da EC sob a perspectiva da teoria da capacidade absorptiva. Ao coletar dados de empresas brasileiras e aplicar a PLS-SEM, os achados desse estudo mostram que a inovação aberta e as tecnologias da I4.0 podem apoiar a adoção da EC nas empresas. Outro destaque dos resultados é a mediação positiva e complementar das tecnologias da I4.0 na relação que envolve a inovação aberta para alcançar sistemas econômicos mais circulares. A moderação da CA no modelo não foi confirmada nesse estudo.

4.6.1 Implicações teóricas

Este estudo contribui para o corpo de conhecimento existente de várias maneiras. Em primeiro lugar, este estudo propõe uma relação direta e significativa de como a inovação aberta pode influenciar a adoção da EC. Desde a introdução do termo por Chesbrough (2003), a inovação aberta tem sido intensamente pesquisada. No entanto, a sua relação com a EC ainda é recente e merece maiores esclarecimentos, principalmente quando se nota na literatura em EC que as barreiras tecnológicas estão dentre as principais na transição para a EC (De Jesus e Mendonça, 2018; Takacs *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Assim, esse estudo

contribui tanto com o campo teórico da inovação aberta quanto de EC ao desenvolver, propor e testar um modelo de pesquisa que avalia as suas relações.

Os resultados apresentados neste estudo reforçam pesquisas anteriores e qualitativas que indicam a inovação aberta como um preditor da EC (Bogers *et al.*, 2020; Eisenreich *et al.*, 2021; Jesus; Jugend, 2023). Os resultados mostram também que a inovação aberta tem um efeito direto e positivo na adoção das tecnologias da I4.0. Dessa forma, a colaboração das empresas com *startups*, clientes, fornecedores, governos, bem como a parceria com universidades podem ser essenciais no processo de inovação aberta para elevar o nível de prontidão da I4.0 de nascente para crescente (De Sousa Jabbour *et al.*, 2022), facilitando ao mesmo tempo a adoção da EC (Hettiarachchi *et al.*, 2022). Mesmo que a motivação do investimento em tecnologias da I4.0 na maioria das empresas possa não estar relacionada às preocupações ambientais (De Marchi; Di Maria., 2020), a adoção dessas tecnologias pode favorecer a implementação da EC no nível micro. Por fim, os achados deste estudo estendem o papel das tecnologias da I4.0 no contexto da EC, mostrando que além do efeito direto na adoção da EC, as tecnologias da I4.0 podem mediar os esforços de inovação aberta para adoção da EC nas empresas.

Para a teoria da capacidade absorptiva, nossos achados trouxeram resultados inesperados, visto que o potencial de fortalecer as relações entre a inovação aberta, I4.0 e implementação da EC não se confirmou. Contudo, o contexto analisado pode ter influenciado os resultados encontrados, de modo que se tornam necessários novos estudos que busquem investigar o papel moderador da capacidade absorptiva na relação entre inovação aberta e EC.

4.6.2 *Implicações práticas*

Este estudo fornece algumas implicações práticas que permitem melhorar a compreensão de como as empresas podem acelerar sua transição em direção à EC. Primeiro, os resultados sugerem que a adoção da inovação aberta (abertura da empresa para incluir fontes externas de inovação no desenvolvimento de P&D) pode ser uma estratégia positiva para melhorar a adoção de práticas de EC e das tecnologias da I4.0. Assim, os achados indicam que também é relevante usar o modelo de inovação aberta, integrando atores como funcionários, *startups*, governos, universidades, fornecedores e clientes para o surgimento de ideias, inovações e desenvolvimento de tecnologias para a adoção da EC. Nesse sentido,

considerando as novas demandas do ambiente de negócios, este estudo sugere aos praticantes considerarem práticas de colaboração interorganizacional para impulsionar a EC em suas empresas. Assim, a prática de inovação aberta, como a colaboração com *stakeholders* e a abordagem de cocriação podem ajudar no desenvolvimento de inovações circulares.

Os resultados desse estudo também indicam que essas iniciativas de colaborações baseadas nas práticas de inovação aberta impulsionam a implementação de tecnologias da I4.0, como *big data*, CPS, inteligência artificial, IoT, computação em nuvem e MA. Logo, as tecnologias 4.0 podem tanto afetar diretamente a adoção da EC quanto mediar a relação entre inovação aberta para maximizar os esforços de inovação na transição para a EC. Isto é, além das tecnologias da I4.0 oferecerem maior capacidade produtiva e competitiva para as empresas, a sua adoção também favorece a transição para a EC.

4.6.3 *Limitações e pesquisas futuras*

Assim como em outros estudos, esta pesquisa apresenta algumas limitações que devem ser reconhecidas. A primeira limitação é a utilização de dados transversais. Apesar dos temas tratados serem relativamente recentes e os procedimentos desafiadores para obtenção de dados longitudinais, uma análise longitudinal poderia mostrar como a inovação aberta e I4.0 se comportam nas diferentes etapas de adoção da EC nas empresas. A segunda limitação é a coleta de dados em apenas um único país (Brasil), o que fornece um contexto de país em desenvolvimento. Além disso, 42,9% dos respondentes que participaram da pesquisa ocupam cargos de média gerência em áreas como produção, compras, operações, projetos, marketing, P&D e qualidade. Esse resultado pode ter limitado a concepção de questões mais estratégicas envolvendo a implementação de práticas de inovação aberta e tecnologias da Indústria 4.0 para a EC.

Dessa forma, pesquisas futuras podem coletar dados longitudinais com a participação de diretores e proprietários de empresas de diferentes países, para verificar as hipóteses em outros contextos. A análise em outros contextos poderia fornecer uma análise mais generalizada ao incluir países com diferentes estágios de prontidão para a I4.0 e EC. Além disso, pesquisas futuras podem avaliar o efeito da profundidade e extensão da inovação aberta no alcance das práticas da EC sob a perspectiva de outras capacidades da gestão do conhecimento, como por exemplo, capacidade desortiva, capacidade inovadora, capacidade transformadora.

CAPÍTULO 5: ARTIGO 3 - INOVAÇÃO ABERTA PARA A ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASOS NO SETOR DE MINERAÇÃO

Resumo

A transição para a economia circular na indústria de mineração tem sido lenta e desafiadora. Por isso, o objetivo desse estudo foi analisar como as práticas de inovação aberta podem contribuir para a implementação da economia circular na indústria de mineração. O método de pesquisa escolhido foi o estudo de caso realizado em duas grandes empresas de mineração de lítio localizadas no Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil. Para a coleta de dados foram realizadas entrevistas com os gestores e análise de documentos e relatórios das empresas. Os resultados mostraram que a economia circular ainda está em seus estágios iniciais nas empresas. Entretanto, algumas práticas de inovação aberta *inbound* como a colaboração com *stakeholders* (universidades e *startups*) e contratação de P&D externo têm apoiado os projetos ambientais e sociais. Por outro lado, não se identificou práticas de inovação aberta *outbound* nas empresas. O artigo contribui para mostrar como a indústria de mineração tem avançado no contexto da sustentabilidade por meio da integração de práticas de inovação aberta para a economia circular.

Palavras-chave: economia circular, indústria de mineração, lítio, sustentabilidade, desenvolvimento sustentável.

5.1 Introdução

A mineração é uma atividade econômica e industrial que consiste na pesquisa, exploração, lavra (extração) e beneficiamento de minérios presentes no subsolo (ANM, 2023). A mineração é uma atividade crucial para a economia mundial. Estima-se que as rendas minerais contribuam 0,5% do PIB global e entre 4 e 7% das emissões de gases de efeito estufa (Upadhyay *et al.*, 2021). Nos países emergentes como o Brasil e Chile essa contribuição no PIB é ainda maior, podendo chegar a quatro vezes para o Brasil e 23 vezes para o Chile (Upadhyay *et al.*, 2021).

No Brasil, a indústria de mineração faturou em 2022 cerca de 250 bilhões de reais com a produção de mais de 90 tipos de minerais, e empregou mais 204 mil funcionários diretamente (IBRAM, 2023). As exportações de minério de ferro foram as mais significativas representando 69,3% das exportações, o ouro, cobre e nióbio foram responsáveis por 11,8%, 6,6% e 4,9% das exportações, respectivamente (IBRAM, 2023).

A indústria de mineração oferece produtos que servem de *inputs* para o funcionamento de outras indústrias na produção de computadores, cosméticos, estradas, estruturas metálicas, dentre outros. Além disso, as ferramentas e máquinas feitas de minerais são utilizadas na agricultura, metais e plásticos são utilizados na purificação e transporte de água e também na produção e transporte de energia (Watts *et al.*, 2023).

Apesar da codependência da humanidade com a mineração, as suas atividades vêm causando impactos ao meio ambiente e à sociedade. Watts *et al.* (2023) alertam que a mineração pode causar contaminação, seca, degradação da terra, desmatamento e perda de biodiversidade, o que compromete a segurança alimentar ao reduzir a qualidade do solo. Upadhyay *et al.* (2021) afirmam que a mineração em larga escala também pode causar a poluição da água e do ar. Em relação aos impactos sociais, a mineração pode provocar o deslocamento de algumas comunidades indígenas e rurais, violência e agitação na região de instalação das mineradoras (Watts *et al.*, 2023).

Para melhorar a sustentabilidade da indústria de mineração que, atualmente, ainda é fortemente apoiada em uma economia linear (*take-make-dispose*), vários estudos vêm discutindo os desafios, barreiras e *drivers* para implementação da economia circular (EC) nesse setor (Upadhyay *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2020; Kinnunen *et al.*, 2019). No entanto, a transição para a EC na indústria de mineração é um processo complexo, uma vez que, a reciclagem e reutilização dos resíduos minerais dependem das configurações geológicas das

jazidas de minério, que geralmente indicam falta de conteúdo mineral e baixo potencial de reutilização dos resíduos minerais produzidos durante as operações de extração e processamento mineral (Osei *et al.*, 2023; Palacios; Espí Rodríguez, 2022).

As barreiras para implementar a EC na mineração envolvem elementos como: a falta de informação dos proprietários de minas sobre os efeitos positivos da EC (Pouresmaieli *et al.* (2023); alto investimento para as ações da EC como implementação de energia renovável (Pouresmaieli *et al.*, 2023); dificuldades relacionadas aos sistemas de reaproveitamento de rejeitos de mineração (Sulista *et al.*, 2023); falta de mão de obra qualificada (Pouresmaieli *et al.*, 2023; Osei *et al.*, 2023); falta de estruturas de governança e a aplicação de políticas legislativas (Osei *et al.*, 2023; Gedam *et al.*, 2022); pouca viabilidade do uso da reciclagem (Upadhyay *et al.*, 2021).

Para superar as dificuldades da indústria de mineração em operar em uma economia de baixo carbono faz-se relevante que ela esteja aberta à inovação do seu modelo de negócio (Vargas *et al.*, 2023; Osei *et al.*, 2023). Osei *et al.* (2023) sugerem que a combinação das inovações nas dimensões tecnológicas, organizacionais e ambientais pode ser um caminho para apoiar as mineradoras em direção à EC. A inovação do modelo de negócio para adotar sistema produto-serviço também pode contribuir para uma mineração mais sustentável. Pois, quando os fornecedores são responsáveis pelos produtos e serviços através de devoluções, reciclagem e remanufatura, reduzindo os desperdícios ao longo da vida útil do produto, a inovação pode mudar o comportamento do consumidor para reduzir o impacto ambiental do consumo (Vargas *et al.*, 2022). Nessa linha, empresas de mineração como Atlas Copco tem ampliado sua trajetória de inovação em direção aos serviços, visando a confiabilidade e redução de custos de energia para atingir seus propósitos de circularidade (Vargas *et al.*, 2022).

Embora a relação entre inovação aberta e EC seja recente, alguns estudos têm mostrados que as estratégias de inovação aberta podem impactar positivamente a implementação da EC (Jesus; Jugend, 2023; Eisenreich *et al.*, 2021; Brown *et al.*, 2020). Práticas sustentáveis por meio da EC estão integradas com ações de inovação para minimizar o desperdício (Sulista *et al.*, 2023). Exemplos de inovação de processos para recuperação de resíduos minerais podem ser vistos em vários estudos (Sulista *et al.*, 2023; Lemos *et al.*, 2023; Rosario-Beltré *et al.*, 2023; Więckol-Ryk *et al.*, 2023). Assim, o desenvolvimento de processos inovadores permite a aplicação de uma abordagem de EC à gestão e exploração de resíduos minerais, beneficiando a saúde humana e o meio ambiente, de tal forma que, a

sociedade está mudando sua percepção fundamentalmente negativa do setor de mineração (Castano *et al.*, 2023).

Compreender os interesses dos *stakeholders* pode fortalecer as práticas de responsabilidade social corporativa em direção à sustentabilidade ambiental e social das mineradoras (Molinari; Annan-Diab, 2024; Osei *et al.*, 2024; Muhammad *et al.*, 2024). Nesse contexto, Osei *et al.* (2024) sugerem que a pressão de *stakeholders* de mercado e regulatórios pode afetar positivamente a implementação das práticas de EC e impulsionar as dimensões do *triple bottom line* (social, econômica e ambiental). Para Wicaksono e Setiawan (2024), *stakeholders* específicos como o governo, a mídia e as partes interessadas internacionais podem estimular e pressionar a divulgação e comunicação sobre a utilização dos recursos naturais nas mineradoras da Ásia. Os membros das comunidades locais também podem pressionar por novas oportunidades de emprego e programas sociais (Muhammad *et al.*, 2024).

As dificuldades no tratamento das expectativas dos *stakeholders* são apresentadas em vários estudos que envolvem as mineradoras (César, 2019; Molinari; Annan-Diab, 2024). Essas dificuldades são motivadas pela falta de tempo e interesse de gestores em tratar as especificidades locais e reclamações junto às comunidades (Molinari; Annan-Diab, 2024). Por outro lado, as empresas que reconhecem a importância dos interesses dos *stakeholders* estão mais propensas a construir capacidades inovadoras que podem efetivamente implementar as práticas de CE (Osei *et al.*, 2024). Diante desse contexto, a teoria dos *stakeholders* foi utilizada nesse estudo para ajudar na compreensão dos interesses e motivações envolvidos entre os stakeholders da indústria de mineração de lítio.

Apesar de estudos recentes apontarem que a inovação aberta pode auxiliar a implementação da EC e do potencial da EC para melhorar a sustentabilidade ambiental dessas empresas, no melhor do nosso conhecimento ainda não foram investigados como esses dois conceitos podem auxiliar as empresas mineradoras. Assim, o objetivo desse trabalho o qual ainda é exploratório, é analisar como as práticas de inovação aberta podem ajudar na implementação da economia circular na indústria de mineração. Por isso, esse estudo busca responder a seguinte questão que merece maiores esclarecimentos: *como as práticas de inovação aberta podem contribuir para a implementação da economia circular na indústria de mineração?*

O restante do artigo está organizado da seguinte forma, a seção 5.2 apresenta o estado atual das pesquisas que envolvem a EC e inovação aberta na indústria de mineração. A seção

5.3 descreve os métodos para a coleta e análise dos dados obtidos com aplicação de dois estudos de caso. A seção 5.4 apresenta os resultados das análises de conteúdo dos relatórios de sustentabilidade das empresas de mineração com foco em conceitos associados à EC e inovação aberta. A seção 5.5 apresenta as discussões e implicações dos resultados. E, por fim, a seção 5.6 finaliza com as considerações finais, limitações e pesquisas futuras.

5.2 Revisão teórica

5.2.1 Economia circular na indústria de mineração

O conceito de economia circular (EC) busca fechar os ciclos de materiais para manter o valor do recurso por mais tempo possível e reduzir o consumo de matéria prima virgem nos processos de produção, beneficiando meio ambiente, economia e sociedade (Kirchherr *et al.*, 2017). Sendo assim, os princípios da EC são eliminar resíduos e poluição, circular produtos e materiais por mais tempo possível e regenerar a natureza (Ellen Macarthur Foundation, 2023). Hojnik *et al.* (2024) afirmam que a EC pode ser estabelecida por meio de processos circulares de *design* e produção fundamentados nos princípios de eficiência de recursos.

Na indústria de mineração, o conceito de EC ainda está em seus estágios iniciais (Upadhyay *et al.*, 2021). As atividades de mineração ainda estão fortemente fundamentadas no princípio da economia linear (*take-make-dispose*) (Gedam *et al.*, 2022). A mineração é uma atividade essencial para a sociedade, porém a sua atividade pode trazer impactos ambientais e sociais negativos, tais como, a destruição de ecossistemas e biodiversidade, subsidência de minas, erosão do solo e poluição sonora, do ar e da água, riscos de acidentes fatais, riscos à saúde e deslocamento de comunidades (Yu, 2017).

Por isso, a adoção da EC em pequenas e grandes mineradoras é relevante para possibilitar melhoria do meio ambiente, sociais e econômico. De acordo com Upadhyay *et al.* (2021), a preocupação com o aquecimento global, a eliminação gradual dos carros a gasolina e diesel e a falta de aterros sanitários são identificados como os principais gatilhos ou motivadores para reivindicar por mudanças na legislação a favor de uma indústria mineira mais circular. Uma vez que a falta de medidas de governança e a falta de política legislativa abrangente tem influenciado todos os outros desafios (econômicos e tecnológicos) da implementação da EC na mineração (Gedam *et al.*, 2021)

A proposta da circularidade na mineração envolve a revisão da gestão de resíduos de mineração (Palacios *et al.*, 2021), para o reaproveitamento de rejeitos de minas (Ye *et al.*, 2022; Sulista *et al.*, 2023), o monitoramento e redução do consumo de energia, água e outros recursos naturais durante as operações de mineração (Palacios *et al.*, 2021; Ruokonen, 2021) e aumento do uso de energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis (Pouresmaieli *et al.*, 2023).

Alguns estudos também associam os princípios 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar) aplicados ao contexto da mineração para promover a circularidade, com o objetivo de maximizar o uso de recursos, aumentar as taxas de recuperação, minimizar a geração de resíduos e prolongar a vida útil de recursos (Sulista *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2021).

Apesar da EC na indústria de mineração estar ainda em um estágio inicial (Upadhyay *et al.*, 2021), alguns estudos vêm revelando como o setor tem implementado as práticas de EC. Por exemplo, Lèbre *et al.* (2017) apresentam a transição sustentável na mineração com suporte de novos modelos de negócios e mudança na cultura de gestão, ao citar práticas de aproveitamento de resíduos mineralizados e indicadores MFA (*material flow accounting*) para quantificar o desempenho de um projeto de mineração em relação à gestão de seu recurso natural. Novos modelos de negócio também podem ser vantajosos para o setor, pois possibilitam aumentar a atratividade de investimento de projetos inovadores, criar novos processos de negócio e criar novas cadeias de valor (Marinina *et al.*, 2022).

Sobre a gestão de resíduos, Pactwa *et al.* (2020) mostram que os resíduos de mineração de carvão podem ser reutilizados no processo para a produção de energia. A reutilização de resíduos de mineração de carvão tem um efeito positivo na recuperação e restauração de terras, pois diminui o tamanho dos depósitos de mineração, uma vez que, para cada tonelada de carvão produzida, são geradas 0,4 a 0,5 toneladas de resíduos (Pactwa *et al.*, 2020). Benahsina *et al.* (2022) propõem a reutilização dos resíduos sólidos da mineração como matéria prima alternativa para a fabricação de tijolos. Ye *et al.* (2022) também mostram uma proposta de reutilização dos elementos de silício e alumínio presentes no resíduo de rejeitos de feldspato potássico para a preparação da zeólita ZSM-5. Sulista *et al.* (2023) avaliam positivamente a viabilidade financeira de dois procedimentos para a reutilização da areia de quartzo, resíduo resultante da mineração de estanho, para transformação em areia de concreto.

Sobre as práticas de reciclagem na indústria de mineração, Yu *et al.* (2017) observam que a escala para a reciclagem dos recursos naturais ainda é muito pequena. Algumas minas

empregam uma abordagem de EC para desenvolver novos produtos a partir de seus resíduos, entretanto, a escala é pequena devido ao número limitado de mercados e investimento insuficiente (Yu *et al.*, 2017). Palacios e Rodríguez (2022) afirmam que a reciclagem na mineração é iniciante, porque o gerenciamento de resíduos na mineração é um processo complexo que pode ser influenciado pelas condições geológicas, geoquímicas, climatológicas e sociais de uma jazida natural.

Nesse sentido, as tecnologias extrativas podem ser aplicadas a jusante à reciclagem de resíduos, por exemplo para resíduos eletrônicos, para que a indústria de mineração possa desempenhar um papel maior como recicladores e mineradores de resíduos em direção à EC (Lèbre *et al.*, 2017; Palacios; Rodríguez, 2022).

Em relação ao consumo energético, Ruokonen (2021) tem mostrado que a eletrificação e automação estão sendo utilizadas pelas grandes mineradoras globais para combater os efeitos das mudanças climáticas. No cenário em que a indústria de mineração é uma das indústrias que mais consomem energia, sendo responsável por aproximadamente 38% da energia utilizada em todas as indústrias, 15% do consumo global de eletricidade e 11% do uso global de energia (Pouresmaieli *et al.*, 2023). Assim, os custos de energia representam uma parcela substancial que varia de 15% a 40% das despesas operacionais totais no setor de mineração (Pouresmaieli *et al.*, 2023).

Portanto, a transição energética com o uso de energia renovável tem o potencial de reduzir o impacto ambiental na indústria de mineração. O uso de energia renovável pode criar empregos, reduzir a poluição ambiental, aumentar o conhecimento na área de mineração, criar uma EC na indústria de mineração e reduzir os custos operacionais (Pouresmaieli *et al.*, 2023).

Os estudos também têm mostrado as barreiras e desafios para avançar com as práticas da EC na mineração. Osei *et al.* (2023) pesquisaram as barreiras para implementar a EC na indústria de mineração africana e identificaram barreiras tecnológicas, organizacionais e ambientais. As barreiras tecnológicas envolvem a falta de tecnologia avançada e desafios de *design* para otimizar o consumo de recursos e o valor dos materiais residuais de mineração. As barreiras organizacionais estão relacionadas às restrições financeiras referente aos investimentos da EC seguida pelo fraco apoio da gestão. E as barreiras ambientais incluem a ausência e a falta de cumprimento das normas, seguida pela falta de apoio governamental à operação da EC.

Sulista *et al.* (2023), também corroboram com as barreiras organizacionais descritas por Osei *et al.* (2023) ao afirmarem que os altos custos de investimentos iniciais em EC pode ser uma barreira que limita a adoção da EC nas mineradoras. Por outro lado, Marinina *et al.* (2022) sugerem que o principal problema para implementação de modelos de negócio circulares na mineração é a falta de conhecimento teórico sobre o tema e de um mecanismo de gestão organizacional que leve em consideração as especificidades do setor.

Para Singh *et al.* (2020), as políticas e regulamentações governamentais são o principal obstáculo à implementação da EC na indústria de mineração, seguida pelas barreiras de mercado. A falta de medidas de governança e implementação de regras relacionadas à EC também tem sido destacado nos estudos de Gedam *et al.* (2022). Na China, a ausência de um plano para controlar a poluição após o fechamento das minas foi destacada como uma barreira para atingir a sustentabilidade das minas (Yu, 2017).

Somado a isso, a crescente pressão socioeconômica e ambiental sobre a indústria de mineração tem se estendido às mineradoras localizadas em diferentes partes do mundo. Um exemplo é a licença social para operar (*social license to operate*, SLO), a qual depende de uma responsabilidade social corporativa das empresas de mineração para melhorar sua relação com o meio ambiente e comunidades locais (Ruokonen, 2021). Ao melhorar o desempenho social e ambiental, as mineradoras podem alcançar a SLO e reduzir o déficit de confiança entre a indústria e sociedade (Hodge *et al.*, 2022).

5.2.2 Inovação aberta para uma indústria de mineração mais sustentável

As inovações são importantes para enfrentar os desafios ambientais da mineração, porém as inovações radicais na tecnologia de mineração são raras (Ruokonen, 2021). Hodge *et al.* (2022) apontam que as mineradoras gastam menos de 1% de seu faturamento em pesquisa e desenvolvimento em apoio à inovação. Elokhova *et al.* (2023) revelam que as atividades inovadoras da indústria de mineração têm um impacto significativo na redução da intensidade ecológica no campo do consumo de eletricidade e água dos corpos hídricos naturais na indústria de mineração russa.

Alguns estudos já indicam que maiores esforços em inovação podem ajudar na transição para uma mineração mais sustentável e circular (Yu, 2017; Li *et al.*, 2021; Osei *et al.*, 2023). Para Marinina *et al.* (2020), a adaptação de modelos de negócios circulares às operações de mineração e processamento mineral pode servir como um impulso para que as

empresas de mineração se atualizem e avancem para um novo nível de sofisticação tecnológica.

Criar soluções tecnológicas para sustentar um modelo de negócio baseado, por exemplo, no sistema produto-serviço inteligente pode ajudar na promoção de operações de mineração mais circular, garantindo que materiais e máquinas sejam utilizados por mais tempo. Por exemplo, Vargas et al. (2022) relatam que a empresa multinacional Komatsu tem adotado um sistema produto-serviço inteligente de seu maquinário de mineração, o qual permite a manutenção remota através de um sistema de monitoramento e previsão centrado em avaliar e prever a condição do componente diesel no motor.

Os modelos circulares baseados em processos de fabricação inovadores podem permitir também que os resíduos ou subprodutos de uma indústria sejam transformados em recursos para outra indústria (Marinina *et al.*, 2022). Assim, existe um potencial para a utilização de rejeitos, mencionado como simbiose industrial (Kinnunen *et al.*, 2022). No entanto, o conteúdo de minerais a ser reutilizado deve ser avaliado de acordo com a viabilidade financeira, tecnológica e de mercado, uma vez que, as necessidades do mercado e as tecnologias que orientam essas práticas mudam (Kinnunen *et al.*, 2019; Sulista *et al.*, 2023).

A inovação tecnológica nas mineradoras pode melhorar eficiência e produtividade (a quantidade de matéria-prima extraída por funcionário), além disso a tecnologia pode melhorar as condições de segurança no trabalho. Esse desenvolvimento tecnológico pode ser facilitado pelas instalações nacionais de investigação e desenvolvimento do setor com outras instituições como universidades e institutos científicos (Brodny; Tutak, 2022b).

O modelo de inovação aberta na mineração pode ser útil para aproveitar as ideias internas, e a capacidade inventiva de outras fontes, como clientes, fornecedores, universidades, institutos de pesquisa ou inventores independentes (Kinnunen *et al.*, 2019). Nesse sentido, a cooperação com o governo, cientistas e gestores industriais combinada com os princípios *Environmental, Social e Governance* (ESG) podem fornecer a base para um desenvolvimento sustentável da indústria de mineração (Brodny; Tutak, 2022a).

A cooperação entre mineradoras e centros de pesquisa ajudam a gerar soluções inovadoras que podem ser rapidamente comercializadas e implementadas (Brodny; Tutak, 2022b). Nesse sentido, o modelo de inovação aberta apresenta uma grande oportunidade para o desenvolvimento de uma economia inovadora baseada no conhecimento, com a participação e integração de várias partes interessadas (Brodny; Tutak, 2022b).

Como exemplo, podemos citar a China, que desenhou uma estratégia *top down* para adoção dos princípios e práticas da EC nas empresas de mineração chinesa. A partir do consenso entre os governos chineses para alcançar uma indústria de mineração mais adequada aos anseios ambientais da sociedade, o governo fez parcerias com as empresas do setor para promover a circularidade. O governo realizou investimentos financeiros, instrumento político comumente utilizado pelo governo das províncias chinesas, para ajudar na administração ambiental reabilitativa de minas (Li *et al.*, 2021). O suporte financeiro do governo é uma prática que pode ajudar na implementação da EC nas empresas de mineração de países emergentes (Li *et al.*, 2021).

Li *et al.* (2021) criticam que os problemas causados pelos desperdícios de recursos e poluição ambiental na exploração e utilização dos recursos minerais são frequentemente atribuídos às empresas, mas raramente refletem nos problemas de gestão governamental, sendo uma questão que merece ser mais estudada. Assim, o apoio governamental no desenvolvimento de novas estratégias e tecnologias poderiam aumentar as taxas de reciclagem e diminuir o desperdício de recursos (Palacios; Rodríguez, 2022).

A digitalização e automação de processos produtivos em minas de carvão, visando a construção de mineração inteligente baseada em soluções identificadas com a Indústria 4.0, pode reduzir as emissões de metano para a atmosfera, melhorar a segurança do trabalho industrial (Brodny; Tutak, 2022a). Desenvolvimento de tecnologias limpas de carvão, incluindo a captura, utilização e armazenamento de carbono, bem como a gestão de resíduos pós-mineração podem gerar emprego para o setor (Brodny; Tutak, 2022a).

Dessa forma, a digitalização pode aumentar a interação fornecedor-cliente, facilitando a cocriação de valor, por exemplo, com um PSS inteligente baseado em internet das coisas. Os fornecedores podem ainda rastrear as condições da máquina e agir para prevenir ou corrigir problemas técnicos (Vargas *et al.*, 2022). O interesse da indústria de mineração em considerar os rejeitos de mineração para recuperar metais de minério, depende do desenvolvimento de novas tecnologias (Kinnunen *et al.*, 2019).

Contudo, o desenvolvimento tecnológico para a valorização de resíduos ainda não foi visto como o *core business* para os *stakeholders* da mineração. A renovação tecnológica na indústria de mineração para atingir objetivos ambientais é considerada lenta (Ruokonen, 2021). Kinnunen *et al.* (2019) explicam que aprovação das tecnologias de recuperação desenvolvidas dependem da aprovação de funcionalidade, lucratividade, valor e usabilidade, para justificar os investimentos intensivos (Kinnunen *et al.*, 2019).

5.3 Método de pesquisa

Para este estudo foi adotado uma abordagem qualitativa, com análises de documentos e estudos de casos. Os estudos de casos foram escolhidos, pois permitem uma compreensão mais aprofundada dos contextos analisados (Osei *et al.*, 2023). As empresas de mineração escolhidas para os estudos de casos estão localizadas no Vale do Jequitinhonha, mais especificamente nos municípios de Itinga e Araçuaí, Estado de Minas Gerais, Brasil. Essa região tem chamado a atenção, pois concentra 8% das reservas do mineral de lítio do mundo o que representa 85% das reservas minerais do Brasil (BRASIL, 2023).

O lítio é um metal considerado essencial para a implantação de tecnologias de baixo carbono (Kumar *et al.*, 2023; Marín *et al.*, 2022; Upadhyay *et al.*, 2021). As duas empresas selecionadas têm em comum as seguintes características: (i) são empresas brasileiras de grande porte que atuam na indústria de mineração; (ii) as duas empresas estão localizadas na região do Vale do Jequitinhonha; (iii) possuem como atividade principal a exploração do espodumênio (mineral que hospeda o lítio).

Após um contato inicial pela rede social profissional LinkedIn, o objetivo da pesquisa foi explicado e as entrevistas foram agendadas. O roteiro de questões utilizado está disponível no Apêndice C. As questões foram divididas em três seções: a) perfil da empresa; b) conhecimento e práticas sobre a economia circular; c) inovação aberta para a economia circular. Além de entrevistas, os relatórios de sustentabilidade das empresas foram consultados e analisados para aprofundar o conhecimento sobre as práticas e projetos orientados para a economia circular.

Essa metodologia de análise dos relatórios de sustentabilidade foi proposta por Upadhyay *et al.* (2021), e consiste em analisar as associações quantitativas e qualitativas com as palavras ‘circular’ nos relatórios de sustentabilidade publicados pelas empresas. Os relatórios de sustentabilidade fornecem uma representação equilibrada e razoável do desempenho de sustentabilidade, incluindo relatos de contribuições positivas e negativas (Upadhyay *et al.*, 2021).

As entrevistas foram realizadas no mês de janeiro de 2024 com a Coordenadora de Meio Ambiente (representante da empresa A) e com a Engenheira de Minas (representante da empresa B). As entrevistadas da empresa A e B têm 16 anos e 7 anos de experiência na

área, respectivamente. Além das entrevistas, os relatórios das empresas, sites na internet e visitas *in loco* foram utilizados como fonte de dados.

5.4 Resultados

5.4.1 Perfil das empresas

Inicialmente, o perfil das empresas participantes dos estudos de casos foi analisado por meio de questões como ano de fundação, tamanho, produtos comercializados, certificações e tipos de minas (Quadro 9). Apesar de atuarem na mesma indústria (mineração de lítio), as duas empresas possuem algumas diferenças. A primeira diferença é em relação ao tempo de atuação. Enquanto a empresa A completará 33 anos de atuação em 2024, a empresa B completará apenas 3 anos de atuação, ou seja, 30 anos de diferença. Outra diferença é em relação aos produtos comercializados. A empresa A é a única empresa do Brasil que possui a tecnologia integrada para operar a lavra subterrânea do pegmatito litinífero, o beneficiamento do concentrado de lítio e a produção dos compostos químicos de alta pureza. Por isso, a empresa A consegue oferecer uma maior variedade de produtos que são utilizados nas indústrias automobilísticas, cerâmica, metalurgia, farmacêutica, papel, vidro, couros e tecidos. A empresa B por não possuir a planta química só produz o concentrado de espodumênio que é destinado à indústria automobilística. Outra diferença é em relação às certificações. A empresa A possui 3 certificações da série ISO, enquanto a empresa B ainda não possui certificação.

Quadro 9 – Perfil das empresas selecionadas para os estudos de caso

Característica	Empresa A	Empresa B
Ano de fundação	1991	2021
Tamanho	Grande (428 funcionários)	Grande (500 funcionários)
Indústria	Mineração	Mineração
Produtos	Concentrado de espodumênio, carbonato de lítio, hidróxido monohidratado de Lítio	Concentrado de espodumênio
Unidades e sede da empresa	Araçuaí (sede), Divisa Alegre e São Paulo	Itinga (sede) e São Paulo
Exportação	Japão, Coréia, China, Índia e Alemanha.	China
Capacidade de Produção anual	45 mil ton/ano de concentrado de espodumênio	15 mil ton/ano de Concentrado de espodumênio
Certificações	- ISO 9001: 2015 - Sistema de Gestão da Qualidade - ISO 14001: 2015 - Sistema de Gestão Ambiental - ISO 45001: 2018 - Sistema de Gestão de Segurança e Saúde Ocupacional	Apenas licenças para funcionamento
Tipo de mina	<i>Sublevel stopping</i>	<i>Open-pit</i>
Vida útil da mina	20 anos (atualizado em julho/2023)	8 anos (atualizado em agosto/2022)

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O tipo de mina das duas empresas também é diferente. A extração do minério na empresa A é feita por meio do método *sublevel stopping* com galerias de até 220 metros de profundidade e 14 quilômetros de extensão. Por causa disso, a empresa A opera com pás carregadeiras comandadas por controle remoto, perfuratrizes Jumbo, Fandril, *software* de sequenciamento de lavra e estudos de acompanhamento geomecânico das aberturas geradas durante a lavra, incluindo monitoramento online microssísmico. A empresa B opera com lavra a céu aberto seguindo quatro etapas: remoção de cobertura vegetal e decapeamento; desmonte; carregamento; e transporte. A remoção de cobertura vegetal consiste na retirada da vegetação do local. O decapeamento remove as camadas superficiais da rocha para atingir a camada do minério. O estéril e o minério são desmontados por explosivos em emulsão bombeado para serem carregados e transportados até a planta de beneficiamento. As minas das empresas A e B estão apresentadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10 - *Sublevel stopping mining* da empresa A



Fonte: Relatório da empresa (2024)
Figura 11 - *Open-pit mining* da empresa B



Fonte: Relatório da empresa (2024)

5.4.2 A economia circular na empresa A

O conceito de economia circular é conhecido pela entrevistada da empresa A. Porém, a palavra ‘economia circular’ não aparece nenhuma vez nos relatórios de responsabilidade ambiental e social mais recentes divulgados pela empresa. Já o conceito de ESG (*environmental, social e governance*) foi enfaticamente citado durante a entrevista como uma forma de alcançar a sustentabilidade nas operações da empresa. Para a entrevistada da empresa A, os projetos do ESG refletem um pensamento que está alinhado com a economia circular. O Quadro 10 apresenta os projetos ambientais e sociais desenvolvidas pela empresa A.

Quadro 10 - Práticas ambientais e sociais desenvolvidas pela empresa A

Dimensão	Projetos
Ambiental	<p>Reaproveitamento de rejeitos: a empresa fez uma parceria com o Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), para pesquisar o uso de rejeitos da mineração como corretivo de solo para pastagens. Outra parceria com a Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) ajuda a desenvolver dois projetos para utilização de rejeito da planta química: O primeiro projeto busca desenvolver materiais cerâmicos (concretos, argamassa, blocos, azulejos hidráulicos), com adição do Silicato de Alumínio. O segundo projeto pesquisa a utilização do rejeito silicato de alumínio como condicionador e fertilizante no cultivo da mamona.</p>
	<p>Preservação da flora e da fauna: A empresa em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (UFV) está identificando os efeitos da mineração de lítio sobre a diversidade e as funções ecossistêmicas desempenhadas pela macrofauna de solo (especificamente formigas, cupins e besouros). Outra parceria com o Instituto Nacional de Florestas desenvolveu um projeto para implantação de viveiro de aclimação e reabilitação de pássaros. O projeto resgata, trata e devolve na natureza os animais apreendidos, principalmente aves, vítimas de tráfico.</p>
	<p>Reflorestamento: a empresa faz periodicamente a revegetação de trechos da mata ciliar que recuaram ou foram levados pelas enchentes. As mudas cultivadas na própria empresa também são plantadas nas margens do Rio Piauí. Para isso, são utilizadas mudas de árvores nativas da região, como o ingazeiro.</p>
	<p>Missão Zero Carbono: o projeto é realizado em parceria com a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e tem o objetivo de zerar as emissões dos gases de efeito estufa na planta industrial de Divisa Alegre, MG.</p>
Social	<p>Educação: a empresa fez uma parceria com o IFNMG da cidade para oferecer um curso de amostrador de minérios na modalidade PROEJA (Programa Nacional de Integração da Educação Profissional com a Educação Básica na Modalidade de Educação de Jovens e Adultos). Metade das vagas (20 vagas) são reservadas para os funcionários da empresa.</p>
	<p>Doação de materiais para organizações filantrópicas: periodicamente a empresa fez a doação de materiais e equipamentos para o hospital, APAE e abrigo para idosos localizados na cidade de Araçuaí, MG.</p>
	<p>Construção de creche: a empresa construiu uma creche para atender gratuitamente a população do município de Divisa Alegre, MG.</p>

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Além das práticas ambientais e sociais realizadas pela empresa A, as informações sobre a gestão da água, energia, emissões, efluentes e rejeitos foram analisadas. De acordo com a entrevistada A (representante da empresa A), a busca pela eficiência da operação de mineração tem motivado os investimentos nas ações 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar). Por exemplo, entrevistada A disse que “hoje nós conseguimos fazer a recirculação de água para mais de 90%”. Isso significa que o consumo da água fluvial segue um planejamento que inclui a recirculação da água em reservatório com capacidade para 12.000 m³, funcionando em circuito fechado. A água é reutilizada no processo produtivo. A água da chuva também é captada por tanques e passa por vários tipos de filtragem antes de ser usada. Para o consumo humano a empresa mantém contrato com a concessionária local. De acordo com o relatório de sustentabilidade, a empresa A conseguiu reduzir seu consumo mensal de água em 3.688 litros.

Sobre o consumo de energia na empresa, a entrevistada A relatou que a energia elétrica consumida nas unidades da empresa é 100% fornecida pelas usinas hidrelétricas e é comprada no mercado livre de energia. A média de consumo no ano de 2022 na unidade de Araçuaí foi de 310 MWh/mês. Já na Unidade de Divisa Alegre o consumo foi de 510 MWh/mês. Diferente da matriz elétrica mundial composta, principalmente, por combustíveis fósseis (fontes não renováveis), como o carvão, gás natural, a matriz elétrica do Brasil é composta por 61,9% de usinas hidrelétricas (Empresa de Pesquisa Energética, 2023). Logo, a maior parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de fontes renováveis.

Sobre o controle de emissões atmosféricas e efluentes, a entrevistada A destacou três ações principais: a) instalação de filtros de mangas e ciclones para controlar a emissão de partículas poluentes na atmosfera durante a liberação de gases industriais e do uso de lavadores de gases para eliminação de materiais particulados e de compostos de moléculas de enxofre e oxigênio (SOx); b) Instalação do sistema Arla 32 (solução usada no gás de escapamento dos veículos com motores a diesel) para controlar a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx), que são nocivos, emitindo vapor de água inofensivos à saúde; c) monitoramento dos efluentes líquidos (industrial e sanitário) nos municípios de Araçuaí e Itinga.

Os efluentes industriais estão localizados em dois pontos: nas áreas de manutenção e mina e também nas bacias de decantação. Os parâmetros analisados são: alumínio, condutividade eletrolítica, lítio total, pH, sulfato e turbidez. Nos efluentes sanitários é

empregado o sistema de fossa séptica, com monitoramento nos pontos de entrada da fossa e da saída do filtro anaeróbio para análise de dois parâmetros na entrada e na saída do tratamento, além da eficiência do tratamento. Essa medida tem evitado a contaminação dos ecossistemas localizados nas áreas onde a empresa opera.

Em relação à tratativa e destinação de estéril e rejeito das operações de mineração de lítio, a entrevistada relatou que a pilha de estéril formada por rocha encaixante biotita-quartzo-xisto, proveniente do desenvolvimento da rampa principal na mina subterrânea, é vendida para ser utilizada em outros mercados como minério de baixo teor. No entanto, esse valor comercial do estéril foi descoberto recentemente em janeiro de 2023, antes o estéril era acumulado em pilhas sem nenhuma utilidade e valor econômico.

A pilha de rejeitos proveniente do rejeito da planta de meio denso, do qual é retirado grande parte do mineral espodumênio para geração do produto concentrado, contém outros minerais que compõem a rocha pegmatito (quartzo, feldspato, muscovita e um pouco de xisto – rocha encaixante). Esses rejeitos possuem várias aplicações de viabilidade econômica, como: pavimentações asfálticas, construções de estruturas de pré-moldados aplicadas em obras de drenagens, calçamentos e pisos; indústrias cerâmicas e vidreiras; e correção do solo. A empresa tem fornecido pavimentações asfálticas (composto de rejeito) para algumas obras na região.

No entanto, a entrevistada da empresa A destacou que o reaproveitamento do rejeito apresenta algumas dificuldades. A principal dificuldade relatada foi em relação à logística. Embora o município de Araçuaí esteja localizado na região sudeste do país, a empresa A encontra-se distante dos grandes centros consumidores de rejeitos de mineração (indústrias de cerâmicas e porcelanatos) dificultando o escoamento do subproduto. Portanto, os altos custos logísticos dificultam a venda do subproduto a um preço competitivo. Uma situação que segundo a entrevistada poderia ser atenuada se houvesse incentivos governamentais voltados ao reaproveitamento de subprodutos.

5.4.3 Inovação aberta para a economia circular na empresa A

Os resultados da entrevista mostram que a empresa A aplica algumas práticas de inovação aberta *inbound*. Por exemplo, a empresa estabelece parcerias com duas instituições de ensino superior (IFNMG e UFVJM) para desenvolver seu projeto de reaproveitamento

de rejeito e estéril. Além disso, a empresa contratou um consultor de P&D externo para ajudar na identificação de oportunidades de mercado mundial de estéril e rejeitos.

Outra prática identificada na operação, foi a compra recente de uma máquina com tecnologia externa para aumentar o teor do lítio e melhorar a eficiência do processo. A parceria da empresa com a FIEMG é uma outra prática de abertura para promover inovação na unidade de Divisa Alegre para zerar as emissões de gases do efeito estufa. Embora as práticas tenham sido implementadas recentemente (últimos dois anos), foi relatado que a empresa não tem percebido problemas com a síndrome *Not Invented Here* (NIH).

Sobre a inovação aberta *outbound*, a entrevistada disse que a empresa não tem o costume de vender ou disponibilizar patentes, *know-how* ou até mesmo fazer contratos de licenciamento de propriedade intelectual em economia circular. Porém, foi destacado que a empresa costuma divulgar conhecimento interno relacionado à economia circular, como as aplicações do processo de reaproveitamento de rejeito e estéril, sem receber recompensas financeiras diretas. As ações realizadas pela empresa podem ser encontradas no relatório de sustentabilidade ambiental e social da empresa publicados no site.

A empresa também disponibiliza no site o ‘fale conosco’ um canal para receber sugestões e reclamações da comunidade sobre a economia circular. No entanto, a entrevistada relatou que raramente a empresa recebe ideias ou sugestões sobre economia circular por esse canal. Assim, os principais *stakeholders* que colaboram nos projetos de economia circular são os colaboradores internos do departamento de P&D, pesquisadores de universidades e representantes de associações industriais.

5.4.4 A economia circular na empresa B

O conceito de economia circular não é conhecido pela entrevistada da empresa B. Os relatórios de responsabilidade ambiental e social da empresa também não citam o termo ‘economia circular’ nenhuma vez. No entanto, os projetos de ESG (*environmental, social e governance*) foram enfaticamente citadas durante a entrevista. Essas práticas estão apresentadas no Quadro 11.

Quadro 11 – Projetos ambientais e sociais desenvolvidas pela empresa B

Dimensão	Projeto
Ambiental	Reaproveitamento de rejeito de mineração: o rejeito (empilhados a seco e reciclável) tem sido estudado para uso na construção civil. Devido à tecnologia <i>Dense Media Separation</i> , os rejeitos do processo de produção podem ser empilhados a seco, em vez de serem armazenados em barragem de rejeitos. Os rejeitos não são perigosos, e atualmente são utilizados por outras indústrias – diminuindo o desperdício e impacto ambiental.
	Reflorestamento: o projeto de reflorestamento prevê a plantação de árvores de 5.000 espécies e, ao mesmo tempo, recuperar mais de 1.200 árvores de áreas degradadas. As áreas do município do Jequitinhonha (região da empresa) já foram compradas para fazer o reflorestamento. Jequitinhonha é um município que fica mais distante da empresa, e por isso o preço do terreno é menor. Com as descobertas do lítio na região Itinga e Araçuaí, os preços dos terrenos aumentaram, inviabilizando o reflorestamento de áreas próximas à empresa.
Social	Microcrédito para empreendedores: o microcrédito é um projeto que busca oferecer crédito para mulheres empreendedoras que moram na região, como forma de estimular o desenvolvimento socioeconômico.
	Doação de materiais para a comunidade local: a empresa fez a doação de 3.000 caixas d'água para moradores localizados nas proximidades da empresa.
	Ação de combate à violência: o projeto foi planejado em parceria com Tribunal de Justiça do estado de Minas Gerais, para combater os índices de violência doméstica contra mulheres na região do Vale do Jequitinhonha.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Além das práticas ambientais e sociais, as informações sobre a gestão da água, energia, emissões, efluentes e rejeitos também foram analisadas. A empresa B também faz a reciclagem da água, no qual 100% da água utilizada na mina é reciclada (perdendo apenas 10% por evaporação), o que significa uma redução na captação de água do Rio Jequitinhonha. A estação de tratamento de água da empresa possibilita que a água tratada seja usada para diminuir a poeira e umidificar as vias. Embora a prática de reciclagem da água proporcione uma captação mínima do Rio Jequitinhonha, os dados de outorga e consumo mensal de água não foram fornecidos.

Sobre o consumo de energia elétrica, foi relatado pela entrevistada B que as operações da empresa utilizam 100% energia hidrelétrica fornecida pela Usina Hidrelétrica de Irapé, localizada a 50 km da mina. A empresa B ainda não possui ações para monitoramento de emissões e efluentes.

Sobre o estéril e o rejeito de mineração, a entrevistada informou que o estéril é utilizado como brita para pavimentação de estradas da comunidade ao entorno da empresa. Além disso, a empresa B vem investido em estudos sobre o rejeito para transformá-los em bloquetes (pavimentação de estradas). No entanto, os bloquetes estão na fase de teste e ainda não foram comercializados. Mesmo, com a apresentação de resultados positivos da pesquisa com os bloquetes, a entrevistada relatou dificuldades de recursos para expandir o projeto. De acordo com a entrevistada “a alta administração acha muito lindo os bloquetes, mas para liberar os recursos é muito difícil”.

A principal motivação citada durante a entrevista para o reaproveitamento do rejeito é desocupação de espaços. “Os grandes estoques de rejeitos ocupam muito espaço, além de envolverem custos com mão de obra, máquinas para preparação do solo armazenagem e movimentação” (Entrevistada B).

5.4.5 Inovação aberta para a economia circular na empresa B

Sobre as práticas de inovação aberta *inbound* na empresa B, a entrevistada revelou uma parceria que está sendo construída com a *Startup Innovation* para melhorar o planejamento e dimensionamento da mina. O objetivo dessa parceria é tornar a operação de beneficiamento do lítio mais eficiente. A pesquisa sobre o reaproveitamento de rejeito de mineração realizada na empresa B não envolve parcerias com outros *stakeholders*, sendo desenvolvida apenas com a participação de colaboradores internos.

Mesmo sem um departamento de P&D, a empresa B não tem o costume comprar ou contratar serviços de P&D ou de engenharia de parceiros externos. Além disso, a empresa não vende ou disponibiliza patentes, *know-how*, ou faz contratos de licenciamento de propriedade intelectual. Uma justificativa para isso é a operação recente da empresa que iniciou suas atividades em 2022. Esse fato sugere ausência da síndrome NIH explicitado na fala “não temos problema com a síndrome NIH, pelo contrário, como iniciamos nossas operações recentemente, os colaboradores são muito receptivos a ideias externas para melhorar o processo” (Entrevistada B).

5.5 Discussões e implicações

Nota-se inicialmente que as empresas analisadas demonstraram pouco conhecimento sobre a economia circular (EC), com nenhuma citação do termo nos seus relatórios de sustentabilidade. As ações do ESG foram mais ressaltadas do que as práticas da EC. Embora haja uma proximidade entre ESG e EC, esse resultado sugere que a EC ainda não é amplamente adotada pelas empresas de mineração de lítio no Brasil. Esse resultado converge com outros estudos na área (Upadhyay *et al.*, 2021; Gedam *et al.*, 2021; Brodny; Tutak, 2022b; Marinina *et al.*, 2022).

Verificou-se também que as parcerias com partes interessadas na produção sustentável podem auxiliar o P&D interno em direção à inovação para a EC. Os resultados deste estudo indicam que as práticas de inovação aberta *inbound* têm apoiado as empresas nos projetos de gestão ambiental e reutilização do rejeito e estéril. As práticas mais comuns envolvem a colaboração com universidades e *startup*, além de contratos com consultores de P&D externo. Esse resultado está de acordo com Kinnunen *et al.* (2019) e Brodny e Tutak (2022b), que também destacaram a colaboração com outras fontes de conhecimento para promover uma indústria de mineração mais sustentável.

A colaboração com a comunidade local, no entanto, não foi destacada nos projetos de inovação para a sustentabilidade das empresas pesquisadas. Isso diverge das observações de César (2019) que apontam a aproximação das mineradoras com as comunidades locais como relevante para a obtenção da licença social para operar, uma vez que, o fornecimento de informações para a população local sobre os projetos ajuda no engajamento e na sensibilização dos *stakeholders* para defender as causas ambientais e sociais.

Em relação ao governo, também não foram encontradas iniciativas governamentais que apoiassem as práticas de EC nas empresas analisadas. Esse resultado diverge do comportamento do governo chinês, por exemplo, que adotou uma estratégia *top-down* para promover a EC no setor de mineração de carvão (Li *et al.*, 2021). No Brasil, as iniciativas governamentais poderiam adotar uma estratégia *top-down* com mudanças na legislação e incentivos financeiros aos projetos de inovação tecnológica para melhorar a eficiência dos processos de exploração e beneficiamento mineral, além de reduzir as taxas de impostos para as empresas que transformam os resíduos minerais em subprodutos. Osei *et al.* (2024) mostram que os *stakeholders* regulatórios (reguladores governamentais, associações comerciais e organizações ambientais) podem pressionar as mineradoras em direção à práticas de EC, o que pode ocorrer por meio de políticas adotadas para proteger o meio ambiente.

Outro achado desse estudo apresenta que a empresa com mais tempo de atuação no mercado possui maior facilidade para colaborar com parceiros externos no desenvolvimento de projetos ambientais e sociais, do que a empresa mais nova. Embora os resultados obtidos não possam ser generalizados, estudos indicam que a idade da empresa possa estar relacionada à experiência e ao aprendizado da firma, sendo comumente utilizada em estudos empíricos de inovação (Idrissia *et al.*, 2012; Teirlinck; Poelmans, 2012). A falta de experiência e a escassez de recursos das empresas mais jovens podem dificultar a criação de inovações verdes (Asad *et al.*, 2024). Além disso, a baixa compreensão das expectativas dos *stakeholders* também pode comprometer o desenvolvimento de políticas organizacionais alinhada com a colaboração (Muhammad *et al.*, 2024).

Por fim, esta pesquisa não encontrou evidências de práticas de inovação aberta *outbound* nas empresas analisadas. De acordo com Scaliza *et al.* (2022) e Bogers *et al.* (2021), esse resultado pode ser explicado pela ausência de uma ‘tradição interna de P&D’ entre as empresas brasileiras, sendo mais comum a absorção de tecnologia e conhecimento do ambiente externo (via *inbound*) do que a disponibilização de tecnologias e conhecimento interno (via *outbound*). No entanto, com a inovação aberta *outbound*, as empresas poderiam explorar outros caminhos para comercializar seus conhecimentos ou tecnologias do que apenas focar nos caminhos internos para o mercado (Spithoven *et al.*, 2010). As práticas que poderiam ser adotadas são por exemplo, licenciamento de tecnologias, venda de patentes e criação de *spin-offs* (Chesbrough, 2003, Popa *et al.*, 2017).

5.6 Considerações finais

Os resultados deste estudo estendem a compreensão sobre a EC na indústria de mineração, mostrando como as mineradoras estão superando os desafios de inovação para a EC. Embora, o interesse sobre a EC tenha aumentado nos últimos anos, até o momento pouco se sabe sobre o papel da inovação aberta para apoiar as práticas de EC nas indústrias, e como seus *stakeholders* estão engajados para promover a transição. Por isso, o objetivo deste estudo foi identificar como as práticas de inovação aberta podem ajudar na transição para uma EC na indústria de mineração.

Os resultados mostraram que o conceito de EC ainda é pouco conhecido no setor. No entanto, o reaproveitamento de resíduos das atividades de mineração do lítio (rejeito e estéril) encontram-se em estágios avançados de testes nas empresas analisadas. Por exemplo,

em uma das empresas foi possível notar que os resíduos estão sendo transformados em subprodutos e comercializados para abastecer outras indústrias estimulando a simbiose industrial, evoluindo de uma implementação no nível micro para um nível meso da EC.

Além disso, a inovação aberta por meio das práticas de *inbound*, como a colaboração com *stakeholders* (universidades e *startups*) e contratação de P&D externo têm apoiado as empresas na transição para a EC. Identificar as práticas e estratégias que auxiliem a indústria de mineração a se tornar mais sustentável traz implicações práticas gerenciais importantes para o setor equilibrar o desenvolvimento econômico e ambiental.

Nesse sentido, os gestores das minas podem estabelecer colaborações e parcerias com *stakeholders* estratégicos para complementar o P&D interno, e obter maior eficiência dos processos, frente à exigência de maior pureza nos materiais que são extraídos. Além disso, os formuladores de políticas públicas podem se concentrar em medidas de governança e revisão da política legislativa para reduzir as barreiras da implementação da EC na indústria de mineração (Gedam *et al.*, 2021)

Finalmente, as limitações deste estudo envolvem a impossibilidade de generalização dos resultados, uma vez que o estudo de caso foi realizado apenas com duas empresas. Além disso, apenas um representante de cada empresa foi consultado para a entrevista. Portanto, estudos futuros podem ser realizados com a participação de mais empresas de mineração para investigar como a inovação aberta pode promover a economia circular. Além disso, a relação entre inovação aberta e economia circular pode ser investigada sob o ponto de vista do desempenho em inovação verde.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais contribuições teóricas, implicações práticas, limitações e direções futuras de pesquisas que relacionam a inovação aberta e a economia circular (EC).

A EC tem sido considerada uma abordagem alternativa à economia linear para reduzir os impactos ambientais dos sistemas de produção e consumo, sem prejudicar os aspectos econômicos e sociais. No entanto, apesar do interesse crescente de gestores, acadêmicos e formuladores políticos pela EC, especialmente na última década, poucos avanços foram identificados na sua implementação (Diaz; Baumgartner, 2024; De Jesus; Mendonça, 2018). Como os esforços de inovação são fundamentais na implementação da EC, o modelo de inovação aberta pode ser adotado para acelerar a transição da economia linear para circular. Desta forma, o objetivo geral desta tese foi analisar como a inovação aberta pode contribuir e impactar a implementação da EC.

Para alcançar o objetivo proposto, foi realizada uma pesquisa multimétodo com três etapas, a qual envolveu a coleta de dados sobre o tema utilizando três diferentes métodos de pesquisa: uma revisão sistemática da literatura, uma pesquisa quantitativa *survey* e dois estudos de casos. Para cada etapa foi elaborado um artigo. O artigo 1 apresenta e analisa os resultados de uma revisão sistemática da literatura para investigar a relação entre inovação aberta e EC, no qual foram selecionados 24 artigos para uma análise bibliométrica e de conteúdo. Em seguida, o artigo 2 realiza uma pesquisa quantitativa *survey* para testar a significância das práticas da inovação aberta na implementação da EC, no contexto das tecnologias da I4.0 e das capacidades absorptivas. E por fim, o artigo 3 realiza uma pesquisa qualitativa com a aplicação de dois estudos de casos, para aprofundar como a inovação aberta poderia contribuir para adoção da EC na indústria de mineração. Em suma, esta tese fornece resultados para um panorama que analisa as contribuições da inovação aberta na implementação da EC nas organizações. A seguir serão apresentadas as contribuições teóricas deste estudo.

6.1 Contribuições teóricas

Os resultados da tese contribuem para o avanço do conhecimento teórico em gestão de operações sustentáveis, principalmente, porque apresenta o primeiro estudo teórico que

investiga a relação entre inovação aberta e EC (artigo 1). Além disso, o artigo 2, no melhor do conhecimento da pesquisadora, é o primeiro estudo que verifica empiricamente, em um mesmo modelo de pesquisa, as relações entre inovação aberta, EC, tecnologias da I4.0 sob a ótica da teoria das capacidades absorptivas. De modo geral, as principais contribuições teóricas da tese estão apresentadas a seguir:

- **A relação entre inovação aberta e EC é recente na literatura:** a revisão sistemática realizada no artigo 1 mostrou que a maioria dos trabalhos que analisa esses temas em conjunto utiliza métodos qualitativos e foram publicados a partir de 2016, evidenciando que a investigação sobre o tema é recente e se encontra em fase exploratória. Os estudos publicados sobre o tema encontram-se principalmente na Europa e Ásia. Estudos pioneiros abordaram a inovação aberta como estratégia para envolver múltiplos *stakeholders* interessados na transformação ambiental e social do espaço compartilhado (Gorissen *et al.*, 2016; Gupta *et al.*; 2016). Posteriormente, os estudos sobre a inovação aberta sustentável (Bogers *et al.*, 2020) e inovação colaborativa (Brown *et al.*, 2020; Brown *et al.*, 2021) apoiaram as discussões sobre o papel da inovação aberta na EC. Em suma, esta tese fornece um quadro teórico das pesquisas que relacionam inovação aberta e EC, sugerindo uma série de implicações e oportunidades de pesquisas futuras (*gaps*) para acadêmicos e pesquisadores que buscam explorar a área. Estudos recentes (publicados após o artigo 1) já têm se apropriado desses *gaps* ao publicar estudos que revisam os temas de inovação aberta, EC e sustentabilidade (Ahmad *et al.*, 2024), e relatam o papel dos *stakeholders* na adoção da inovação aberta em cadeia de suprimentos e ecossistemas circulares (Perotti *et al.*, 2024).

- **A colaboração com *stakeholders* e abordagem de cocriação são as principais práticas de inovação aberta observadas nos estudos que buscam a transição para uma EC.** Os resultados desta tese encaminham para a ideia de que a EC não pode ser implementada isoladamente. Embora, estudos anteriores já indicassem a importância da colaboração interorganizacional para facilitar a transição para uma EC (Mishra *et al.*, 2019; Brown *et al.*, 2020; Köhler *et al.*, 2022), poucos estudos abordavam a relação entre inovação aberta e EC. Dessa forma, os resultados do artigo 1 identificaram que as principais práticas envolvendo a inovação aberta no contexto da EC foram a colaboração com *stakeholders* e a abordagem de cocriação. De fato, a colaboração interorganizacional tem apresentado um efeito positivo na implementação das práticas da EC (Schöggl *et al.*, 2022), pois possibilita o compartilhamento de recursos, experiências, *know how*, alinhando objetivos para ampliar as capacidades de inovação em direção à circularidade (Perotti *et al.*, 2024). A abordagem

de cocriação tem sido citada principalmente nos estágios iniciais dos projetos de inovação para estabelecer a confiança e o compromisso necessários entre as partes interessadas (Dokter *et al.*, 2023; Cong *et al.*, 2020). Na indústria de mineração, os resultados do artigo 3 mostram que as empresas mineradoras também têm realizado colaborações principalmente com universidades, instituições de pesquisa, *startups* e consultores externos de P&D para desenvolver projetos de reaproveitamento de rejeito e estéril de minério. As redes de colaboração na indústria de mineração têm ajudado a melhorar a eficiência dos recursos, ao mesmo tempo que, melhoram a imagem e a reputação das empresas mineradoras (Brodny; Tutak, 2022a). No contexto industrial mais abrangente, os resultados do artigo 2 corroboram com os achados do artigo 1 e 3, ao indicarem a colaboração com outras empresas, *startups*, governos regionais, ONGs, e também, as colaborações com universidades e centros de pesquisas como as principais práticas de inovação aberta realizadas pelas empresas brasileiras para desenvolver projetos de inovação circular.

- Papel das tecnologias da Indústria 4.0 na EC orientada pela inovação aberta:

As tecnologias Indústria 4.0 (I4.0) têm apoiado os modelos de negócio da EC, pois facilitam a comunicação e troca de informações na cadeia de suprimentos. A colaboração vertical, entre os membros da cadeia de suprimentos, pode ser suportada pela infraestrutura tecnológica oferecida pelas tecnologias da I4.0 na promoção da EC (Gebhardt *et al.*, 2021). Nesse contexto, o artigo 2 investigou o papel das tecnologias da I4.0 na relação entre inovação aberta e EC. Os resultados mostraram que a adoção das práticas de inovação aberta tem um efeito positivo na implementação da EC e na adoção das tecnologias da I4.0 (H1 e H2 suportadas). Esses resultados estão de acordo com estudos anteriores que usam a inovação aberta para explorar novas tecnologias, principalmente aquelas relacionadas à I4.0 (Mubarak; Petraite; 2020; Rocha *et al.*, 2022; Lepore *et al.*, 2023). Além disso, as práticas de inovação aberta podem fortalecer as relações de confiança entre *stakeholders* e favorecer a cocriação de soluções digitais (Mubarak; Petraite; 2020; Rocha *et al.*, 2022). Para Santoro *et al.* (2018), os sistemas de gestão de conhecimento baseado em IoT permitem a colaboração e troca de conhecimento entre departamentos internos, ao mesmo tempo que cria espaços virtuais com parceiros externos para o compartilhamento de informações e conhecimento por meio de plataformas digitais. A tecnologia *blockchain* pode aumentar a segurança nas transações da rede, ajudando a superar os desafios de confiabilidade entre os parceiros, por meio de suas características de rastreabilidade de produtos compartilhados (Dev *et al.*, 2020). A computação em nuvem e os sistemas ciber físicos apoiam a inovação dos modelos de

negócio baseado na virtualização, pois oferece condições para a desmaterialização (Rejeb *et al.*, 2022). Na manufatura aditiva, diversos testes estão sendo realizados com materiais alternativos ao plástico virgem, como por exemplo, fibras de madeira reciclada, plástico reciclado e resíduos de casca de mexilhão, para reduzir os custos e melhorar a sustentabilidade dos produtos (Tavares *et al.*, 2023). Em consonância com esses resultados, o artigo 2 mostrou que as tecnologias da I4.0 mediam a relação entre inovação aberta e EC. Isso significa que as tecnologias da I4.0 possibilitam que as práticas de inovação aberta se alinhem aos objetivos da EC. Isso é possível porque, dentre outras funções, as tecnologias digitais ajudam a identificar os proprietários de conhecimento e parceiros de colaboração que são mais apropriados dentro de empresas ou organizações distantes geograficamente ou com recursos limitados (Enkel; Bogers; Chesbrough, 2020). Na mineração, as tecnologias da Indústria 4.0 não foram o foco da pesquisa, entretanto, os resultados dos estudos de caso indicaram que, de um modo geral, a tecnologia tem ajudado a reduzir a poluição ambiental no controle das emissões (empresa A), além de permitir o empilhamento a seco para a reutilização do rejeito mineral (empresa B). Estes exemplos reforçam a ideia de como a tecnologia ajuda a promover o princípio da eliminação de resíduos e poluição em direção a um sistema econômico mais circular (EMF, 2017).

- **Moderação das capacidades absorptivas para implementar a EC:** embora a literatura tenha indicado uma sinergia entre as capacidades absorptivas (CA) na implementação da EC orientada pelas práticas de inovação aberta (Marrucci *et al.*, 2022) e também pelas tecnologias da Indústria 4.0 (Pessot *et al.*, 2022), este estudo não encontrou evidências que comprovasse o efeito moderador significativo das CA na amostra selecionada. Uma possível explicação poderia estar relacionada com os custos e a dificuldade em direcionar o conhecimento externo para a implementação de estratégias de EC (Kang *et al.*, 2022; Ibarra-Cisneros *et al.*, 2020). Nesse sentido, estudos futuros poderiam investigar o efeito das CA potencial e realizada, medindo separadamente as dimensões para identificar possíveis lacunas na implementação da EC. Além disso, seria interessante verificar o efeito das CA em contextos mais críticos para a gestão do conhecimento, como em empresas de *software*, tecnologia e consultorias.

6.2 Implicações práticas

Para os profissionais e formuladores de políticas são apresentadas as implicações práticas da tese. Primeiro, a Figura 7 apresenta as implicações potenciais que foram identificadas na relação entre inovação aberta e EC, como por exemplo, a satisfação e conscientização dos clientes, desenvolvimento de redes de simbiose industrial e soluções para problemas ambientais. No nível micro, os gestores e profissionais podem utilizar da colaboração e cocriação com *stakeholders* para aumentar a participação e conscientização dos clientes para os princípios da EC, buscando por exemplo, maior aceitação dos produtos remanufaturados ou reciclados no mercado. No nível meso, as redes de simbiose industrial podem se organizar para usar as plataformas de compartilhamento apoiadas por tecnologias digitais da I4.0, como IoT, *big data* e computação em nuvem. No nível macro, os governantes e formuladores de políticas podem cocriar soluções para problemas ambientais de regiões e cidades, em conjunto com cidadãos locais e grupos científicos por meio de laboratórios vivos (*living labs*).

Segundo, as informações da Tabela 8 fornecem um conjunto de decisões que ajudam os profissionais a avançarem na transição para a EC, sugerindo o papel significativo da adoção de práticas de inovação aberta e tecnologias da I4.0 na implementação da EC. As principais práticas identificadas para melhorar a implementação da EC são projetos de P&D em conjunto com outras empresas como ONGs, *startups* e governos regionais, e também a parceria da empresa com universidades, escolas técnicas ou instituições de pesquisa. No caso das tecnologias da I4.0, além do efeito direto, este estudo sugere a mediação das tecnologias da I4.0 na relação entre inovação aberta e EC. Neste sentido, as tecnologias como *big data*, sistemas ciber físicos e IoT podem ser usadas, preferencialmente em conjunto, para melhorar a conectividade e rastreabilidade dos recursos e produtos na cadeia de suprimentos.

As empresas que adotam uma abordagem aberta de inovação estão mais propensas a desenvolver a capacidade de inovação, por meio da criação, exploração, absorção e integração de conhecimento externo e interno. A gestão dos fluxos de entrada (via *inbound*) ou de saída (via *outbound*) realizada pela inovação aberta pode oferecer novas oportunidades de mercados com a adoção das tecnologias da I4.0. Estas tecnologias inseridas no ambiente de fabricação podem apoiar a transição para a EC, ao proporcionam um ambiente de trabalho mais seguro, enxuto e conectado. Por exemplo, as tecnologias de realidade virtual e

simulações podem testar desenhos industriais antes de serem implementados, reduzindo os riscos para os colaboradores. O uso da manufatura aditiva possibilita a economia de recursos com uso de materiais alternativos e recicláveis. Os sistemas ciber físicos integrados às redes IoT com suporte *big data* podem apoiar a tomada de decisão por meio de dados disponibilizados em tempo real.

Além disso, o ambiente colaborativo, proposto pela inovação aberta, estimula as parcerias com universidades, centros de pesquisas, *startups* e consultorias especializadas. Estas parcerias são úteis, pois proporcionam o acesso a conhecimentos e recursos complementares que ajudam nos projetos de inovações tecnológicas das empresas. Além disso, as colaborações com grupos científicos representam uma oportunidade de obter treinamento técnico para os colaboradores que trabalham em projetos de inovação. Adotar a inovação aberta pode apoiar, portanto, não somente o acesso a conhecimentos, mas também, o acesso a equipamentos, materiais, laboratórios, equipes especializadas que juntos podem acelerar a inovação interna e expandir as capacidades tecnológicas da empresa.

Terceiro, esta tese mostrou que a implementação da EC no setor da mineração ainda está em fase inicial. A EC para desenvolver novos produtos a partir dos resíduos minerais atua em pequena escala, com investimento e mercado limitado. A natureza complexa das estruturas de produção e as especificidades dos produtos das mineradoras demandam um estudo aprofundado dos processos organizacionais e tecnológicos da mineração e do ciclo de vida dos produtos. Nesse sentido, os gestores podem aplicar as práticas de inovação aberta (*via inbound*) para desenvolver, mais rápido e com menor custo, as iniciativas para ampliar a implementação das práticas de EC no setor de mineração, tais como, a reciclagem, a eletrificação, a recuperação de metais preciosos e o reaproveitamento de rejeitos minerais. A parceria com as universidades e centros de pesquisas podem fornecer as tecnologias adaptadas ao contexto geológico brasileiro que minimizem os impactos ambientais. Os formuladores de políticas públicas podem estimular a inovação tecnológica no setor privado, por meio de incentivos fiscais, bolsas de pesquisas e redes de cooperação envolvendo indústria, centros de P&D e financiamento público. Além disso, as empresas de mineração, especialmente as de lítio, podem ser organizadas em redes de simbiose industrial com as empresas de materiais de construção civil para encontrar oportunidades de reaproveitamento para os resíduos de rejeitos ou estéril.

6.3 Limitações e direções futuras

Esta tese buscou preencher as lacunas de pesquisas existentes entre os conceitos de inovação aberta e EC, porém, reconhece-se que os resultados devem ser vistos com restrições metodológicas. Em relação aos métodos aqui aplicados, a seleção de palavras-chave específicas e a escolha de apenas duas bases de dados (*Scopus* e *Web of Science*) para o acesso aos artigos revisados no artigo 1 são as limitações reconhecidas. Para obter a amostra final de artigos foi realizado uma sistematização de filtragem e leitura, o que pode ter adicionado um nível de subjetividade nas análises. Além disso, novos estudos são publicados diariamente, visto que o campo de pesquisa ainda se encontra em um estado emergente. Por isso, pesquisas futuras, podem continuar e fazer avançar a análise teórica sobre a relação entre inovação aberta e EC para acompanhar as novas teorias e conceitos associados à essa relação em diferentes contextos.

Na pesquisa quantitativa, a escolha dos constructos do modelo de pesquisa também pode ser uma fonte de limitação metodológica. Pois, todos os construtos considerados foram de primeira ordem e reflexivos. Estudos futuros podem analisar separadamente o impacto dos fluxos de inovação aberta *inbound* e *outbound* na implementação da EC, e analisar como a colaboração com *startups*, universidades e fornecedores geram fluxos de inovação aberta *outbound* (licenciamentos externos, *spin-offs*, por exemplo) para implementar a EC. Implicações das colaborações com *startups* e governos podem ser analisadas, principalmente, em pequenas e médias empresas que buscam acelerar a transição para a EC. Estudos futuros podem ainda analisar as dimensões da variedade e amplitude da inovação aberta para a implementação da EC. Sobre a teoria organizacional, outras teorias podem ser testadas no modelo quantitativo, como por exemplo, a visão baseada em recursos e a teoria do trabalho de fronteira. Isso porque, essas teorias ajudariam a explicar o processo de revisão de parcerias entre as empresas e seus *stakeholders* com base nas competências e habilidades apresentadas pelos recursos.

Na etapa dos estudos de casos, a escolha de apenas um setor foi a principal limitação dos resultados da pesquisa. Dessa forma, estudos de casos futuros podem considerar outros setores em diferentes contextos. Além disso, pesquisas futuras podem investigar como a turbulência tecnológica e o nível de maturidade tecnológica das empresas influenciam a relação entre inovação aberta e EC. Pesquisas empíricas, podem investigar como as ações

de ESG ajudam as empresas na implementação da EC, e qual o impacto dessas ações no desempenho organizacional. Por fim, pesquisas futuras podem identificar e descrever os facilitadores e componentes organizacionais necessários para proporcionar um ambiente de inovação aberto e direcionado para a implementação da EC.

REFERÊNCIAS

ABOELMAGED, M.; HASHEM, G. Absorptive capacity and green innovation adoption in SMEs: The mediating effects of sustainable organisational capabilities. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 853-863, 2019.

AGYEMANG, M. *et al.* Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 971-994. doi:10.1108/MD-11-2018-1178, 2019.

AHMAD, S.; DADDI, T.; IRALDO, F. Integration of open innovation, circularity and sustainability: A systematic mapping of connections, analysis of indicators and future prospects. **Creativity and Innovation Management**, 2024.

AJZEN, I. The theory of planned behavior. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 50, p. 179–211, 1991.

AKBARI, M.; HOPKINS, J. L. Digital technologies as enablers of supply chain sustainability in an emerging economy. **Operations Management Research**, v. 15, n. 3, p. 689-710, 2022.

AL-KHATIB, A. W. The impact of dynamic capabilities on circular economy: the mediating effect of the industrial Internet of things. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 34, n. 6, p. 873-895, 2023.

ALLAL-CHÉRIF, O.; CLIMENT, J. C.; BERENGUER, K. J. U. Born to be sustainable: How to combine strategic disruption, open innovation, and process digitization to create a sustainable business. **Journal of Business Research**, v. 154, p. 113379, 2023.

AMANN, Marie *et al.* Mitigating not-invented-here and not-sold-here problems: The role of corporate innovation hubs. **Technovation**, v. 111, p. 102377, 2022.

AMENTA, L. *et al.* Managing the transition towards circular metabolism: Living labs as a co-creation approach. **Urban Planning**, v. 4, n. 3, p. 5-18, 2019.

AMENTA, L.; VAN TIMMEREN, A. Beyond wastescapes: Towards circular landscapes. Addressing the spatial dimension of circularity through the regeneration of wastescapes. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4740, 2018.

ANDERSEN, M. S. Governance by green taxes: implementing clean water policies in Europe 1970–1990. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 2, n. 1, p. 39-63, 1999.

ANM. Agência Nacional de Mineração. Exploração Mineral. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/exploracao-mineral>. Acesso em: 17 de out. de 2023.

ARCIDIACONO, F.; ANCARANI, A.; DI MAURO, C.; SCHUPP, F. The role of absorptive capacity in the adoption of Smart Manufacturing. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 42, n. 6, p. 773-796, 2022.

- ARCINIEGAS, G. *et al.* A geodesign decision support environment for integrating management of resource flows in spatial planning. **Urban Planning**, v. 4, n. 3, p. 32-51, 2019.
- ARROYABE, J. F.; ARRANZ, N.; SCHUMANN, M.; ARROYABE, M. F. The development of CE business models in firms: The role of circular economy capabilities. **Technovation**, v. 106, p. 102292, 2021.
- ASAD, M.; ALEDEINAT, M.; MAJALI, T. E.; ALMAJALI, D. A.; SHRAFAT, F. D. Mediating role of green innovation and moderating role of resource acquisition with firm age between green entrepreneurial orientation and performance of entrepreneurial firms. **Cogent Business & Management**, v. 11, n. 1, p. 2291850, 2024.
- ATTALAH, I.; NYLUND, P. A.; BREM, A. Who captures value from hackathons? Innovation contests with collective intelligence tools bridging creativity and coupled open innovation. **Creativity and Innovation Management**, v. 32, n. 2, p. 266-280, 2023.
- BAG, S.; YADAV, G.; DHAMIJA, P.; KATARIA, K. K. Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125233, 2021a.
- BAG, S.; YADAV, G.; WOOD, L. C.; DHAMIJA, P.; JOSHI, S. Industry 4.0 and the circular economy: Resource melioration in logistics. **Resources Policy**, v. 68, p. 101776, 2020.
- BAG, S.; GUPTA, S.; KUMAR, S. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal of Production Economics**, v. 231, p. 107844, 2021b.
- BAKKER, C. A. *et al.* Understanding and managing product lifetimes in support of a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, 279, 2021
- BARNEY, J. Firm resources and sustained competitive advantage. **Journal of Management**, v. 17, n. 1, p. 99-120, 1991.
- BEHM, J. E.; WAITE, B. R.; HSIEH, S. T.; HELMUS, M. R. Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research. **BMC ecology**, v. 18, p. 1-13, 2018.
- BHIMANI, H.; MENTION, A. L.; BARLATIER, P. J. Social media and innovation: A systematic literature review and future research directions. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 144, p. 251-269, 2019.
- BHUPENDRA, K. V.; SANGLE, S. Benchmarking absorptive capacity for sustainability: a study of Indian firms. **Benchmarking: an International Journal**, v. 29, n. 3, p. 835-855, 2021.
- BIANCHI, M. *et al.* Organizing for inbound open innovation: how external consultants and a dedicated R&D unit influence product innovation performance. **Journal of Product Innovation Management**, v. 33, n. 4, p. 492-510, 2016.

BIANCHINI, A.; ROSSI, J.; PELLEGRINI, M. Overcoming the main barriers of circular economy implementation through a new visualization tool for circular business models. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6614, 2019.

BOCKEN, N. M. *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy, **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BOCKEN, N. M. P. *et al.* Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 476–482, 2017.

BOGERS, M.; BURCHARTH, A.; CHESBROUGH, H. Open innovation in Brazil: Exploring opportunities and challenges. **International Journal of Innovation**, v. 7. n. 2, p. 178-191, 2019.

BOGERS, M.; CHESBROUGH, H.; STRAND, R. Sustainable open innovation to address a grand challenge: lessons from Carlsberg and the Green Fiber Bottle, **British Food Journal**, v. 122, n. 5, p. 1505-1517, 2020.

BOGERS, M.; CHESBROUGH, H.; MOEDAS, C. Open innovation: Research, practices, and policies. **California Management Review**, v. 60, n. 2, p. 5-16, 2018.

BRASIL. Lei no. 12.305 de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial Da União. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

BRESSANELLI, G.; PERONA M.; SACCANI, N. Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 23, p. 7395-7422, 2019.

BRODNY, J.; TUTAK, M. Challenges of the polish coal mining industry on its way to innovative and sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134061, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134061>

BRODNY, J.; TUTAK, M. The use of the open innovation concept to develop a method to improve safety during the mining production process: A case Study of the integration of university and industry. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 8, n. 2, p. 75, 2022b. <https://doi.org/10.3390/joitmc8020075>

BROWN, P., VON DANIELS, C., BOCKEN, N. M. P., BALKENENDE, A. R. A process model for collaboration in circular oriented innovation. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125499, 2021.

BROWN, P.; BOCKEN, N.; BALKENENDE, R. How do companies collaborate for circular oriented innovation? **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1648, 2020.

CAMILLERI, M. A.; TROISE, C.; STRAZZULLO, S.; BRESCIANI, S. Creating shared value through open innovation approaches: Opportunities and challenges for corporate sustainability. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 7, p. 4485-4502, 2023.

CAPPELLARO, F. *et al.* Smart Community Co-Creation: The Case of Centocello Project. **International Journal of Sustainable Energy Planning and Management**, v. 24, p. 155-162, 2019.

CARLILE, P. R. A pragmatic view of knowledge and boundaries: Boundary objects in new product development. **Organization Science**, v. 13, n. 4, p. 442-455, 2002.

CARRASCO-CARVAJAL, O.; CASTILLO-VERGARA, M.; GARCÍA-PÉREZ-DE-LEMA, D. Measuring open innovation in SMEs: an overview of current research. **Review of Managerial Science**, v. 17, n. 2, p. 397-442, 2023.

CESAR, S. Earning a social license to operate in mining: A case study from Peru. **Resources Policy**, v. 64, p. 101482, 2019.

CHAMMAS, G. *et al.* Transdisciplinary interventions for environmental sustainability. **Waste Management**, v. 107, p. 159-171, 2020.

CHEN, C. Guidance on the Conceptual Design of Sustainable Product–Service Systems. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2452, 2018.

CHESBROUGH, H. **Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology**. Boston, MA: Harvard Business School Press, 2003a.

CHESBROUGH, H. The logic of open innovation: managing intellectual property. **California Management Review**, v. 45, n. 3, p. 33-58, 2003b.

CHESBROUGH, H.; BOGERS, M. **Explicating open innovation: Clarifying an emerging paradigm for understanding innovation**. New Frontiers in Open Innovation. Oxford: Oxford University Press, Forthcoming, p. 3-28, 2014.

CHESBROUGH, H. **Open Innovation**. Harvard University Press, Cambridge, MA, 2003.

CHESBROUGH, H.; CROWTHER, A. K. Beyond high tech: early adopters of open innovation in other industries. **R&D Management**, v. 36, n. 3, p. 229-236, 2006.

CHESBROUGH, H.; VANHAVERBEKE, W.; WEST, J. **Open Innovation: Researching a New Paradigm**. Oxford University Press, Oxford, 2006.

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

CHIN, W.W. The partial least squares approach to structural equation modeling. **Modern methods for business research**, v. 295, n. 2, p. 295-336, 1998.

CIRCLE ECONOMY. The Circularity Gap Report, 2021. Available on: <https://www.circularity-gap.world/2021> (Accessed July 2023).

CLAUSEN, T. H. External knowledge sourcing from innovation cooperation and the role of absorptive capacity: empirical evidence from Norway and Sweden. **Technology Analysis Strategic Management**, v. 25, n. 1, p. 57-70, 2013.

COHEN, W. M.; LEVINTHAL, D. A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. **Administrative science quarterly**, p. 128-152, 1990.

COM. European Commission. Towards a circular economy: a zero waste.

CONG, J.; CHEN, C.; ZHENG, P. Design entropy theory: A new design methodology for smart PSS development. **Advanced Engineering Informatics**, v. 45, p. 101124, 2020.

CRICELLI, L.; GRECO, M.; GRIMALDI, M. An investigation on the effect of inter-organizational collaboration on reverse logistics. **International Journal of Production Economics**, v. 240, p. 108216, 2021.

DAS, Ankita; KONIETZKO, Jan; BOCKEN, Nancy. How do companies measure and forecast environmental impacts when experimenting with circular business models? **Sustainable Production and Consumption**, v. 29, p. 273-285, 2022.

DE JESUS, A. *et al.* Eco-innovation pathways to a circular economy: Envisioning priorities through a Delphi approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1494-1513, 2019.

DE JESUS, A.; MENDONÇA, S. Lost in transition? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. **Ecological economics**, v. 145, p. 75-89, 2018.

DALENOGARE, L. S.; BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.

DE MARCHI, V.; DI MARIA, E. Achieving circular economy via the adoption of Industry 4.0 technologies: A Knowledge management perspective. *Knowledge Management and Industry 4.0: New Paradigms for Value Creation*, p. 163-178, 2020.

DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. *et al.* Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, n. 1, p. 273-286, 2018.

DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; CHOI, T. M.; LATAN, H. 'Better together': evidence on the joint adoption of circular economy and industry 4.0 technologies. **International Journal of Production Economics**, v. 252, p. 108581, 2022.

DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; LATAN, H.; JABBOUR, C. J. C.; SELES, B. M. R. P. Does applying a circular business model lead to organizational resilience? Mediating effects of industry 4.0 and customers integration. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 194, p. 122672, 2023.

DE SOUSA JABBOUR, A. B.L.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, p. 273-286, 2018.

DEMESTICHAS, K.; DASKALAKIS, E. Information and communication technology solutions for the circular economy. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7272, 2020.

DIANI, M.; COLLEDANI, M. Cyber-Physical Systems formalization in de-and remanufacturing and application to size reduction stage. **Procedia CIRP**, v. 91, p. 741-746, 2020.

- DIAZ, A.; BAUMGARTNER, R. J. A managerial approach to product planning for a circular economy: Strategy implementation and evaluation support. **Journal of Cleaner Production**, v. 442, p. 140829, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140829>
- DING, S.; TUKKER, A.; WARD, H. Opportunities and risks of internet of things (IoT) technologies for circular business models: A literature review. **Journal of Environmental Management**, v. 336, p. 117662, 2023.
- DOKTER, Giliam *et al.* The role of prototyping and co-creation in circular economy-oriented innovation: A longitudinal case study in the kitchen industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 39, p. 230-243, 2023.
- EISENREICH, A.; FULLER, J.; STUCHTEY, M. Open circular innovation: How companies can develop circular innovations in collaboration with stakeholders. **Sustainability**, v. 13, n. 23, p. 13456, 2021.
- EMF. Ellen MacArthur Foundation, 2017. Circular economy - UK, USA, Europe, Asia & South America. Available at The Ellen MacArthur Foundation, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/> (2017), Accessed agosto 2020.
- EMF. Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 2, n. 1, p. 23-44, 2013.
- EMF. Ellen MacArthur Foundation. Towards a Circular Economy: business rationale for an accelerated transition. 2015. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf Acesso em: 27 de janeiro de 2021.
- ENKEL, E.; GASSMANN, O.; CHESBROUGH, H. Open R&D and open innovation: exploring the phenomenon. **R&D Management**, v. 39, n. 4, p. 311-316, 2009.
- EUROPEAN COMMISSION (2014), Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe 398 Final, European Commission Foundation, COM, Bruxelas.
- EUROPEAN COMMISSION, 2015. Circular Economy Package: questions & answers. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_15_6204. Acesso em: 12 abril 2024.
- EUROPEAN COMMISSION, 2020a. European Commission. A New Industrial Strategy for Europe, 2020.
- EUROPEAN COMMISSION, 2020b. European Commission. Circular Economy Action Plan, 2020.
- FAISAL, M. N. Role of Industry 4.0 in circular supply chain management: a mixed-method analysis. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 36, n. 1, p. 303-322, 2023.
- FERREIRA, A.C.; FUSO-NERINI, F. A framework for implementing and tracking circular economy in cities: The case of Porto. **Sustainability**, v. 11, n. 6, p. 1813, 2019.

FORNELL, C.G.; LARCKER, D.F. Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. **Journal of Marketing Research**, v. 18, n. 1, p. 39-50, 1981.

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

GARCÍA-QUEVEDO, J.; JOVÉ-LLOPIS, E.; MARTÍNEZ-ROS, E. Barriers to the circular economy in European small and medium-sized firms. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 6, p. 2450-2464, 2020.

GASSMANN, O; ENKEL, E. Towards a theory of open innovation: three core process archetypes. **R&D Management Conference**, v. 6, n. 0, p. 1–18, 2004.

GAUR, A.; KUMAR, M. A systematic approach to conducting review studies: An assessment of content analysis in 25 years of IB research. **Journal of World Business**, v. 53, n. 2, p. 280-289, 2018.

GEDAM, V. V.; RAUT, R. D.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; AGRAWAL, N. Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. **Resources policy**, v. 74, p. 102279, 2021.

GEISSDOERFER, M. *et al.* The Circular Economy—A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GEISSDOERFER, M.; VLADIMIROVA, D.; EVANS, S. Sustainable business model innovation: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 401-416, 2018.

GHAITHAN, A. M.; ALSHAMMAKHI, Y.; MOHAMMED, A.; MAZHER, K. M. Integrated impact of circular economy, industry 4.0, and lean manufacturing on sustainability performance of manufacturing firms. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 6, p. 5119, 2023.

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.

GHOSH, S. K. Biomass bio-waste supply chain sustainability for bio-energy and bio-fuel production. **Procedia Environmental Sciences**, v. 31, p. 31-39, 2016.

GORISSEN, L.; VRANCKEN, K.; MANSHOVEN, S. Transition thinking and business model innovation—towards a transformative business model and new role for the reuse centers of Limburg, Belgium. **Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 112, 2016.

GRIN, J.; ROTMANS, J.; SCHOT, J. **Transitions to sustainable development: new directions in the study of long term transformative change**. Routledge, 2010.

GUPTA, A. K. *et al.* Theory of open inclusive innovation for reciprocal, responsive and respectful outcomes: Coping creatively with climatic and institutional risks. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 2, n. 3, p. 16, 2016.

- HAIR, J. F. *et al.* **When to use and how to report the results of PLS-SEM.** *European Business Review*, 2019.
- HAIR, J. F.; RISHER, J. J.; SARSTEDT, M.; RINGLE, C. M. When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, v. 31, n. 1, p. 2-24, 2019.
- HAIR, J.F., HULT, G.T.M., RINGLE, C.M., SARSTEDT, M. **A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)**, 2nd edn. Sage Publications, Thousand Oaks, 2017.
- HAKANSSON, H. **Industrial Technological Development: A Network.** Approach: Kent, Croom Helm Ltd, 1987
- HALLIOUI, A.; HERROU, B.; SANTOS, R. S.; KATINA, P. F.; EGBUE, O. Systems-based approach to contemporary business management: An enabler of business sustainability in a context of industry 4.0, circular economy, competitiveness and diverse stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, p. 133819, 2022.
- HENRIQUEZ, R.; MUNOZ-VILLAMIZAR, A.; SANTOS, J. Key factors in operational excellence for Industry 4.0: an empirical study and maturity model in emerging countries. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 34, n. 5, p. 771-792, 2023.
- HENSELER, J.; HUBONA, G.S.; RAY, P.A. Using PLS path modeling in new technology research: updated guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, v. 116, n. 1, p. 2-20, 2016.
- HENSELER, J.; RINGLE, C. M.; SINKOVICS, R. R. **The use of partial least squares path modeling in international marketing.** In *New challenges to international marketing.* Emerald Group Publishing Limited, 2009.
- HETTIARACHCHI, B. D.; SEURING, S.; BRANDENBURG, M. Industry 4.0-driven operations and supply chains for the circular economy: a bibliometric analysis. *Operations Management Research*, v. 15, n. 3, p. 858-878, 2022.
- HIZAM-HANAFIAH, M.; SOOMRO, M. A. The situation of technology companies in industry 4.0 and the open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, v. 7, n. 1, p. 34, 2021.
- HO, O. T. K.; GAJANAYAKE, A.; IYER-RANIGA, U. Transitioning to a state-wide circular economy: Major stakeholder interviews. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, v. 19, p. 200163, 2023.
- HOOSAIN, M. S.; PAUL, B. S.; RAMAKRISHNA, S. The impact of 4ir digital technologies and circular thinking on the United Nations sustainable development goals. *Sustainability*, v. 12, n. 23, p. 10143, 2020.
- HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Z. Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, v. 146, p. 119-132, 2019.

HUANG, F.; RICE, J. The role of absorptive capacity in facilitating "Open innovation" outcomes: A study of Australian SMEs in the manufacturing sector. **International Journal of Innovation Management**, v. 13, n. 02, p. 201-220, 2009.

HUO, B. The impact of supply chain integration on company performance: an organizational capability perspective. **Supply Chain Management: An International Journal**, 2012.

HUSSINGER, K.; WASTYN, A. In search for the not-invented-here syndrome: the role of knowledge sources and firm success. **R&D Management**, v. 46, n. S3, p. 945-957, 2016.

HUTTON, S.; DEMIR, R.; ELDRIDGE, S. How does open innovation contribute to the firm's dynamic capabilities? **Technovation**, v. 106, p. 102288, 2021.

IBARRA-CISNEROS, M. A.; DEL ROSARIO, D. F. M.; HERNÁNDEZ-PERLINES, F. Strategic orientations, firm performance and the moderating effect of absorptive capacity. **Journal of Strategy and Management**, v. 14, n. 4, p. 582-611, 2021.

IBGE. Census Numbers 2020a. <https://censo2020.ibge.gov.br/sobre/numeros-do-censo.html>

IBGE. Indicadores. 2020b. <https://www.ibge.gov.br/indicadores>

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investimentos-para-us-50-bi-ate-2027/#:~:text=Produ%C3%A7%C3%A3o%20e%20faturamento,%E2%80%93%20uma%20queda%20de%2026%25>. Acesso em: 16 de out. de 2023.

IDRISSIA, M.O.; AMARAA, N.; LANDRYA, R. SMEs' degree of openness: the case of manufacturing industries. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 7, n. 1, p. 186-210, 2012.

ISMAIL, M.; BELLO-PINTADO, A.; GARCÍA-MARCO, T.; LAZZAROTTI, V. Enhancing open innovation: Managing not invented here syndrome in collaborative projects. **Technovation**, v. 128, p. 102879, 2023.

JABBOUR, C. J. C. Environmental training in organisations: From a literature review to a framework for future research. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 74, p. 144-155, 2013.

JABBOUR, C. J. C. *et al.* Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. **Science of the Total Environment**, v. 725, p. 138177, 2020.

JABBOUR, C. J. C. *et al.* First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies. **Resources Policy**, v. 66, p. 101596, 2020.

JABBOUR, C. J. C.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. Green human resource management and green supply chain management: Linking two emerging agendas. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1824-1833, 2016.

JAEGER, B.; UPADHYAY, A. Understanding barriers to circular economy: cases from the manufacturing industry. **Journal of Enterprise Information Management**, 2020.

JAMES, A. M.; REITSMA, L.; AFTAB, M. Bridging the double-gap in circularity. Addressing the intention-behaviour disparity in fashion. **The Design Journal**, v. 22, n. sup1, p. 901-914, 2019.

JANTUNEN, A. Knowledge-processing capabilities and innovative performance: an empirical study. **European Journal of Innovation Management**, v. 8, n. 3, p. 336-349, 2005.

JENATABADI, H. S.; RADZI, C. W. J. W. M.; ABDMANAP, N.; ABDULLAH, N. A. Factors that boost the technological capability of Malaysian food manufacturing industry. **Sustainability**, v. 15, n. 8, p. 6365, 2023.

JESUS, A. *et al.* Eco-innovation pathways to a circular economy: Envisioning priorities through a Delphi approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1494-1513, 2019.

JESUS, A., ANTUNES, P., SANTOS, R., & MENDONÇA, S. Eco-innovation pathways to a circular economy: Envisioning priorities through a Delphi approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1494-1513, 2019.

JESUS, G. M. K., JUGEND, D., PAES, L. A. B., SIQUEIRA, R. M., & LEANDRIN, M. A. Barriers to the adoption of the circular economy in the Brazilian sugarcane ethanol sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, p. 1-15, 2023.

JESUS, G. M. K.; JUGEND, D. How can open innovation contribute to circular economy adoption? Insights from a literature review. **European Journal of Innovation Management**, v. 26, n. 1, p. 65-98, 2023.

JUGEND, D.; JABBOUR, C. J. C.; SCALIZA, J. A. A.; ROCHA, R. S.; JUNIOR, J. A. G.; LATAN, H.; SALGADO, M. H. Relationships among open innovation, innovative performance, government support and firm size: Comparing Brazilian firms embracing different levels of radicalism in innovation. **Technovation**, v. 74, p. 54-65, 2018.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A. Analysing the role of Industry 4.0 technologies and circular economy practices in improving sustainable performance in Indian manufacturing organisations. **Production planning & control**, v. 34, n. 10, p. 887-901, 2023.

KANG, Y.; ZHAO, C.; BATTISTI, M. Organizational learning in SMEs' internationalization: A moderated mediating effect of absorptive capacity. **Long Range Planning**, v. 55, n. 4, p. 102220, 2022.

KAPOOR, R. *et al.* Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: A research outlook. **Bioresource technology**, v. 304, p. 123036, 2020.

KATZ, R.; ALLEN, T.J. Investigating the Not Invented Here (NIH) syndrome: A look at the performance, tenure, and communication patterns of 50 R & D Project Groups. **R&D Management**, v. 12, n. 1, p. 7-20, 1982.

KHAN, O.; DADDI, T.; IRALDO, F. Microfoundations of dynamic capabilities: Insights from circular economy business cases. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 3, p. 1479-1493, 2020.

KHAN, O.; DADDI, T.; IRALDO, F. Sensing, seizing, and reconfiguring: Key capabilities and organizational routines for circular economy implementation. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125565, 2021.

KHAN, S. A. R.; RAZZAQ, A.; YU, Z.; MILLER, S. Retracted: Industry 4.0 and circular economy practices: A new era business strategies for environmental sustainability. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 4001-4014, 2021.

KINNUNEN, P. H. M.; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 153-160, 2019.

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

KIRCHHERR, J.; YANG, N. H. N.; SCHULZE-SPÜNTRUP, F.; HEERINK, M. J.; HARTLEY, K. Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 194, p. 107001, 2023.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KOCK, N. Common method bias in PLS-SEM: A full collinearity assessment approach. **International Journal of e-Collaboration**, v. 11, n. 4, p. 1-10, 2015.

KÖHLER, J.; SÖNNICHSEN, S. D.; BESKE-JANSEN, P. Towards a collaboration framework for circular economy: The role of dynamic capabilities and open innovation. **Business Strategy and the Environment**, 2022. doi:10.1002/bse.3000

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

KPMG. Indústria 4.0 é rota obrigatória para inovação e competitividade das empresas, 2021. <https://kpmg.com/br/pt/home/insights/2022/04/industria-40-e-rota-obrigatoria-inovacao-competitividade.html#:~:text=Ind%C3%BAstria%204.0%20%C3%A9%20rota%20obrigat%C3%B3ria%20para%20inova%C3%A7%C3%A3o%20e,foi%20estruturada%20em%20cap%C3%ADtulos%2C%20que%20ser%C3%A3o%20divulgados%20gradativamente>
Acesso em: julho de 2023.

KRISTENSEN, H. S.; MOSGAARD, M. A. A review of micro level indicators for a circular economy—moving away from the three dimensions of sustainability? **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118531, 2020.

- KUMAR, P.; SINGH, R. K.; KUMAR, V. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105215, 2021.
- KUMAR, V. *et al.* Circular economy in the manufacturing sector: Benefits, opportunities and barriers, **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 1067-1086, 2019.
- LARDO, A., MANCINI, D., PAOLONI, N.; RUSSO, G. The perspective of capability providers in creating a sustainable I4. 0 environment. *Management Decision*, v. 58, n. 8, p. 1759-1777, 2020.
- LASKURAIN-ITURBE, I. *et al.* Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, p. 128944, 2021.
- LAURSEN, K.; SALTER, A. Open for innovation: the role of openness in explaining innovation performance among UK manufacturing firms. **Strategic Management Journal**, v. 27, n. 2, p. 131-150, 2006.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LEI, Z.; CAI, S.; CUI, L.; WU, L.; LIU, Y. How do different Industry 4.0 technologies support certain Circular Economy practices? **Industrial Management & Data Systems**, v. 123, n. 4, p. 1220-1251, 2023.
- LEISING, E.; QUIST, J.; BOCKEN, N. Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. **Journal of Cleaner production**, v. 176, p. 976-989, 2018.
- LEMOS, M. G.; VALENTE, T. M.; MARINHO REIS, A. P.; FERREIRA FONSECA, R. M.; GUABIROBA, F.; DA MATA FILHO, J. G.; ...; REBELO DIÓRIO, G. Adding value to mine waste through recovery Au, Sb, and As: the case of auriferous tailings in the Iron Quadrangle, Brazil. **Minerals**, v. 13, n. 7, p. 863, 2023.
- LEPORE, D.; VECCIOLINI, C.; MICOZZI, A.; SPIGARELLI, F. Developing technological capabilities for Industry 4.0 adoption: An analysis of the role of inbound open innovation in small and medium-sized enterprises. **Creativity and Innovation Management**, v. 32, n. 2, p. 249-265, 2023.
- LEUBE, M.; WALCHER, D. Designing for the next (Circular) Economy. An appeal to renew the Curricula of Design Schools. **The Design Journal**, v. 20, n. sup1, p. S492-S501, 2017.
- LI, Y.; ZHANG, Y.; PAN, A.; HAN, M.; VEGLIANTI, E. Carbon emission reduction effects of industrial robot applications: Heterogeneity characteristics and influencing mechanisms. **Technology in Society**, v. 70, p. 102034, 2022.
- LICHTENTHALER, U.; LICHTENTHALER, E. A capability-based framework for open innovation: Complementing absorptive capacity. **Journal of management studies**, v. 46, n. 8, p. 1315-1338, 2009.

LIPPOLIS, S.; RUGGIERI, A.; LEOPIZZI, R. Open innovation for sustainable transition: The case of Enel “open power”. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 7, p. 4202-4216, 2023.

LIU, Y.; XU, X. Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 139, n. 3, 2017.

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

MA, S. *et al.* Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123155, 2020.

MA, L.; GHORBANI, Y.; KONGAR-SYURYUN, C. B.; KHAYRUTDINOV, M. M.; KLYUEV, R. V.; PETENKO, A.; BRIGIDA, V. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, p. 200224, 2024.

MARDANI, A.; WEBER, G. W.; KHAN, S. A. R. Guest editorial: Editorial for special issue on the role of big data on the transition to circular economy and sustainable operations management. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 35, n. 4/5, p. 949-954, 2022.

MARRUCCI, L., DADDI, T. AND IRALDO, F. The contribution of green human resource management to the circular economy and performance of environmental certified organisations. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128859, 2021b.

MARRUCCI, L.; IRALDO, F.; DADDI, T. Investigating the management challenges of the EU Ecolabel through multi-stakeholder surveys. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, p. 575-590, 2021a.

MARRUCCI, L.; DADDI, T.; IRALDO, F. The circular economy, environmental performance and environmental management systems: the role of absorptive capacity. **Journal of Knowledge Management**, v. 26, n. 8, p. 2107-2132, 2022.

MDIC. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Estatísticas de Comércio Exterior – Balança Comercial parcial: janeiro a junho de 2023. Disponível em: https://balanca.economia.gov.br/balanca/pg_principal_bc/principais_resultados.html
Acesso em: junho de 2023

MERLI, R.; PREZIOSI, M.; ACAMPORA, A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 703-722, 2018.

MIGNACCA, B.; GRECO, M.; STRAZZULLO, S.; VELENTURF, A. Creativity and innovation management to pursue circular economy. **Creativity and Innovation Management**, 2022.

MISHRA, J. L.; CHIWENGA, K. D.; ALI, K. Collaboration as an enabler for circular economy: A case study of a developing country. **Management Decision**, 2019.

- MISHRA, R.; SINGH, R. K.; GOVINDAN, K. Barriers to the adoption of circular economy practices in micro, small and medium enterprises: instrument development, measurement and validation. **Journal of Cleaner Production**, v. 351, p. 131389, 2022.
- MODGIL, S. *et al.* Big data-enabled large-scale group decision making for circular economy: An emerging market context. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 166, p. 120607, 2021.
- MONTAG, L. Circular economy and supply chains: definitions, conceptualizations, and research agenda of the circular supply chain framework. **Circular Economy and Sustainability**, v. 3, n. 1, p. 35-75, 2023.
- MORSELETTO, P. Targets for a circular economy. **Resources, conservation and recycling**, v. 153, p. 104553, 2020.
- MUBARAK, M. F.; TIWARI, S.; PETRAITE, M.; MUBARIK, M.; RAJA MOHD RASI, R. Z. How Industry 4.0 technologies and open innovation can improve green innovation performance? **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 32, n. 5, p. 1007-1022, 2021.
- MUHAMMAD, Sawedi *et al.* Corporate social responsibility programs in mining areas: insights form stakeholder groups in Indonesia. **Cogent Social Sciences**, v. 10, n. 1, p. 2357675, 2024.
- MÜLLER, J. M.; BULIGA, O.; VOIGT, K. I. The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of industry 4.0 business Models-A comparison between SMEs and large enterprises. **European Management Journal**, v. 39, n. 3, p. 333-343, 2021.
- 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, p. 369-380, 2017.
- NAQSHBANDI, M. M.; JASIMUDDIN, S. M. The linkage between open innovation, absorptive capacity and managerial ties: A cross-country perspective. **Journal of Innovation & Knowledge**, v. 7, n. 2, p. 100167, 2022.
- NAQSHBANDI, M. M.; JASIMUDDIN, S. M. Knowledge-oriented leadership and open innovation: Role of knowledge management capability in France-based multinationals. **International Business Review**, v. 27, n. 3, p. 701-713, 2018.
- CNI. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019. Pesquisa sobre economia circular na indústria brasileira. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2019/9/pesquisa-sobre-economia-circular-na-industria-brasileira/>. Acesso em: julho de 2023.
- NAVEED, N.; WATANABE, C.; NEITTAANMÄKI, P. Co-evolutionary coupling leads a way to a novel concept of RD-Lessons from digitalized bioeconomy. **Technology in Society**, v. 60, p. 101220, 2020.

NIETO, M. J.; SANTAMARIA, L.; BAMMENS, Y. Digitalization as a facilitator of open innovation: Are family firms different? **Technovation**, v. 128, p. 102854, 2023.

OSEI, V., BAI, C., ASANTE-DARKO, D.; QUAYSON, M. Evaluating the barriers and drivers of adopting circular economy for improving sustainability in the mining industry. **Resources Policy**, v. 86, p. 104168, 2023.

OSEI, V.; ASANTE-DARKO, D.; QUAYSON, M. Stakeholder Pressure, Circular Economy Practices, and Sustainability Performance: The Moderating Effect of Ecological Innovation Capabilities. **Circular Economy and Sustainability**, p. 1-32, 2024.

OVUAKPORIE, O. D. *et al.* Differential moderating effects of strategic and operational reconfiguration on the relationship between open innovation practices and innovation performance. **Research Policy**, v. 50, n. 1, p. 104146, 2021.

PALACIOS, L. D. L. T.; ESPÍ RODRÍGUEZ, J. A.; MARTINEZ, P. R. Economic, technological and sustainability-based qualifications with reference to Europe: Iberia's new metal mining projects. **Mineral Economics**, v. 34, n. 2, p. 277-304, 2021.

PARIDA, V. *et al.* Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. **Journal of business research**, v. 101, p. 715-725, 2019.

PARIDA, V.; WINCENT, J. Why and how to compete through sustainability: a review and outline of trends influencing firm and network-level transformation. **International Entrepreneurship and Management Journal**, v. 15, n. 1, p. 1-19, 2019.

PATALA, S.; SALMI, A.; BOCKEN, N. Intermediation dilemmas in facilitated industrial symbiosis. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121093, 2020.

PATWA, N. *et al.* Towards a circular economy: An emerging economies context. **Journal of business research**, v. 122, p. 725-735, 2021.

PAYÁN-SÁNCHEZ, B. *et al.* Open Innovation for Sustainability or Not: Literature Reviews of Global Research Trends. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1136, 2021.

PENCARELLI, T. The digital revolution in the travel and tourism industry. **Information Technology & Tourism**, v. 22, n. 3, p. 455-476, 2020.

PENG, B.; WANG, Y.; ZAHID, S.; WEI, G.; ELAHI, E. Platform ecological circle for cold chain logistics enterprises: the value co-creation analysis. **Industrial Management Data Systems**, 2020.

PEROTTI, F. A.; BARGONI, A.; DE BERNARDI, P.; ROZSA, Z. Fostering circular economy through open innovation: Insights from multiple case study. **Business Ethics, the Environment & Responsibility**, 2024.

PETRUZZELLI, A.M.; MURGIA, G.; PARMENTOLA, A. How can open innovation support SMEs in the adoption of I4. 0 technologies? An empirical analysis. **R&D Management**, v. 52, n. 4, p. 615-632, 2022.

PIERONI, M. P.; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 198-216, 2019.

PINHEIRO, M. A. P.; JUGEND, D.; LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B.; CHIAPPETTA JABBOUR, C. J.; LATAN, H. Circular economy-based new products and company performance: The role of stakeholders and Industry 4.0 technologies. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 1, p. 483-499, 2022.

POPA, S.; SOTO-ACOSTA, P.; MARTINEZ-CONESA, I. Antecedents, moderators, and outcomes of innovation climate and open innovation: An empirical study in SMEs. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 118, p. 134-142, 2017.

POURESMAIELI, M.; ATAEI, M.; QARAHASANLOU, A. N.; BARABADI, A. Integration of renewable energy and sustainable development with strategic planning in the mining industry. **Results in Engineering**, v. 20, p. 101412, 2023.

PRESTON, C. C.; COLMAN, A. M. Optimal number of response categories in rating scales: reliability, validity, discriminating power, and respondent preferences. **Acta psychologica**, v. 104, n. 1, p. 1-15, 2000.

PRIETO-SANDOVAL, V. *et al.* Key strategies, resources, and capabilities for implementing circular economy in industrial small and medium enterprises. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 1473-1484, 2019.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0 model for circular economy and cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123853, 2020.

RANTA, V.; AARIKKA-STENROOS, L.; VÄISÄNEN, J. M. Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy—Multiple case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105155, 2021.

REIKE, D.; VERMEULEN, W. J. V.; WITJES, S. The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 246-264, 2018.

REINALES, D.; ZAMBRANA-VASQUEZ, D.; SAEZ-DE-GUINOA, A. Social Life Cycle Assessment of Product Value Chains Under a Circular Economy Approach: A Case Study in the Plastic Packaging Sector. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 6671, 2020.

REJEB, A.; SUHAIZA, Z.; REJEB, K.; SEURING, S.; TREIBLMAIER, H. The Internet of Things and the circular economy: A systematic literature review and research agenda. **Journal of Cleaner Production**, v. 350, p. 131439, 2022.

REPAIR. Resource Management in Peri-Urban Areas: going beyond urban metabolism. D 5.1 Pulls Handbook. Naples: Unina, 2017.

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

RIZOS, V.; BRYHN, J. Implementation of circular economy approaches in the electrical and electronic equipment (EEE) sector: Barriers, enablers and policy insights. **Journal of Cleaner Production**, v. 338, p. 130617, 2022.

RIZOS, V.; BEHRENS, A.; VAN DER GAAST, W.; HOFMAN, A.; IOANNU, A.; KAFYEKE, T.; FLAMOS, A.; RINALDI, R.; PAPADELIS, S.; HIRSCHNITZ-GABERS, M.; *et al.* Implementation of circular economy business models by small and medium-sized enterprises (SMEs): Barriers and enablers. **Sustainability**, v. 8, n. 11, p. 1212, 2016.

ROCHA, C. *et al.* Product-Service development for circular economy and sustainability course. Product-Service development for circular economy and sustainability course, 2020.

ROCHA, C. F.; QUANDT, C. O.; DESCHAMPS, F.; PHILBIN, S. R&D collaboration strategies for industry 4.0 implementation: A case study in Brazil. **Journal of Engineering and Technology Management**, v. 63, p. 101675, 2022.

ROSARIO-BELTRÉ, A. J.; SÁNCHEZ-ESPAÑA, J.; RODRÍGUEZ-GÓMEZ, V.; FERNÁNDEZ-NARANJO, F. J.; BELLIDO-MARTÍN, E.; ADÁNEZ-SANJUÁN, P.; ARRANZ-GONZÁLEZ, J. C. Critical Raw Materials recovery potential from Spanish mine wastes: A national-scale preliminary assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 407, p. 137163, 2023.

ROSZKOWSKA-MENKES, M. T. Integrating strategic CSR and open innovation. Towards a conceptual framework. **Social Responsibility Journal**, v. 14, n. 4, p. 950-966, 2018.

SÁ, T.; FERREIRA, J. M.; JAYANTILAL, S. Open innovation strategy: A systematic literature review. **European Journal of Innovation Management**, 2023.

SAGAN, CARL. **The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark** 1st ed. New York: Ballantine. p. 213, 1997.

SANTOS, G. J.; BERNARDO, H. P. **Globocentrismo, reprimarização e neoeextrativismo reflexões sobre a mineração no Brasil contemporâneo**. 1 ed. Juiz de Fora. Editora UFJF, 2021. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/editora/wp-content/uploads/sites/113/2021/12/GLOBOCENTRISMO-2.pdf> Acesso em 16 de jun de 2024.

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

SAUCEDO-MARTÍNEZ, J. A.; PÉREZ-LARA, M.; MARMOLEJO-SAUCEDO, J. A.; SALAIS-FIERRO, T. E.; VASANT, P. Industry 4.0 framework for management and operations: a review. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 9, p. 789-801, 2018.

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

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

SCALIZA, J. A. A.; JUGEND, D.; JABBOUR, C. J. C.; LATAN, H.; ARMELLINI, F., TWIGG, D.; ANDRADE, D. F. Relationships among organizational culture, open innovation, innovative ecosystems, and performance of firms: Evidence from an emerging economy context. **Journal of Business Research**, v. 140, p. 264-279, 2022.

SCARPELLINI, S. *et al.* Environmental management capabilities for a “circular eco-innovation”. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 5, p. 1850-1864, 2020.

SCHÖGGL, J. P.; RUSCH, M.; STUMPF, L.; BAUMGARTNER, R. J. Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector. **Sustainable Production and Consumption**, v. 35, p. 401-420, 2023.

SCHÖGGL, J. P.; STUMPF, L.; BAUMGARTNER, R. J. The narrative of sustainability and circular economy-A longitudinal review of two decades of research. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 163, p. 105073, 2020.

SCHUH, G.; POTENTE, T.; WESCH-POTENTE, C.; WEBER, A. R.; PROTE, J. P. Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. **Procedia Cirp**, v. 19, p. 51-56, 2014.

SCHRODER, P. *et al.* Advancing sustainable consumption and production in cities-A transdisciplinary research and stakeholder engagement framework to address consumption-based emissions and impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 114-125, 2019.

SEBRAE, 2013. Critérios de classificação de empresas: Ei - Me – Epp. Disponível em: <http://Www.Sebrae-Sc.Com.Br/Leis/Default.Asp?Vcdtexto=4154>. Acesso em: março de 2021.

SHAHBAZI, S. *et al.* Material efficiency in manufacturing: Swedish evidence on potential, barriers and strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 438-450, 2016.

SHAMAH, R. A. E; ELSSAWABI, S. M. Facing the open innovation gap: measuring and building open innovation in supply chains. **Journal of Modelling in Management**, v. 10, n. 1, p. 50-75, 2015.

SIDDIK, A. B.; YONG, L.; RAHMAN, M. N. The role of Fintech in circular economy practices to improve sustainability performance: a two-staged SEM-ANN approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 49, p. 107465-107486, 2023.

SINGH, R. K. *et al.* Applications of information and communication technology for sustainable growth of SMEs in India food industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 147, p. 10-18, 2019.

SOLTANI, A. *et al.* Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review. **Waste Management**, v. 35, p. 318-328, 2015.

SOROKA, A.; LIU, Y.; HAN, L.; HALEEM, M. S. Big data driven customer insights for SMEs in redistributed manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 692-697, 2017.

SOUSA JABBOUR, A. B. L. *et al.* Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, n. 1, p. 273-286, 2018.

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

SPITHOVEN, A.; CLARYSSE, B.; KNOCKAERT, M. Building absorptive capacity to organise inbound open innovation in traditional industries. **Technovation**, v. 31, n. 1, p. 10-21, 2011.

SPITHOVEN, A.; VANHAVERBEKE, W.; ROIJAKKERS, N. Open innovation practices in SMEs and large enterprises. **Small business economics**, v. 41, p. 537-562, 2013.

STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 435-438, 2016.

STRAZZULLO, S.; CRICELLI, L.; GRIMALDI, M.; FERRUZZI, G. Connecting the path between open innovation and industry 4.0: a review of the literature. **IEEE Transactions on Engineering Management**, 2022.

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

SUCHEK, N.; FERNANDES, C. I.; KRAUS, S.; FILSER, M.; SJÖGRÉN, H. Innovation and the circular economy: A systematic literature review. **Business Strategy and the Environment**, 2021.

SULISTA, S.; ROSYID, F. A.; WIBOWO, A. P. Turning waste into profit: Circular economic optimization of quartz sand from tin mining and processing. **Sustainable Production and Consumption**, v. 39, p. 53-62, 2023.

TAKACS, F.; BRUNNER, D.; FRANKENBERGER, K. Barriers to a circular economy in small-and medium-sized enterprises and their integration in a sustainable strategic management framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, p. 132227, 2022.

TAVARES, T. M.; GANGA, G. M. D.; GODINHO FILHO, M.; RODRIGUES, V. P. The benefits and barriers of additive manufacturing for circular economy: A framework proposal. **Sustainable Production and Consumption**, 2023.

TEECE, D. J. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. **Strategic management journal**, v. 28, n. 13, p. 1319-1350, 2007.

TEECE, D. J.; PISANO, G.; SCHUEN, A. Dynamic capabilities and strategic management. **Strategic Management Journal**, v. 18, n. 7, p. 509-533, 1997.

TEIRLINCK, P.; POELMANS, E. Open innovation and firm performance in small-sized R&D active companies in the chemical industry: the case of Belgium. **Journal of Business Chemistry**, v. 9, n. 3, p. 117-132, 2012.

TEN, Y. P. The digitalization of economy as the “response” to the global change. **Journal of Hygienic Engineering and Design**, v. 29, p. 160-165, 2019.

TRIGUERO, Á.; CUERVA, M. C.; SÁEZ-MARTÍNEZ, F. J. Closing the loop through eco-innovation by European firms: Circular economy for sustainable development. **Business Strategy and the Environment**, 2022. doi:10.1002/bse.3024

TROTT, P.; HARTMANN, D. A. P. Why' open innovations old wine in new bottles. **International Journal of Innovation Management**, v. 13, n. 04, p. 715-736, 2009.

TU, J. C.; CHAN, H. C.; CHEN, C. H. Establishing Circular Model and Management Benefits of Enterprise from the Circular Economy Standpoint: A Case Study of Chyhjiun Jewelry in Taiwan. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 4146, 2020.

UNCTAD. WORLD INVESTMENT REPORT 2020.

[HTTPS://UNCTAD.ORG/EN/PUBLICATIONSLIBRARY/WIR2020_EN.PDF](https://unctad.org/en/publicationslibrary/wir2020_en.pdf)

UPADHYAY, A.; BALODI, K. C., NAZ, F.; DI NARDO, M.; JRAISAT, L. Implementing industry 4.0 in the manufacturing sector: Circular economy as a societal solution. **Computers & Industrial Engineering**, v. 177, p. 109072, 2023.

UPADHYAY, A.; LAING, T.; KUMAR, V.; DORA, M. Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. **Resources Policy**, v. 72, p. 102037, 2021.

VALENTINE, L. *et al.* Design Thinking for Textiles: let’s make it meaningful. **The Design Journal**, v. 20, n. sup1, p. S964-S976, 2017.

VAN HEMEL, C.; CRAMER, J. Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 5, p. 439-453, 2002.

VARGAS, J. P.; MUNOZ LAGOS, A. P.; FERIZ TORRES, J. G.; KINNEY, I. S.; PÉREZ CORTÉS, S.; HURTADO, J. P. Achieving circularity through novel product-service systems in the mining industry: An opportunity for circularity. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3614, 2022.

VELTER, M. G. E. *et al.* Sustainable business model innovation: The role of boundary work for multi-stakeholder alignment. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119497, 2020.

WANG, J. X.; BURKE, H.; ZHANG, A. Overcoming barriers to circular product design. **International Journal of Production Economics**, v. 243, p. 108346, 2022.

WANG, Y. *et al.* How product and process knowledge enable consumer switching to remanufactured laptop computers in circular economy. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 161, p. 120275, 2020.

- WATTS, B. A.; PALMEIRA ZAGO, V. C.; GOPAKUMAR, L.; GHAZARYAN, K.; MOVSESYAN, H. Uncharted risk measures for the management of sustainable mining. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 19, n. 4, p. 949-960, 2023.
- WEST, J.; BOGERS, M. Leveraging external sources of innovation: A review of research on open innovation. **Journal of product innovation management**, v. 31, n. 4, p. 814-831, 2014.
- WIĘCKOL-RYK, A.; PIERZCHAŁA, Ł.; BAUERREK, A.; KRZEMIENIŃ, A. Minimising Coal Mining's Impact on Biodiversity: Artificial Soils for Post-Mining Land Reclamation. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9707, 2023.
- WOERN, A. L.; PEARCE, J. M. Distributed manufacturing of flexible products: Technical feasibility and economic viability. **Technologies**, v. 5, n. 4, p. 71, 2017.
- XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International journal of production research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.
- YIN, ROBERT K. **Case Study Research - Design and Methods**. Sage Publications Inc., USA, 1989.
- YU, Y. *et al.* Intelligent transformation of the manufacturing industry for Industry 4.0: Seizing financial benefits from supply chain relationship capital through enterprise green management. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 172, p. 120999, 2021.
- ZACHARIA, Z. G.; NIX, N. W.; LUSCH, R. F. Capabilities that enhance outcomes of an episodic supply chain collaboration. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 6, p. 591-603, 2011.
- ZAHRA, S. A.; GEORGE, G. Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension. **Academy of management review**, v. 27, n. 2, p. 185-203, 2002.
- ZHANG, S.; MENG, Q. Electronics closed-loop supply chain value co-creation considering cross-shareholding. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123878, 2021.
- ZHANG, X. Y.; ZHONG, J. W. Study on the construction of the value chain of recycling economy in Poyang Lake area. In: *Proceedings of the 2nd International Conference On Value Engineering and Value Management*, 2009.
- ZHANG, Wengang *et al.* Study on seismic behaviors of a double box utility tunnel with joint connections using shaking table model tests. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 136, p. 106118, 2020.
- ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017.
- ZHU, Q.; GENG, Y.; LAI, K.H. Circular economy practices among Chinese manufacturers varying in environmental-oriented supply chain cooperation and the performance implications. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 6, p. 1324-1331, 2010.
- ZOBEL, A. K. Benefiting from open innovation: A multidimensional model of absorptive capacity. **Journal of Product Innovation Management**, v. 34, n. 3, p. 269-288, 2017.

FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado em parte com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Processo CAPES/PRINT (88887.605415/2021-00).

APÊNDICES

Apêndice A - Resumo dos artigos analisados no artigo 1

Autor (Ano)	Contexto	Objetivo	Método	Setor/ tema	Nível EC	Inbound/ Outbound/ Acoplado	Teoria subjacente	Potenciais implicações para a economia circular orientada pela inovação aberta
Amenta e van Timmeren (2018)	Economias desenvolvidas: Holanda e Itália	Investigar os efeitos e impactos espaciais dos processos metabólicos urbanos em áreas de resíduos.	Qualitativo. Estudo de casos	Áreas periurbanas/ Gestão de resíduos	Micro	Acoplado	NA	O processo de cocriação proporcionados pelos PULLs pode ser útil no desenvolvimento de soluções eco inovadoras, facilitando a transição para EC em áreas periurbanas.
Amenta <i>et al.</i> (2019)	Economias desenvolvidas: Holanda e Itália	Descrever o processo de cocriação dos <i>Living Labs</i> para implementar abordagens da EC em áreas periurbanas.	Qualitativo. Estudo de casos	Áreas periurbanas/ Gestão de resíduos	Macro	Acoplado	NA	A cocriação e os PULLs ajudam integrar as partes interessadas envolvidas na definição de Soluções Eco Inovadoras, para delinear estratégias que visam melhorar a qualidade de vida.
Arciniegas <i>et al.</i> (2019)	Economia desenvolvida: Holanda	Apresentar uma ferramenta de código aberto baseada na abordagem de <i>geodesign</i> , que vincula a cocriação e simulações de impacto em contextos geográficos.	Misto. Estudo de caso	Áreas periurbanas/ Gestão de resíduos	Macro	Acoplado	NA	O processo colaborativo de desenvolvimento de estratégias eco inovativas para promover a EC pode ser feito pelo software <i>geodesign</i> usado para melhorar o gerenciamento de resíduos e recursos em áreas periurbanas.
Brown <i>et al.</i> (2020)	Economia desenvolvida: Holanda	Investigar como desenvolver e avaliar modelos de negócios colaborativos e orientados a sistemas	Qualitativo. Estudos de caso	NA/Economia circular	Micro	Acoplado	NA	A implementação da inovação aberta pode ajudar na compreensão e análise da inovação orientada a circularidade colaborativo.

		na transição para a EC.						
Cappellaro <i>et al.</i> (2019)	Economia desenvolvida: Itália	Descrever e examinar uma série de atividades tecnológicas, sociais, econômicas no distrito de Centocelle, em Roma, seguindo o Modelo de Rede Social Urbana.	Qualitativo. Estudo de caso	Cidade de Roma/ <i>Smart cities</i>	Macro	Acoplado	NA	A cocriação nas comunidades inteligente é capaz de envolver os membros a participar das decisões, ativando comportamentos informados entre os cidadãos por meio de ações de boas práticas relacionadas a questões de energia e sustentabilidade.
Chammas <i>et al.</i> (2020)	Economia em desenvolvimento: Líbano	Apresentar uma pesquisa transdisciplinar baseada em avaliação <i>ex post</i> dos contextos ambientais e sócio-comportamentais da gestão de resíduos sólidos em comunidades periurbanas libanesas.	Qualitativo. Estudo de caso	Áreas periurbanas/ Gestão de resíduos	Macro	Acoplado	Teoria do Comportamento Planejado	A cocriação de conhecimento pode ser utilizada entre as partes interessadas na abordagem transdisciplinar, para orientar soluções para o problema.
Chen (2018)	NA	Propor uma orientação para o desenvolvimento de ofertas sustentáveis de produtos e serviços na fase inicial de planejamento de PSS.	Conceptual	NA/ Economia circular	Micro	<i>Inbound</i>	NA	As redes de colaboração com governos e comunidades podem promover a inovação aberta para encontrar oportunidades de cocriar valores sustentáveis.
Cong <i>et al.</i> (2020)	Economia em desenvolvimento: China	Apresentar uma nova abordagem (baseada na teoria de entropia de <i>design</i>) que se concentra no desenvolvimento do smart PSS, reduzindo	Misto. Estudo de caso	Serviços/ <i>Smart PSS</i>	Micro	Acoplado	Teoria da entropia do <i>design</i> e Teoria da Informação	A cocriação facilita o desenvolvimento do <i>smart PSS</i> com melhor desempenho e satisfação do usuário (atendimento dos requisitos do cliente e acelerando o ciclo do projeto).

Dabrowski <i>et al.</i> (2019)	Economias desenvolvidas: Holanda e Itália	a entropia do projeto em seu ciclo de vida em circuito fechado. Analisar o processo de transferência de conhecimento entre Amsterdan e Nápoles na área da EC.	Qualitativo. Estudo de casos	Áreas periurbanas/ Gestão de resíduos	Macro	Acoplado	NA	Fornecer uma ilustração empírica do processo de tradução de políticas, e como as soluções são retrabalhadas para serem aplicadas no processo de transição da EC.
Gorissen <i>et al.</i> (2016)	Economia desenvolvida: Bélgica	Apresentar uma abordagem de inovação de modelo de negócios inspirada na teoria de transição que combina elementos de pensamento sistêmico, visão inspirada em valor, <i>design</i> reflexivo e cocriação de centros de reutilização na província de Limburg, Bélgica.	Qualitativo. Estudo de caso	Centros de reutilização/ Economia circular	Micro	Acoplado	Teoria da transição	A cocriação pode induzir a ideia de propriedade dos participantes estimulando a ancoragem de novos valores entre os parceiros.
Gupta <i>et al.</i> (2016)	NA	Defender uma reformulação da teoria da inovação aberta, de modo que empresas e comunidades sejam capazes de equilibrar a necessidade de reciprocidade e responsabilidade, para criar uma economia compartilhada robusta, resiliente e ágil.	Qualitativo. Estudo de caso	Inovação frugal/NA	NA	Acoplado	Teoria do <i>Open Innovation</i>	A cocriação permite que empresas ou comunidades encontrem soluções inovadoras para problemas locais.

James <i>et al.</i> (2019)	NA	Discutir o papel que o <i>design</i> pode desempenhar na aplicação de um modelo circular utilizando estratégias de extensão da vida do produto.	Qualitativo. Estudo de caso	Indústria <i>fashion</i> / Economia circular	Micro	Acoplado	NA	A cocriação e o <i>design</i> participativo facilitam um maior nível de conscientização dos consumidores ao abordar o <i>design</i> como ferramenta essencial para a mudança (facilita a responsabilidade compartilhada, a construção de cenários futuros e o planejamento do ciclo de vida do produto).
Leising <i>et al.</i> (2018)	Economia desenvolvida: Holanda	Analisar como novas formas de colaboração na cadeia de suprimentos podem contribuir para a transição para a EC no setor de construção holandês.	Qualitativo. Estudos de caso	Construção civil/ Economia circular	Micro	Acoplado	Teoria da Rede de Atores e Teoria da Rede Industrial	O processo de cocriação de uma visão ambiciosa é uma das ações necessárias para a construção de edifícios circulares
Leube e Walcher (2017)	NA	Discutir sobre a necessidade de mudança dos currículos da escola de <i>design</i> para alinhar-se à economia circular.	Conceitual	<i>Design</i> Ensino/ Economia circular	Micro	Acoplado	NA	Os currículos das escolas de <i>design</i> devem ser redesenhados para integrar a cocriação e participação ativa de todas <i>stakeholders</i> para atingir uma estratégia de EC viável.
Naveed <i>et al.</i> (2020)	NA	Investigar o acoplamento co-evolutivo com característica de crescimento para fornecer uma visão prática para sua operacionalização.	Quantitativo. <i>Survey</i>	NA/ Economia Circular	Micro	Acoplado	NA	O acoplamento com usuários por meio da inovação neoaberta permite aproveitar o vigor dos recursos externos de inovação, que se transformam em um novo conceito de P&D.
Parida e Wincent (2019)	NA	Revisar a literatura sobre sustentabilidade, modelos de negócios, inovação e redes.	Revisão	NA/Economia circular, servitização e digitalização	Micro	Acoplado	Visão Baseada em Recurso	A cocriação com parceiros do ecossistema maximiza os benefícios da sustentabilidade, aumenta a produção, melhora o desempenho e/ou obter economia de custos.

Patala <i>et al.</i> (2020)	Economia desenvolvida: Finlândia	Identificar os dilemas na organização de redes de simbiose industrial da Finlândia.	Qualitativo. Estudo de caso	NA/Simbiose industrial	Meso	Acoplado	NA	A implementação da inovação aberta em redes de simbioses industrial pode ajudar a superar os dilemas de abertura e demonstração de valor que dificultam as relações entre empresas e intermediários.
Pencarelli (2019)	NA	Investigar o impacto da revolução digital no turismo bem como as diferenças e similaridades entre o turismo 4.0 e turismo inteligente.	Conceitual	Turismo/digitalização	NA	Acoplado	NA	O processo de cocriação permite uma rica experiência turística no mundo físico e digital, facilitando o intercâmbio de recursos e criação de valor nas ofertas experimentais para e com visitantes de destino inteligentes.
Peng <i>et al.</i> (2020)	Economia em desenvolvimento: China	Propor uma estrutura de cocriação de valor no círculo ecológico da plataforma para empresas de logística da cadeia de frio para orientar sua transformação e desenvolvimento.	Quantitativo. Modelagem Equações Estruturais	Cadeia Logística de frios/Plataforma de Circulo Ecológico	Micro	Acoplado	Teoria das capacidades dinâmicas	Os recursos compartilhados e as atividades de cocriação de valor no círculo ecológico da plataforma tem efeito significativo para a melhoria do desempenho das empresas de logística da cadeia de frios.
Schroder <i>et al.</i> (2019)	Economias desenvolvidas e em desenvolvimento: Estados Unidos, Japão, Índia	Discutir como as abordagens combinadas podem criar cidades sustentáveis de baixo carbono e habitáveis.	Qualitativo. Estudo de casos	NA/ Produção e consumo sustentáveis	Macro	Acoplado	NA	As iniciativas <i>bottom-up</i> , apoiadas e facilitadas por meio de processos de cocriação, podem alcançar mudanças institucionais em relação aos padrões de produção e consumo sustentável nas áreas de alimentação, mobilidade, moradia e produtos de consumo e gestão de resíduos.
Ten (2019)	Economia em desenvolvimento: Rússia	Analisar o impacto da economia digital nas organizações russas.	Revisão	Empresas russas/ Digitalização	Micro	<i>Inbound</i>	NA	A abertura para novas ideias e pontos de vista pode ajudar as empresas russas a resolver os problemas estratégicos no contexto da economia digital.

Valentine <i>et al.</i> (2017)	NA	Investigar o papel do <i>designer</i> e educador no processo de transformação sustentável no setor têxtil.	Revisão	<i>Design</i> têxtil/Economia circular	Micro	Acoplado	NA	No <i>design</i> para a sustentabilidade, o processo de cocriação fornece ferramentas e possibilita plataformas de compartilhamento de recursos para entender e atender as necessidades sociais.
Velter <i>et al.</i> (2020)	Economia desenvolvida: Holanda	Explorar mudanças nas fronteiras organizacionais entre empresas focais e suas partes interessadas externas, investigando especificamente o processo de explorar, negociar, interromper e realinhar fronteiras organizacionais	Qualitativo. Estudo de caso	NA/ Economia circular	Micro	Acoplado	Teoria do Trabalho de Fronteira	As lentes de trabalho de fronteira podem avançar no entendimento dos processos de alinhamento entre organizações focais e seus <i>stakeholders</i> externos, necessários para a inovação sustentável do modelo de negócios.
Zhang e Meng (2021)	Economia em desenvolvimento: China	Analisar a cocriação de valor e a participação acionária cruzada na cadeia de suprimentos de circuito fechado de eletrônicos	Quantitativo. Modelagem	Eletrônicos/ Remanufatura	NA	Acoplado	NA	O modelo de cocriação de valor fornece insights de como a participação cruzada pode gerar valor para os participantes da cadeia de suprimentos de eletrônicos.

Note: NA – Não Aplicável.

Apêndice B – Carta convite e questionário de pesquisa referentes ao artigo 2

Olá, prezado(a) participante,

Ressaltamos que nenhuma informação sigilosa será divulgada e todos os resultados serão utilizados apenas para fins acadêmicos. A inserção do nome da empresa é opcional. Este levantamento faz parte de uma pesquisa de doutorado em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP *Campus* Bauru/SP), que tem como objetivo identificar se a inovação aberta e as tecnologias da Indústria 4.0 influenciam a adoção da economia circular e o desempenho da empresa. Neste contexto, esclarecemos que:

- Inovação aberta: estabelece parcerias para o desenvolvimento em conjunto de inovações, o que permite a soma de recursos financeiros, humanos e tecnológicos, ao mesmo tempo que possibilita a redução de custos e riscos;
- Economia circular: busca aproveitar os recursos existentes com mais eficiência, evitando desperdícios e utilizando os resíduos como matéria-prima para novas produções;
- Indústria 4.0: envolve a utilização de tecnologias digitais baseadas em automação e troca de dados que ajudam a melhorar a eficiência e a produtividade de processos industriais.

O tempo de resposta do questionário é de aproximadamente 8 minutos.

Ao término da pesquisa - para cada questionário preenchido - será doado como forma de contribuição o valor de R\$ 10,00 (dez reais) para a ONG “SOS Focinho Carente” que faz o resgate de animais da região de Barra Bonita, SP, CNPJ: 34.838.740/0001-13.

Também, como forma de retribuir a sua participação, nos comprometemos em enviar um relatório gerencial dos principais resultados desta pesquisa. Para isso, basta inserir seu e-mail (campo opcional) no final do questionário.

Desde já agradecemos sua inestimável colaboração.

A disposição para quaisquer esclarecimentos e com elevada estima.

Gessica Mina Kim Jesus (UNESP *Campus* Bauru/SP) gessica.mina@unesp.br

Daniel Jugend (UNESP *Campus* Bauru/SP) daniel.jugend@unesp.br

Por favor, inicie a partir da questão abaixo:

1. Qual o setor da empresa? _____

2. Qual a idade aproximada da empresa?

- () Menos de 1 ano
- () 2 a 5 anos
- () 6 a 10 anos
- () 11 a 19 anos
- () 20 anos ou mais

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

- () 1 a 10
 () 11 a 19
 () 20 a 99
 () 100 a 499
 () 500 ou mais

4. A empresa atende a mercados internacionais (exporta produtos)?

- () Sim
 () Não

5. Qual o cargo do respondente? _____

6. Inovação aberta: assinale a alternativa que melhor expressa o seu nível de concordância em relação às afirmações sobre a inovação aberta na sua empresa.

Escala: 1- Discordo totalmente até 7- Concordo totalmente

Minha empresa participa de atividades que visam obter ideias de clientes para os seus projetos de inovação.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa participa de atividades que visam obter ideias de fornecedores para os seus projetos de inovação.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma comprar serviços de P&D ou de Engenharia de parceiros externos em suas atividades de inovação.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa realiza parcerias com universidades, ou escolas técnicas, ou instituições de pesquisa/ensino para desenvolver seus projetos de inovação.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma fazer pesquisa e desenvolvimento em conjunto com outras instituições e organizações, tais como ONGs, <i>startups</i> , governos regionais, dentre outras.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma vender patentes ou know-how ou fazer contratos de licenciamento de propriedade intelectual.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma divulgar ou disseminar nosso conhecimento interno sem ter o objetivo de obter recompensas financeiras diretas (por exemplo, divulgamos a tecnologia utilizada de nossos produtos e processos).	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa participa de redes de inovação ou grupos regionais de inovação.	1	2	3	4	5	6	7

7. Economia circular: assinale a alternativa que melhor expressa o seu nível de concordância em relação a afirmações sobre adoção das práticas da economia circular na sua empresa (últimos 3 anos).

Escala: Escala: 1- Discordo totalmente até 7- Concordo totalmente

Minha empresa tem projetado ou priorizado o uso de produtos/materiais para serem facilmente reformados/remanufaturados/reparados.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem projetado ou priorizado o uso de materiais biodegradáveis e/ou recicláveis.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem utilizado embalagens biodegradáveis e/ou recicláveis.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem fechado os ciclos no processo de produção, por exemplo eliminando vazamentos, desperdícios ou minimizando a geração de resíduos.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem aumentado a eficiência de material e energia do processo produtivo com foco na sustentabilidade.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem transferido ou vendido subprodutos para outras empresas.	1	2	3	4	5	6	7

Minha empresa tem fornecido aos clientes serviços de atualização/reparo/reforma dos seus produtos.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem feito a coleta dos seus produtos no fim de vida.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem reciclado os resíduos gerados de sua produção.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa tem utilizado em seu processo de produção subprodutos ou materiais reciclados de outras empresas.	1	2	3	4	5	6	7

8. Tecnologias da Indústria 4.0: assinale a alternativa que melhor expressa o seu nível de concordância em relação às afirmações sobre as tecnologias da Indústria 4.0 na sua empresa.

Escala: 1- Discordo totalmente até 7- Concordo totalmente

Minha empresa utiliza a internet para a conectividade entre as coisas (conexão digital entre objetos do cotidiano incorporados a dispositivos com sensores, RFID/TAG/identificação eletrônica, etc).	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa utiliza a computação em nuvem para o armazenamento de informações e sistemas de gerenciamento online, por exemplo.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa utiliza os sistemas ciber físicos (integrações que envolvem computação, comunicação e controle por meio de redes e processos físicos).	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa utiliza a tecnologia de <i>big data</i> para tratar, analisar e obter informações relevantes.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa utiliza a tecnologia de manufatura aditiva (ou impressora 3D) em alguma etapa do processo produtivo.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa utiliza a inteligência artificial em alguma etapa do processo produtivo.	1	2	3	4	5	6	7

9. Capacidade de absorção: assinale a alternativa que melhor expressa o seu nível de concordância em relação a afirmações sobre a capacidade de absorção de conhecimento externo na sua empresa (últimos 3 anos).

Escala: 1- Discordo totalmente até 7- Concordo totalmente

Minha empresa costuma reconhecer a importância de obter novos conhecimentos.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma absorver conhecimentos externos considerados valiosos e úteis.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma utilizar novos conhecimentos para melhorar o seu desempenho.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma identificar ideias novas e úteis.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma utilizar as novas ideias para melhorar o seu desempenho.	1	2	3	4	5	6	7
Minha empresa costuma incentivar ideias novas e úteis.	1	2	3	4	5	6	7

Nome da empresa (opcional): _____

E-mail do respondente para receber o relatório gerencial ao término da pesquisa

(opcional): _____

Apêndice C – Roteiro de entrevista referente ao artigo 3

Cargo do entrevistado: _____

Experiência na área (anos): _____

1. Sobre a empresa

1. Quando a empresa foi fundada?
2. Quais são os principais produtos comercializados?
3. Quais são os principais mercados/setores atendidos?
4. Onde se localiza a sede da empresa?
5. A empresa possui aproximadamente quantos funcionários?
6. A empresa exporta seus produtos? Se sim, para quais países?
7. Quais certificações a empresa tem?
8. A empresa possui um setor de meio ambiente para cuidar de suas operações?

2. Economia circular na indústria de mineração

1. Qual o seu entendimento sobre economia circular (EC)?
2. Quando a empresa começou a se preocupar com a EC? Quais foram as primeiras ações tomadas?
3. Cite e comente projetos de EC que a empresa possui.
4. A empresa conhece sobre logística reversa? Faz uso deste processo em suas operações?
5. Quais são as principais práticas de EC estão sendo implementadas? (3R's: reduzir, reutilizar e reciclar. Exemplos: aproveitamento de rejeitos minerais, economia de energia/energia renovável, reuso da água *etc.*)
6. Qual tratativa/destinação a empresa possui com relação a produção de estéril e rejeito? Existe formas de reaproveito?

OBS: O estéril é a massa produzida dentro da mina que deve ser separada do minério, não tem valor econômico para o processo da empresa, porem pode ser utilizado para outros fins. Já o rejeito é a massa gerada no beneficiamento do minério, este também não tem valor econômico para o processo da empresa, porem pode ser utilizado para outros fins.

7. Quais as principais barreiras (dificuldades/obstáculos) que a empresa enfrenta para implementar a EC (econômico, social, ambiental, regulatório, tecnológico *etc.*). Por favor comente.
8. Quais as principais motivações para a empresa implementar a EC?

3. Inovação aberta orientada para a economia circular

1. Como o departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da empresa ou setor de desenvolvimento de tecnologias está estruturado para atender as demandas de inovações para a EC?

2. A empresa tem algum processo para receber ou documentar as ideias de projetos de EC que surgem internamente (colaboradores) e/ou externamente (clientes, fornecedores, universidades *etc*)?
3. A empresa desenvolve (ou já desenvolveu) projetos de inovação na área da EC em parceria com os stakeholders abaixo? Por favor comente os mais importantes e dentre eles quais foram as práticas e barreiras para a colaboração.
 - a. fornecedores
 - b. clientes
 - c. universidades, ou escolas técnicas, ou instituições de pesquisa/ensino
 - d. ONGs
 - e. *startups*
 - f. governos (municipal, estadual ou federal)
 - g. institutos de pesquisa
 - h. consultorias
 - i. concorrentes
 - j. outra instituição. Qual? _____
4. A empresa tem o costume de comprar ou contratar serviços de P&D ou de Engenharia de parceiros externos em suas atividades de inovação para poder implementar a EC? Por favor, comente.
5. A empresa tem o costume de vender/ou disponibilizar patentes, *know-how* ou fazer contratos de licenciamento de propriedade intelectual em EC? Por favor, comente.
6. A empresa costuma divulgar ou disseminar conhecimento interno relacionado à EC sem ter o objetivo de obter recompensas financeiras diretas (por exemplo, divulgando a tecnologia utilizada para reduzir o consumo de água/energia nos processos)? Por favor, comente.
7. A empresa tem ou já teve problemas relacionados com a síndrome *not invented here* (resistência dos colaboradores em aceitar ideias novas criadas externamente)? Por favor, comente.